

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук

*филиал*

**ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ**  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

# **СТРАТЕГИЯ И ПРОЦЕССЫ ОСВОЕНИЯ ГЕОРЕСУРСОВ**

*Сборник научных трудов*  
*Выпуск 16*

Пермь  
2018

УДК 55(06) + 622(06)  
ББК 26.3я431+33я431  
С 833

**СТРАТЕГИЯ И ПРОЦЕССЫ ОСВОЕНИЯ ГЕОРЕСУРСОВ:** сб. науч. тр.  
Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – 340 с.

ISBN 978-5-91252-095-2

Шестнадцатый выпуск сборника «Стратегия и процессы освоения георесурсов» содержит труды сотрудников Горного института УрО РАН по широкому кругу фундаментальных и прикладных проблем и задач геологического техногенеза, механики горных пород, содержательной интерпретации геофизических полей, мониторинга природной и техногенной сейсмичности, аэрологии, теплофизики, геоэкологии и безопасности работ на горнодобывающих предприятиях.

*Рекомендовано к изданию  
Ученым советом ГИ УрО РАН*

**Главный редактор**  
проф., д.т.н. *А.А. Барях*

**Редакционная коллегия:**

д.т.н. *В.А. Асанов*, д.т.н. *С.С. Андрейко*, к.г.-м.н. *Б.А. Бачурин*,  
д.г.-м.н. *С.Г. Бычков*, к.ф.-м.н. *Р.А. Дягилев*, д.т.н. *Б.П. Казаков*,  
д.г.н. *А.П. Лепихин*, д.т.н. *И.А. Санфиоров*, к.г.-м.н. *Ю.И. Степанов*,  
д.г.-м.н. *И.И. Чайковский*



© ГИ УрО РАН, 2018

# ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 553.63+556.3

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.1

И.И. ЧАЙКОВСКИЙ

*Горный институт УрО РАН*

## **НОВЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ ТИП РАССОЛОВ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

На Южно-Соликамском участке Верхнекамского месторождения в 2017 г. была вскрыта зона выщелачивания (разубоживания), в которой пласт Б «замещен» кавернозной гипс-сингенит-галитовой породой. Внутри этой зоны зафиксировано присутствие рассолов необычного состава. Для изучения их состава геологической службой рудника было отобрано около 90 проб, которые были выполнены в химической лаборатории ПАО «Уралкалий» по стандартным методикам. Установлено, что рассолы сверхкрепкие (354,68–375,12 г/дц<sup>3</sup>), имеют стабильный слабокисло-нейтральный (рН 6,0–7,1) хлоридный калиево-натриевый состав (Na 97,18–105,50; K 47,65–53,00; Mg 0,48–1,26; Ca 1,09–1,61; Cl 199,51–211,12; SO<sub>4</sub> 4,18–4,76; Br 0,21–0,34; HCO<sub>3</sub> 0–0,12; CO<sub>3</sub> 0–0,07). Для выявления особенностей химизма было выполнено сопоставление состава эвапоритов как с мировыми эвапоритовыми эталонами, так и растворами Верхнекамского месторождения (рис. 1, 2; таблица). Для построения первых, содержания ионов были нормированы на состав морской воды [7], а сами компоненты были ранжированы в порядке возрастания в воде Мертвого моря [5], которое рассматривается в качестве эвапоритового бассейна хлоридного типа, находящегося на стадии садки карналлита.

Сопоставление спектров с таковыми Мертвого моря показывает обогащение более чем на один порядок гидрокарбонат-ионом рассолов содовых озер Забайкалья и Кении [4, 6], которые связываются с континентальными условиями или рифтовым карбонатитовым вулканизмом соответственно. Повышенным содержанием сульфат-иона отличаются сульфатные воды континентальных озер Алтая и Монголии [1, 4], из которых кристаллизуются глауберит и/или мирабиллит.

Анализ кривых распределения подземных вод Верхнекамского месторождения позволяет отметить следующее. Грунтовые воды терригенно-карбонатной толщи характеризуются низкой минерализацией и гидрокарбонатно-кальциевым составом. Сверху–вниз в них возрастает содержание SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, вплоть до сульфатно-кальциевых вод в соляно-мергельной толще. К ее низу возрастает содержание натрия и хлора, которые максимальны на контакте с соляной толщей (рассольный горизонт). В некоторых рассолодобывающих скважинах (Александровская, Ивановская и Людмилинская) иногда отмечалось появление калия [3], превышающее его концентрацию в воде Мертвого моря.

Находящиеся в соляной толще седиментационные (маточные) рассолы наиболее близки по составу воде Мертвого моря. Пониженное содержание SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> и повышенное – HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> позволят предполагать, что это связано с бактериальным окислением органики и редукцией сульфат-иона на стадии диагенеза и катагенеза. В сильвините пласта КрII зафиксировано максимальное для месторождения (11–15 г/дц<sup>3</sup>) содержание брома, которое в вышележащей карналлитовой толще связывалось в кристаллической решетке карналлита. Подобное поведение компонентов (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Br) отражает проявление метаморфизма исходной рапы.

Водные вытяжки из маркирующего горизонта в подстилающей каменной соли, сложенно-глинистым материалом с примесью ангидрита, наиболее близки к составу морской воды. Низкое содержание солей может характеризовать как длительный период распреснения солеродного бассейна в период накопления маркирующего горизонта, так и отжатие поровой, а затем и кристаллогидратной воды в процессе катагенеза. Формирующиеся в выработках, вскрывших подстилающую каменную соль, конденсатные рассолы обогащаются хлоридом натрия и наследуют вы-

сокое содержание сульфата кальция типичное для толщ галитового состава (подстилающей и покровной). Встреченные в гипс-сингенит-галитовой зоне выщелачивания растворы отличаются от рассолов галитовых толщ несколько повышенным содержанием Mg и аномальным – K.

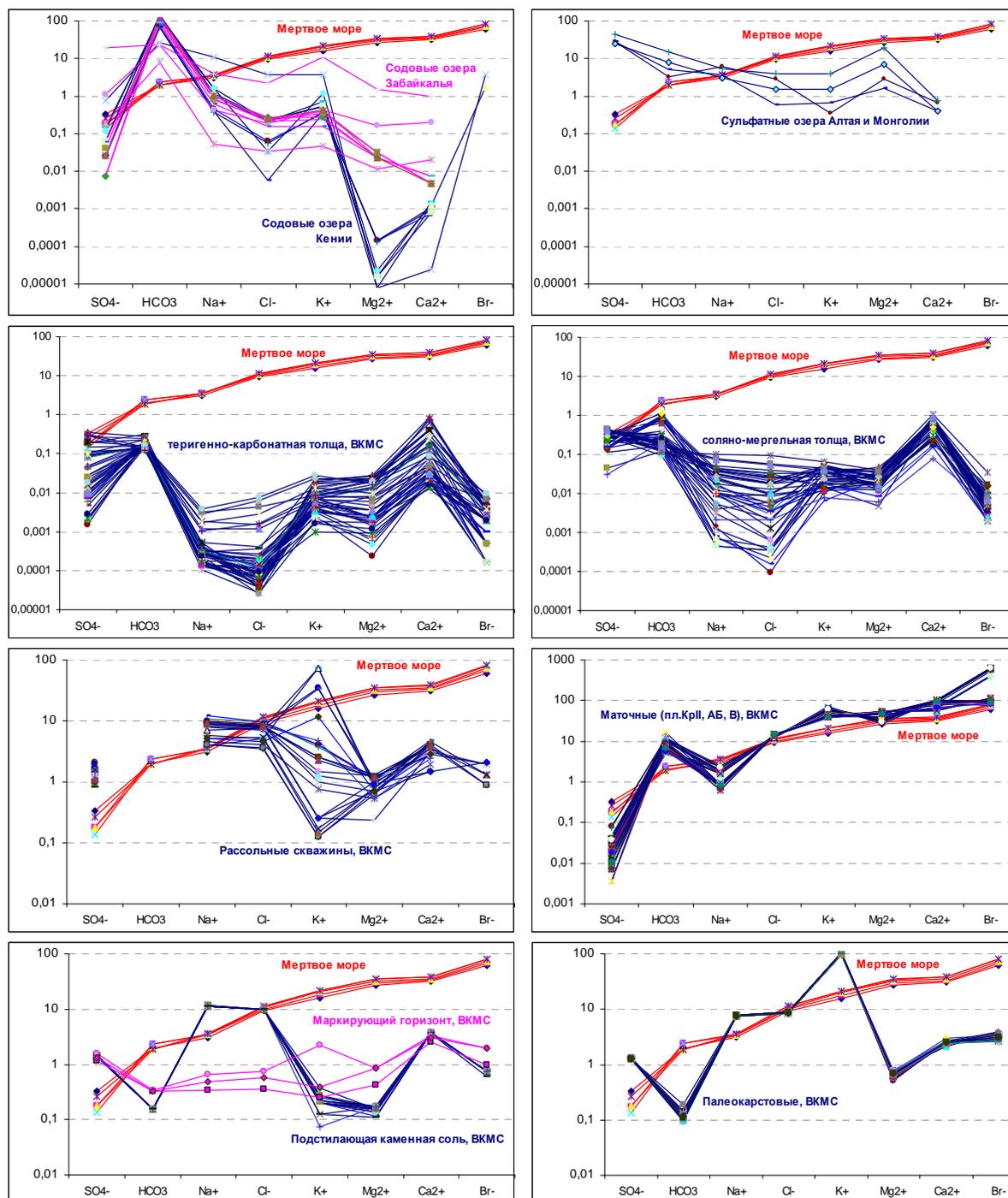


Рис. 1. Нормированные к морской воде составы рассолов эвапоритовых бассейнов (а, б) и Верхнекамского месторождения (в-з), г/дм<sup>3</sup>

Построение бинарных диаграмм позволило ограничить поля составов рассолов Верхнекамского месторождения, а также проследить основные вариации содержаний ионов в процессе роста минерализации. На них видно, что вначале происходит рост натрия (от 40 до 120 г/дм<sup>3</sup>), а затем калия (10–35 г/дм<sup>3</sup>). При достижении общей минерализации 355 г/дм<sup>3</sup> начинает резко возрастать содержание магния (от 20 до 80 г/дм<sup>3</sup>) и кальция (от 15 до 43 г/дм<sup>3</sup>). Такая последовательность накопления катионов в рассоле сопоставима с растворимостью их хлоридов.

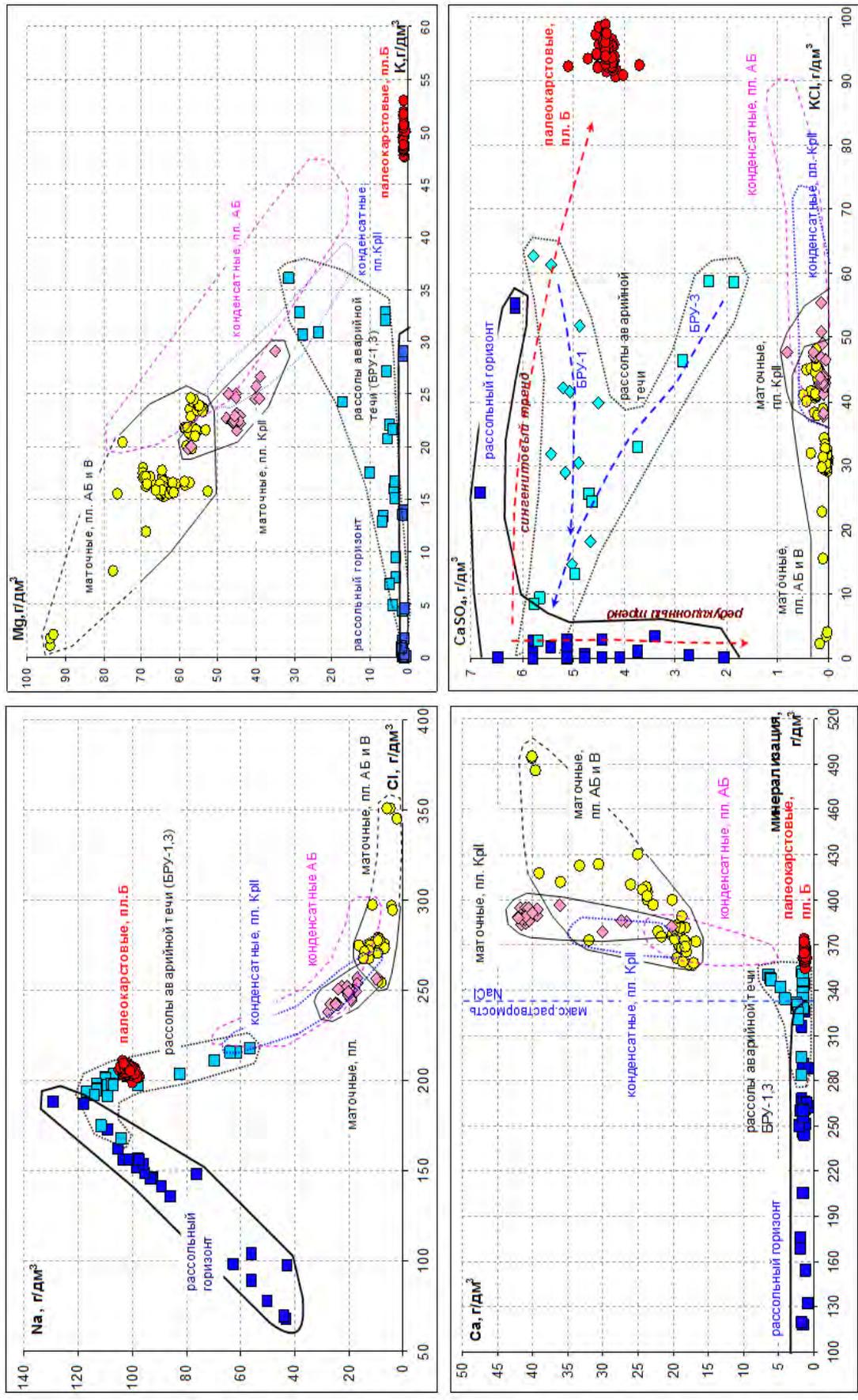


Рис. 2. Типизация рассолов Верхнекамского месторождения по соотношению основных ионов и солей. Синими стрелками показана эволюция состава рассолов аварийной течи в процессе затопления, красными – сингениковый и сульфатредукционные тренды рассольного горизонта

Типизация установленных и прогнозируемых рассолов Верхнекамского месторождения

Генетический тип	Источник вод	Механизм формирования солевого состава	Формула	Cl/Bг : rNa/rCl : Ca/Cl	Минеральные продукты
Надсолевые (карстовые и палеокарстовые)	Инфильтрационные воды (рас-солного горизонта)	Выщелачивание кровли со-ляной толщи (галитов, карналлитов и сильвини-тов)	Рассольный горизонт $M_{119-326} \frac{Cl(94-99)SO_4(1-6)}{Na(57-98)K(0-39)Mg(0-2)Ca(1-4)}$	1097-1302:0,7-1,1:0-0,02	Гипсово-глинистая шпала, (гипергенные сильвиниты и галититы)
		Реакция сульфатных вод с карналлитами	?	?	Предполагаемые гиперген-ные сульфаты Mg (полига-лит? и др.)
Аварийные	Инфильтрацион-ные	Реакция сульфатных вод с сильвинитами	$M_{385-374} \frac{Cl(98)SO_4(2)}{Na(65-67)K(31-34)Mg(1)Ca(1)}$	636-956:0,74-0,78:0,01	Гипергенные сульфаты К (сингенит, калистронцит, гёргейит)
		Выщелачивание вдоль зоны прорыва	$M_{284-355} \frac{Cl(97-99)Br(0-1)SO_4(1-3)}{Na(43-96)K(1-28)Mg(1-24)Ca(1-5)}$	637-956:0,74-0,78:0,01	?
Конденсаци-онные	Влага закачивае-мого воздуха	Выщелачивание поверхно-сти стен выработок	$M_{217-441} \frac{Cl(95-99)Br(0-5)SO_4(0-2)}{Na(1-99)K(0-33)Mg(0-79)Ca(1-33)}$	18-3882:0,01-1:0,01-0,14	Галит
Закладочные	Техногенный	Продукты передела К и Mg солей	Определяется технологией обогащения солей		Галит, сильвин, карналлит, гипс
Седимента-ционные	Рапа осадочного бассейна (в гли-нистых прослоях, межзерновых и внутризерновых включениях)	Трансформация на стадии диагенеза и катагенеза (главным образом сульфат-редукционная)	Пл. В $M_{409-415} \frac{Cl(97-98)Br(2)CO_3(0-1)}{Na(5-9)K(12-15)Mg(45-56)Ca(22-34)}$	40-54:0,04-0,06:0,1-0,15	Зоны ангидритизации, кар-бонатизации и пирротини-зации
			Пл. АБ $M_{344-412} \frac{Cl(94-97)Br(3-6)}{Na(6-22)K(10-20)Mg(33-58)Ca(13-31)}$	13-35:0,05-0,18:0,06-0,14	
			Пл. КрП $M_{378-396} \frac{Cl(94-98)Br(2-6)CO_3(0-1)}{Na(8-23)K(16-21)Mg(26-54)Ca(17-33)}$	16-41:0,06-0,18:0,08-0,17	
Элизионные (подсолевые и солевые?)	Дегидратация глинистых и гип-совых пород под-солевых толщ	Последовательное насыще-ние хлоридами Na, К и Mg при инфильтрации через подстилающую каменную соль, сильвинитовую и кар-наллитовую зоны	Подсолевые воды $M_{180-231} \frac{Cl(99)SO_4(0-1)}{Na(75-80)Mg(4-5)Ca(15-20)}$		Зоны выщелачивания гали-титов, «галитизации» силь-винитов, «сильвинитизации» и «галитизации» карналли-титов

Отмечается также, что состав маточных рассолов, находящихся в равновесии с вмещающими солями карналлитовых (Б, В) и сильвинитовых (А, КрII) пластов, всегда несколько отличается от конденсатных вод, формирующихся в этих же пластах, что позволяет говорить о формировании последних за счет избирательного выщелачивания из стен выработок, а не прямого растворения. На диаграммах видно, что составы вод рассольного горизонта формируют два тренда «расходящихся» от области, отвечающей содержанию сульфата кальция 5,5–7 г/дм<sup>3</sup>. Первый, характеризующийся ростом калия, может быть условно назван «сингенитовым», а второй, направленный в сторону уменьшения сульфата, – «сульфатредукционным». О реальности второго механизма может свидетельствовать наличие в водах рассольного горизонта сероводорода. Два тренда формируют и рассолы аварийной течи. Их различие обусловлено различной глубиной эрозионного вреза соляного зеркала. Так, локализованный в пределах Дурьманского прогиба третий березниковский рудник (БРУ-3), характеризующийся наличием в кровле покровной каменной соли, затапливался водами, не содержащими калия. А первый березниковский рудник (БРУ-1), расположенный на Березниковском поднятии, где на соляное зеркало выходят породы карналлитовой зоны – калийсодержащими.

Особняком стоят впервые встреченные на месторождении рассолы гипс-сингенит-галитовой зоны выщелачивания. По низкому содержанию магния, кальция и брома, а также высокому содержанию натрия и сульфат-иона они сопоставимы с водами, контактирующими с каменной солью (рассольный горизонт). Поскольку проявление этих рассолов локализовано внутри соляной толщи в пласте Б сильвинитового состава, можно предполагать их поступление с поверхности соляной толщи и соответственно их (палео)карстовую природу. Наличие в некоторых водах рассольного горизонта, а также водах аварийной течи высокого содержания калия позволяет предполагать более широкое развитие сингенитсодержащих пород, особенно на поднятиях, где подземное выщелачивание затронуло породы карналлитовой и сильвинитовой зон. Свидетельством этому могут служить находки сингенита в пласте Б, на котором залегают породы гипсово-глинистой шляпы (скв. 40 Половодовского участка) [2].

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-05-00046.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрохимия и геохимическая типизация соленых озер степной части Алтайского края / Колпакова М.Н., Борзенко С.В., Исупов В.П., Шацкая С.С., Шварцев С.Л. // Вода: химия и экология. – 2015. – № 1. – С. 11-16.
2. Коротченкова О.В. Сингенит, алунит и сванбергит – новые сульфаты Верхнекамского месторождения солей / Коротченкова О.В., Чиркова Е.П., Чайковский И.И. // Вестник Уральского отделения РМО. – 2016. – № 13. – С. 68-72.
3. Ходьков А.Е. Вопросы формирования и использования естественных рассолов Верхнекамского месторождения // Исследования соляных месторождений и минеральных вод: сб. ст. – Л.; М., 1953. – С. 3-36. – (Тр. ВНИИГ, вып. XXVIII)
4. Геохимия и формирование состава соленых озер Западной Монголии / С.Л. Шварцев, М.Н. Колпакова, В.П. Исупов, А.Г. Владимиров, С. Ариунбилэг С. // Геохимия. – 2014. – № 5. – С. 432-449.
5. Bentor Y.K. Some geochemical aspects of the Dead Sea and the question of its age // *Geochemica et Cosmochimica Acta*. – 1961. – Vol. 25. – P. 239-260.
6. Geological, volcanological and hydrogeological controls on the occurrence of geothermal activity in the area surrounding Lake Naivasha, Kenya / Min. of Energy; British Geol. Survey; M.C.G. Clarke et al. – Nairobi: Kenya Government, 1990. – 1 атл. (138 с.)
7. Evaporites and the salinity of the ocean during the Phanerozoic: Implications for climate, ocean circulation and life / Hay W.W., Migdisov A., Balukhovskiy A.N., Wold C.N., Fogel S., Soding E. // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – (2006). – V. 240, № 1-2. – P. 3-46.

О.В. КОРОТЧЕНКОВА

*Горный институт УрО РАН*

## **МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД ГРЕМЯЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

В работе приведены результаты минералогического анализа пород и нерастворимого в воде остатка (н.о.) Гремячинского месторождения калийных солей (Волгоградская область). Основой послужили 24 пробы массой 0,4-1 кг, предоставленные лабораторией геотехнологических процессов и рудничной газодинамики УрО РАН. Исследования выполнялись на электронном микроскопе VEGA 3 LMN (Tescan) с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20. Определение гидроборацита и ссайбелиита было проведено Пекковым И.В. методом монокристалльной дифрактометрии.

Гремячинское месторождение приурочено к южному окончанию Приволжской моноклинали и находится в непосредственной близости к Северо-Котельниковскому надвигу на юго-западе. Положение суббассейна на периферии гигантского Прикаспийского солеродного бассейна отразилось на геологическом строении – неоднократная смена режимов сгущения рапы и распреснения обусловила слоистое строение толщи и, соответственно, петрографическое разнообразие пород. Последнее определяется, в том числе существованием разрезов с обратной последовательностью отложения хлоридных минералов (например, карналлит-галитовые породы, подстилающие сильвиниты), которая не соответствует «нормальной», формирующейся при сгущении морской воды. Образование таких минеральных парагенезисов объясняется взаимодействием порций рапы, находящихся на разных стадиях сгущения (процессы высаливания) (Московский и др., 2016). Источником такой рапы служил Прикаспийский солеродный бассейн.

Исследованные нами образцы представлены каменной солью, сильвинитами и карналлитовыми породами. Среди образцов каменной соли были выделены две разновидности – условно первичноосадочные и перекристаллизованные. Для первой характерна желтовато-серая окраска, мелко-, среднезернистая структура и наличие слоистости, подчеркиваемой серыми ангидритовыми прослойками, в различной степени будинированными. Вторая разновидность – это белая крупнозернистая массивная каменная соль, в единичном образце в ней присутствуют субпараллельные сильно будинированные прослойки полигалитового материала мощностью до первых миллиметров. В н.о. соляных пород были выявлены ангидрит, целестин, магнезит, доломит, кальцит, джиджит, гидроборацит, ссайбелиит, люнебургит(?), кварц, калиборит, алабандин и пирит. Три последних обнаружены лишь в единичных пробах или имеют незначительные (около 1 мкм) размеры. Кроме указанных минералов в н.о. присутствуют фрагменты ангидритовых пород, мергеля, известняков, красящего вещества, галопелитового материала и т.д. При изучении сколов пород были выявлены полигалит и кизерит.

Ангидрит является преобладающим минералом н.о. всех типов соляных пород. Чаще всего присутствует в виде белых непрозрачных зернистых агрегатов неправильной формы размером до 1,5 мм (размер индивида 100–200 мкм). Агрегаты имеют пористую структуру, что указывает на совместный рост с растворимыми минералами (галит). В таких агрегатах часто отмечаются ксеноморфные или субидиоморфные кристаллы целестина аналогичного размера. Реже ангидрит фиксируется в виде отдельных бесцветных прозрачных длинно- или короткопризматических пойкилокри-

сталлов размером до 1 мм, включения в которых представлены ангидритовыми кристаллами, аналогичные таковым в агрегатах, то есть отдельные кристаллы являются относительно поздней генерацией. Кроме того, в н.о. фиксируются фрагменты ангидритовых пород с мозаичной структурой.

Целестин также выявлен во всех типах соляных пород в виде относительно изометричных пойкилокристаллов размером около 0,5 мм с разной степенью «пойкилитовости» и идиоморфизма – от идиоморфных пинакоидальных до кавернозных ксеноморфных кристаллов. Включения также представлены главным образом мелким ангидритом. В качестве примеси в целестине отмечается барий (до 0,65 мас. %). Для сравнения в Челкарском и Верхнекамском целестинах это значение значительно выше до 8,5 мас. % и 20,3 мас. % соответственно.

Полигалит и кизерит были зафиксированы в сколах каменной соли и сильвинита. Полигалит выполняет субпараллельные будинированные прослойки невыдержанной мощности и выделяется в растворимой хлоридной матрице в виде агрегатов с радиально-лучистым строением диаметром до 0,5 мм или отдельных уплощенных длиннопризматических кристаллов (0,3 мм). Кизерит зафиксирован в виде единичного длиннопризматического кристалла (40 мкм) в полости в галите совместно с полигалитом, что может указывать на его вероятное постдиагенетическое (апополигалитовое) происхождение.

Магнезит встречается преимущественно в сильвиновых и карналлитовых породах в виде мелкозернистых агрегатов размером до 0,5 мм, сложенных пинакоидальными кристаллами размером около 20 мкм. Реже он формирует отдельные хорошо образованные пинакоидальные кристаллы размером до 0,2 мм. Отмечается в качестве включений в ангидрите.

Доломит встречается во всех типах пород, но не во всех образцах и образует агрегаты размером 0,5–1 мм, сложенные пинакоидальными или изометричными комбинационными кристаллами размером около 10 мкм. Большинство данных агрегатов, вероятно, являются фрагментами доломитовых пород. Однако в единичных случаях отмечаются блочные кристаллы доломита, представляющие собой агрегат параллельно расположенных пинакоидальных пластинчатых индивидов. Как правило, последние выявлены в качестве включений во фрагментах ангидритовых пород с мозаичной структурой.

Кальцит образует светло-коричневые полупрозрачные сростки (фрагменты корочек) 0,3–0,4 мм, состоящие из ромбодрических индивидов размером около 50 мкм. Также новообразованный кальцит был выявлен в качестве включений размером 10–15 мкм на поверхности калиборита и алабандина.

Химический состав изученных карбонатных минералов отличается отсутствием каких-либо примесей, тогда как в магнезите Челкара нередко присутствует примесь железа (до 3,38 мас. %). Карбонатные же минералы Верхнекамья демонстрируют значительные содержания изоморфных железа и марганца (до 15,8 и 10,3 мас. % соответственно (без учета CO<sub>2</sub>)).

Джинорит обнаружен в карналлитовых породах с включениями гигантских шпатовых кристаллов галита (один образец входит в выборку «перекристаллизованная каменная соль», поскольку представляет собой крупный кристалл галита с включениями карналлита). Минерал встречается в виде отдельных бесцветных прозрачных длиннопризматических кристаллов, реже – таблитчатых. В большинстве изученных зерен присутствует изоморфная примесь стронция, кроме того, наблюдаются зоны неправильной формы, по химическому составу отвечающие стронциоджинориту. Пересчет данных микронзондового анализа в разных зонах позволил выявить следующий изоморфный ряд: Ca<sub>1.96</sub>Sr<sub>0.04</sub>[B<sub>14</sub>O<sub>20</sub>(OH)<sub>6</sub>]·5H<sub>2</sub>O (джи-

норит) –  $\text{Ca}_{1.17}\text{Sr}_{0.83}[\text{B}_{14}\text{O}_{20}(\text{OH})_6] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (стронциоджинорит). Сравнение исследованного минерала с таковым Челкарского месторождения показало идентичность челкарского бората и стронциевых зон в гремячинском джинорите.

Гидроборатит образует бесцветные прозрачные длиннопризматические (щепковидные) кристаллы размером до 1,5 мм по длинной оси с совершенной спайностью в одном направлении. Нередко в качестве включений диагностируются белые непрозрачные леписферы ссайбелиита размером до 0,2 мм.

Агрегаты ссайбелиита белые непрозрачные с перламутровым блеском состоят из отдельных леписфер диаметром 10–50 мкм, сложенных тонкими пластиночками минерала. В трех образцах из карналлититов встречены хорошо сформированные похожие на ромбоэдр бесцветные полупрозрачные кристаллы размером 0,4–0,8 мм с единичными включениями кристаллов ангидрита размером около 30 мкм. Ассоциация с другими боратами, а также соотношение магния и фосфора позволяет предварительно отнести минерал к люнебургиту ( $\text{Mg}_3[\text{B}_2(\text{OH})_6](\text{PO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Предполагается дальнейшее изучение данной фазы.

Кварц присутствует в виде бесцветных прозрачных коротко- и длиннопризматических пойкилокристаллов, реже псевдодипирамидальных (комбинация 2-х ромбоэдров при небольшой роли призмы) размером 0,2 мм\*0,4–0,6 мм. В качестве включений в кварце отмечаются редкие отдельные кристаллы ангидрита.

Калиборит. Два бесцветных прозрачных пинакоидальных кристалла обнаружены в карналлитовой породе. На поверхности зерен рассеяны многочисленные мелкие кристаллы кальцита. По морфологии и включениям гремячинский калиборит схож с челкарским.

Алабандин встречается в виде ксеноморфных кавернозных, реже идиоморфных (обычно меньших по размеру) зерен. Также алабандин был зафиксирован в качестве включения в агрегате ссайбелиита.

На основании полученных результатов можно выявить некоторые особенности минерального состава соляных пород Гремячинского месторождения и произвести сравнение с данными по Верхнекамскому и Челкарскому месторождениям.

1. Большинство выявленных в соляных породах Гремячинского месторождения минералов связано с седиментацией в эвапоритовом преимущественно хлоридном бассейне с второстепенной ролью сульфатного материала, о чем свидетельствует незначительное количество некальциевых сульфатов. Как известно наличие последних зависит от степени метаморфизации (обессульфачивания) рапы (Валяшко, 1962), для их формирования она должна быть низкой. Метаморфизация рапы, в свою очередь, зависит, в том числе от площади бассейна (чем больше площадь, тем меньшее влияние оказывают привнесенные в бассейн (хлоридно)-кальциевые растворы) и фациальной обстановки (центральная и краевые (бортовые) части бассейна). Приближенная оценка количества сульфатов (некальциевых) из пород трех месторождений позволяет выделить следующий ряд по степени метаморфизации рапы (от меньшей к большей): Челкарское (кизерит выступает как породообразующий минерал, образуя в разрезе мощные прослои кизеритовых пород)–Гремячинское (второстепенная роль полигалита (подчиненные прослои) и кизерита)–Верхнекамское (бессульфатное);

2. Недостаточно представительный объем проб не позволяет выявить общие закономерности распределения боратов по разрезу, однако можно говорить о приуроченности к карналлитовым породам, что отвечает их формированию на эвтонической стадии развития солеродного бассейна. Однако их присутствие в единичном образце каменной соли с будинированными полигалитовыми прослойками может указывать на ее (породы) вероятное образование при значительной роли

карналлитовой составляющей на седиментационной стадии развития. Выявленное разнообразие (Коротченкова, 2016<sup>1</sup>; 2016<sup>2</sup>) минеральных видов боратов (11 на Челкарском, 5 на Гремячинском и 1 на Верхнекамском) позволяет выделить ряд, отражающий перспективы этих месторождений в отношении возможности формирования значимых скоплений бора. Эта последовательность согласуется с количеством некальциевых сульфатов.

3. Наличие в соляных породах Гремячинского месторождения относительно крупных кристаллов сульфидного минерала алабандина, а также незначительных по размеру и количеству пирита и галенита может указывать на происходившие здесь процессы сульфатредукции, в Верхнекамском и Челкарском месторождениях преобладают пирит, в меньшей степени, халькопирит и сфалерит. Источником катионов для образования сульфидов при сульфатредукции могли служить алюмосиликаты (Чиркова, Чайковский, 2012), что позволяет говорить о геохимической специализации терригенного материала в солеродном бассейне.

Несмотря на то, что формирование соляных толщ трех месторождений происходило в одно геологическое время и из воды Пермского моря, минеральный облик соляных пород несколько отличается. На последний повлияли, в том числе степень сгущения и метаморфизации рапы и фациальные обстановки (наличие или отсутствие сульфатных некальциевых и борных минералов), геохимические особенности привнесенного терригенного материала (преобладание тех или иных сульфидных минералов) и др.

*Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ 18-05-00046.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валяшко М.Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. – М.: МГУ, 1962. – 397 с.
2. Коротченкова О.В. Минералогическая характеристика нерастворимого остатка солей из разреза Половодовского участка Верхнекамского месторождения // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 7-10.
3. Коротченкова О.В. Борные минералы Челкарского месторождения / О.В. Коротченкова, И.И. Чайковский // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2016. – Вып. 19. – С. 55-65.
4. Московский Г.А. Особенности состава и условий формирования калийных и калийно-магниевого пород погожской ритмопачки в северо-западной и северо-восточной частях бортовой зоны Прикаспия / Московский Г.А., Гончаренко О.П., Байгузина А.З. // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 188-192.
5. Чиркова Е.П. О роли сульфат-редукции в минералообразовании на Верхнекамском месторождении солей / Е.П. Чиркова, И.И. Чайковский // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2012. – Вып. 15. – С. 79-84.

Е.П. ЧИРКОВА  
Горный институт УрО РАН  
**МАРГАНЦЕВЫЙ И МЕДНЫЙ  
МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ РУБЕЖИ  
В РАЗРЕЗЕ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ СОЛИ  
ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

В 2013 г. была пройдена контрольно-стволовая скважина 704/1 для изысканий под строительство Половодовского рудника на ВКМКС. В результате изучения нерастворимого остатка проб из этой скважины в разрезе подстилающей каменной соли установлено два рубежа примечательной минерализации: первый (железо-медный) – в основании сильвинитовой зоны и кровле ПдКС на глубине ~307 м, второй (марганцевый) – на глубине ~330 м, что чуть ниже глубины залегания маркирующей глины (328,6).

В мелкой (менее 0,25 мм) фракции проб с глубины 307 м, т.е. на контакте подстилающей каменной соли и пласта КрIII, среди рудных компонентов преобладает халькопирит ( $\text{CuFeS}_2$ ), далее по частоте встречаемости наблюдаются пирит ( $\text{FeS}_2$ ), моносulfид железа ( $\text{FeS}$ ), сфалерит ( $\text{ZnS}$ ), галенит ( $\text{PbS}$ ), самородная бронза ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ).

Халькопирит формирует индивиды (редко – сростки) тетраэдрического габитуса со штриховкой (рис. 1). Моносulfид железа встречен в индивидах, реже – агрегатах, псевдотетраэдрического облика (рис. 2), а также в сростках с халькопиритом. Содержит устойчивые примеси никеля и меди. Бронза зафиксирована в виде единичных мелких скелетных кристаллов (рис. 3). Сфалерит, в отличие от вышеназванных сульфидов, основная масса которых находится в мелкой (менее 0,25 мм) фракции, где он характеризуется единичными зернами, наиболее представлен в крупной (до 1 мм) фракции. Формирует скелетно-реберные выделения, регенерированные существенно железисто-кадмистой разностью (рис. 4). Непрерывно встречается и выше по разрезу до кровли пласта Кр II (~300 м) В мелкой фракции встречен сфалерит в сростке с галенитом.

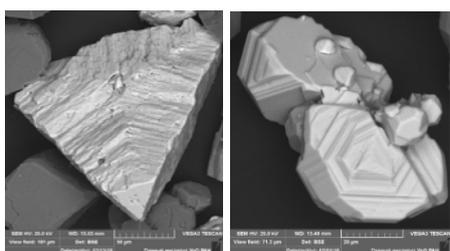


Рис. 1. Халькопирит

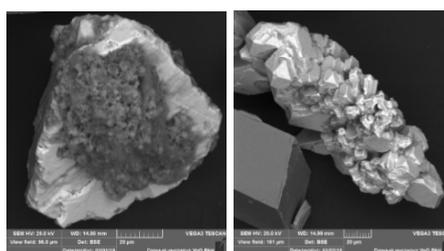


Рис.2. Моносulfид железа

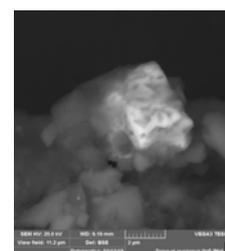


Рис.3. Бронза

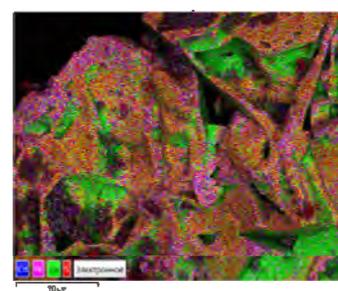
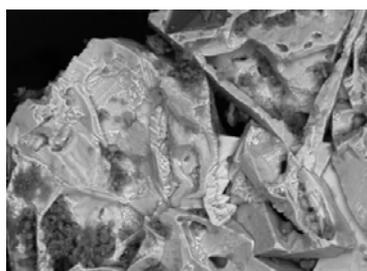
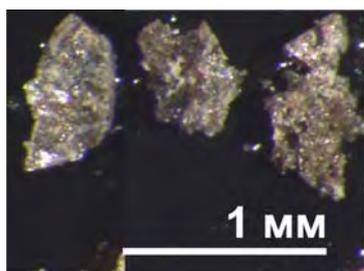


Рис. 4. Сфалерит и его Fe-Cd-оторочка

На треугольной диаграмме составы сфалерита занимают промежуточное положение между высокотемпературным (гидротермальным) железистым сфалеритом из зоны пирротинизации пласта АБ СКРУ-3 [1] и низкотемпературным (гипергенным) кадмистым сфалеритом из СМТ, вскрытой этой же скважиной [2] (рис. 5). Подтверждением развития медной минерализации служит присутствие «высолов» новообразованных ковеллина ( $\text{CuS}$ ) и атакамита ( $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ ). Примечательно, что целестин здесь в основном находится в фрагментах сферолитов, в отличие от остального разреза ПдКС, где он формирует отдельные кристаллы.

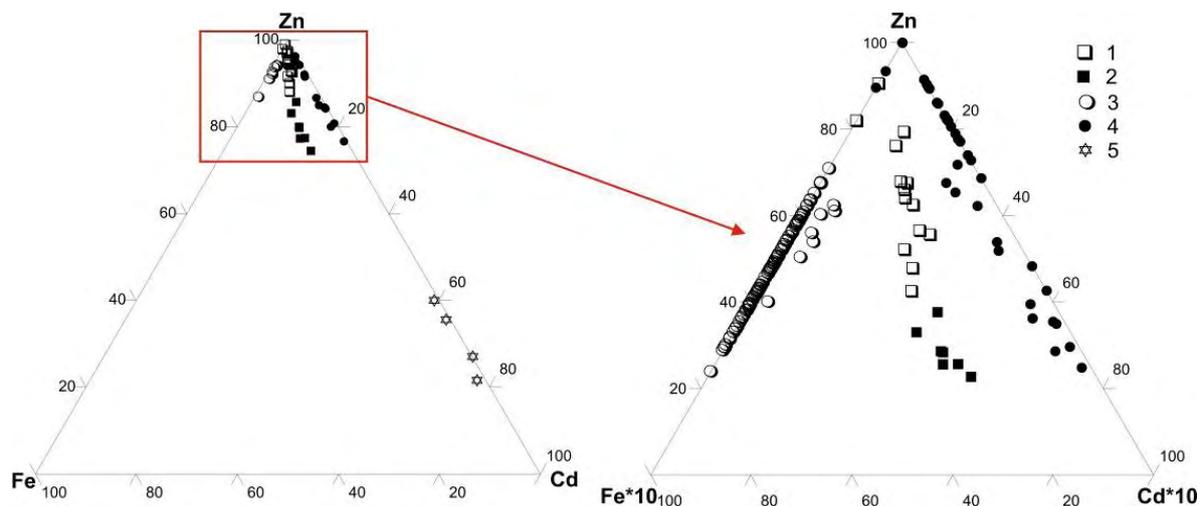


Рис. 5. Положение составов сфалерита на треугольной диаграмме: 1 – 1-ая генерация сфалерита из красного сильвинита скв. 704/1; 2 – 2-ая генерация сильвинита из красного сильвинита скв. 704/1; 3 – сфалерит из зоны пирротинизации АБ; 4 – сфалерит из СМТ скв. 704/1; 5 – хоулит из СМТ скв. 704/1

Выявленная парагенетическая ассоциация, представленная преимущественно моносulfидами, предполагает дефицит серы, восстановленной в процессе сульфат-редукции [3]. Это объясняется дефицитом или наличного количества сульфата или органического вещества, разлагаемого сульфатредуцирующими бактериями. В нашем случае – это, скорее, недостаток органики, нежели дефицит исходного сульфата, который отрицается хотя бы присутствием высолов глауберита ( $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ ). Кроме того недостаток серы может быть обусловлен прохождением сульфат-редукции в более глубоководных условиях [4]. В этом случае значительное количество сероводорода удаляется в атмосферу и уже не может участвовать в диагенетической трансформации моносulfидов ( $\text{FeS}$  и  $\text{CuFeS}_2$ ) в дисульфиды ( $\text{FeS}_2$ ).

В нерастворимом остатке ПдКС под МГ с глубины ~330 м выявлены оранжево-золотистые корочки и волокнистого строения (рис. 6). Состав их может быть пересчитан на палыгорскит  $(\text{Mg},\text{Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Совместно с ними находят кристаллы алабандина  $\text{MnS}$  и Mn-содержащий пирит. Последний встречается и самостоятельно, но также характеризуется игольчато-пластинчатым обликом, в отличие от изометричных кристаллов пирита, которые марганец не содержат. Присутствие в ПдКС микропримеси сульфида марганца и меди отмечал и А.Ф. Сметанников [5].

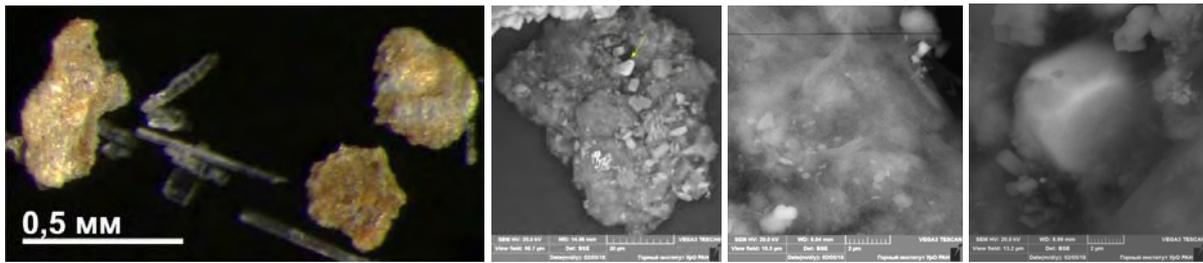


Рис. 6. Волокнистые агрегаты палыгорскита и кристаллы алабандина в них

Накопление марганца в морской воде осуществляется в так называемой редокс-зоне, в которой происходит смена кислородных условий на сероводородные. Этому накоплению, наряду с растворенной и взвешенной формами, может способствовать марганец, связанный с органическим веществом. А вклад органического вещества в биохимические преобразования в редокс-зоне увеличивается летом [6]. Принимая также во внимание, что алабандин находится вместе с палыгорскитом, а последний считается надежным индикатором аридных и экстрааридных условий [7], можно предположить, что данный парагенезис минералов является палеоклиматическим индикатором.

В пользу климатических перемен свидетельствует и не характерная для подстилающей соли магнизиальность минерального состава. Кроме магнизиального палыгорскита, в пробе отмечены агрегаты магнезита двух типов: футляровидного (рис. 7) и более железистого ромбоэдрического (рис. 8). Совместно с магнезитом часто находится анатаз (рис. 9). Эта связь объясняется тем, что магний является допированным элементом для кристаллизации и устойчивости анатаза, который при меньших содержаниях магния, скорее всего, совершил бы фазовый переход в рутил [8], более присущий отложениям подстилающей каменной соли.

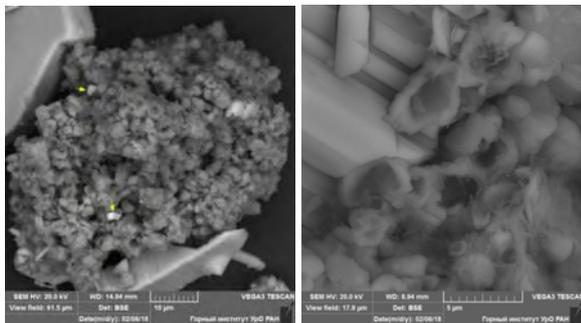


Рис. 7. Футляровидный магнезит

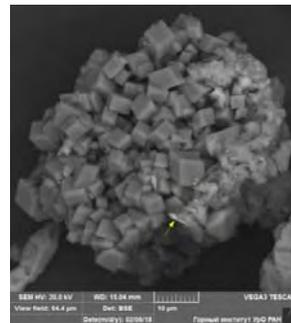


Рис. 8. Ромбоэдрический магнезит

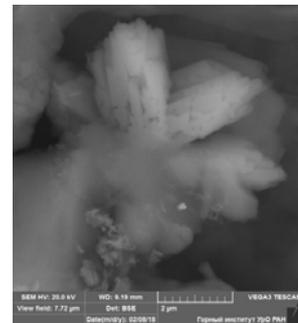


Рис. 9. Анатаз

Таким образом, зафиксированная магний-марганцевая минерализация может связываться со сменой хлоридной специализации рассола в бассейне осадконакопления на сульфатную. В литологическом отношении продуктом этой смены мог являться сильвинит, локальное присутствие которого под маркирующей глиной Верхнекамского месторождения именуется как пласт КрIV. Подобные исследования помогают выявить изменения состава рассолов на уровне малых элементов и детализировать обстановки осадконакопления в Соликамском палеобассейне.

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-05-00046.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чайковский И.И. Минералогия зоны сульфидизации в солях Верхнекамского месторождения / И.И. Чайковский, Е.П. Чиркова, Е.О. Корочкина // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2012. – Вып. 15. – С. 85-90.
2. Коротченкова О.В. Типоморфизм сфалерита Верхнекамского месторождения // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 13-15.
3. Чиркова Е.П., Чайковский И.И. О роли сульфат-редукции в минералообразовании на Верхнекамском месторождении солей // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. статей / Перм. ун-т. Пермь, 2012. Вып. 15. С. 79–84.
4. Сонненфелд П. Рассолы и эвапориты: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 480 с.
5. Сметанников А.Ф. Некоторые особенности минерального состава соляных пород и продуктов их переработки (на примере Верхнекамского месторождения солей) / А.Ф. Сметанников, В.Н. Филиппов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: сб. науч. ст. / ПГУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2010. – С. 99-113. – (Науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского; Вып. 13).
6. Пахомова С.В. Растворенные формы железа и марганца в морской воде, осадках и на границе вода-дно: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.28 / Пахомова Светлана Владимировна. – М., 2005. – 205 с.
7. Юдович Я.Э. Минеральные индикаторы литогенеза / Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис; Ин-т геологии Коми НЦ. – Сыктывкар: Геопринт, 2008. – 562 с.: ил.
8. Hanaor D.A.H. Review of the anatase to rutile phase transformation / Hanaor D.A.H., Sorrell C.C. // Journal of Materials Science. – 2011. –V. 46, № 4. – P. 855-874.

УДК 553.4+549

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.4

А.А. ГОРБУНОВ, А.Ю. ПУЗИК  
*Горный институт УрО РАН*  
**СУЛЬФИДЫ ПЛАТИНОВЫХ МЕТАЛЛОВ  
САРАНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Сарановское месторождение – главнейший источник хромовых руд в России. Оно локализовано в пределах докембрийской расслоенной гипербазит-базитовой интрузии. В настоящее время все ультрамафиты серпентинизированы.

Минералого-геохимические исследования Ю.А. Волченко с соавторами [1] позволили оценить средние содержания металлов платиновой группы (МПГ) в западном (ЗРТ), центральном (ЦРТ) и восточном (ВРТ) рудных телах (мг/т, соответственно): Os – 108, 110, 88; Ir – 140, 117, 50; Ru – 100, 110, 82; Rh – 8, 22, 10; Pt – 50, 70, 40; Pd – 6, 3, 10. Ими установлено наличие во всех рудных телах минералов платиновых металлов (МПП) рядов лаурит  $RuS_2$  – эрликманит  $OsS_2$  в виде идиоморфных зерен размером 5-50 мкм, а также брэггит  $(Pt,Ni)S$  – высокоцит  $(Pd,Ni)S$  в виде тонких включений (1-10 мкм) в хромшпинелидах ЦРТ. На основании повышенного содержания Os-Ru сульфидов в краевых, наиболее измененных частях рудных тел, локализации в катаклазированных зернах хромшпинелида и в хлоритовом цементе, а также ассоциации с миллеритом, кобальтовым пиритом и хроммагнетитом, образование МПП они связывают с высвобождением МПГ при метаморфизме хромититов. В целом, суммарное содержание МПГ в локальных участ-

ках может достигать 1-2 г/т, тогда как среднее содержание в хромититах ЗРТ составляет 0,4 г/т, ЦРТ – 0,5 г/т, ВРТ – 0,3 г/т, рудовмещающих серпентинитах – менее 0,1 г/т [1]. Ими отмечена тенденция к увеличению содержания Os, Rh и Pd вверх по разрезу (с запада на восток). Несмотря на установленный ими комплексный характер руд, в отношении извлечения благородных металлов был дан отрицательный прогноз в связи с отсутствием приемлемой технологии извлечения МПГ и целевой направленности хромовых руд (производство огнеупоров).

Нормирование содержания МПГ к таковому в хондрите С1 [19] позволило показать, что Сарановское месторождение отличается от типичных расслоенных интрузий и более похоже на альпинотипные комплексы (рис. 1), для которых характерно преобладание тугоплавких (Os, Ir, Ru, Rh) платиноидов над легкоплавкими (Pt, Pd).

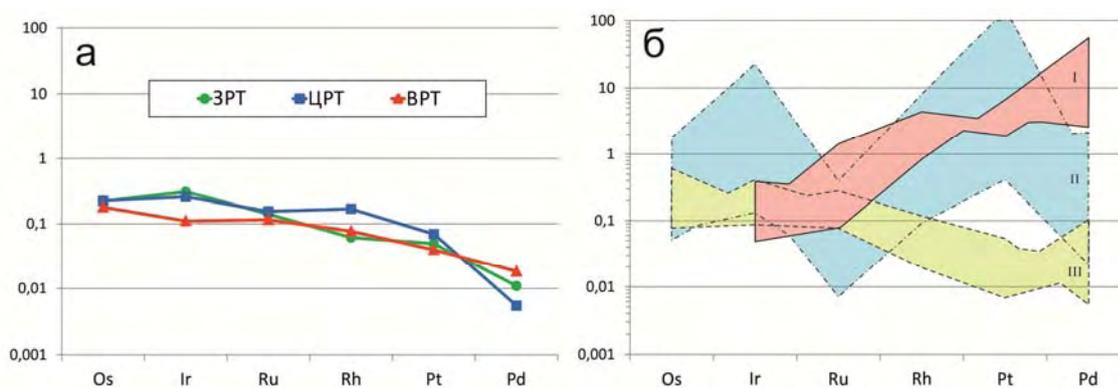


Рис. 1. Распределение содержаний ЭПГ, нормированных к хондриту С1: а – хромититы западного (ЗРТ), центрального (ЦРТ) и восточного (ВРТ) рудных тел Сарановского месторождения, по [1]; б – гипербазиты различного генезиса: I – расслоенные, по [4, 9]; II – концентрически-зональные, по [2, 4, 12]; III – альпинотипные, по [3, 4, 5]

О.К. Иванов с соавторами [8] подтвердили преобладание лаурита (10-20 мкм) среди МПМ в гипербазитовой части месторождения, где он локализован в крупных зернах хромшпинелида и, реже, хлоритовом цементе. Ими отмечены единичные находки эрликманита и иридосмина (до 10-12 мкм), позднее отнесенного к высокоиридистой разновидности самородного осмия [6]. Образование эрликманит-лауритовой минерализации они связывают с пегматоидной перекристаллизацией первичных зерен хромшпинелида. Кроме того ими отмечено, что содержание Os и Ir в лаурите уменьшается вверх по разрезу, что согласуется с выявленной ими ранее магматической расслоенностью.

Ранее нами [15] установлено присутствие тонких (1-2 мкм) включений лаурита и эрликманита в тальк-кальцитовом цементе жильного хромитита.

Для выявления принципиальной возможности извлечения МПГ и увеличения комплексности руд, нами изучалась форма нахождения и локализация МПМ в хвостах обогащения. Поскольку для МПМ характерен мелкий размер зерен (до 50 мкм), были отобраны хвосты обогащения крупностью менее 4 мм преимущественно хромшпинелид-серпентинового состава. На винтовом шлюзе обогащалась фракция < 2 мм до получения существенного хромшпинелидового концентрата (95-100%). Из него отсеивались классы 0,5-0,125 мм и < 0,125 мм, которые были обогащены в бромформе и изучены на электронном микроскопе (аналитик Е.П. Чиркова). Фракция 0,5-0,125 мм заливалась эпоксидной смолой в «шайбу», которая была дважды сошлифована на разную глубину зерен, а класс < 0,125 мм наносился в виде тонкого слоя непосредственно на столик электронного микроскопа, покрытый углеродистым скотчем. Исследование этих препаратов показало наличие платиноидов только во фракции < 0,125 мм.

Встреченные МПМ (рис. 2) представлены лауритом (8 зерен) и эрликманитом (1 зерно). Их средний состав может быть выражен следующими формулами:  $(\text{Ru}_{0.53-0.58}\text{Os}_{0.09-0.31}\text{Ir}_{0.04-0.17})\text{S}_{1.96-2.0}$  и  $(\text{Os}_{0.64}\text{Ir}_{0.28-0.29}\text{Ru}_{0.08})\text{S}_{1.99-2.01}$  соответственно (табл.). На двух зернах лаурита зафиксированы фрагменты пленок ирарситового состава (IrAsS). Все находки представлены изолированными зернами, а в качестве включений в зернах хромшпинелида не встречены.

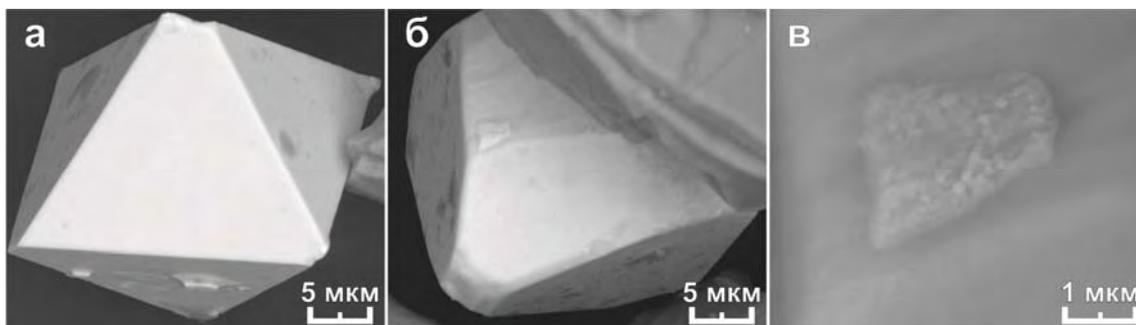


Рис. 2. Морфология кристаллов лаурита (а, б) и фрагмента пленки ирарсита (в)

Таблица

Состав минералов платиновых металлов, масс. %\*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	3,51	7,48	5,35	2,94	1,52	6,63	6,74	5,25	5,81	7,34	0,46
i	,00	,18	,22	,00	,00	,43	,00	,00	,00	,00	,41
s	,00	,00	,23	,00	,24	,00	,00	,00	,00	,94	,70
u	0,59	4,06	2,94	2,27	6,30	6,07	7,74	5,59	,22	0,38	2,40
s	1,79	1,14	6,36	8,45	7,73	0,45	,38	4,99	9,07	3,58	0,77
r	4,10	,13	,89	,33	4,21	,41	,15	,17	1,89	9,76	7,27
	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00	00,00

\* средние составы по 2 анализам: 1-8 – лаурит, 9 – эрликманит, 10 и 11 – ирарситовая пленка на зернах лаурита № 1 и № 3 соответственно

Использование диаграммы Os-Ir-Ru показывает, что анализы сульфидов МПГ, полученные О.К. Ивановым, обогащаются Ru вверх по разрезу (рис. 3, а), а у Ю.А. Волченко такой закономерности не просматривается (рис. 3, б). Совместное нахождение лаурита и эрликманита в пределах единых тел, отмеченное как Ю.А. Волченко, так и нами, не дает основания считать МПМ продуктами дифференциации по разрезу, а скорее результатом разделения Os (и Ir) с Ru по разным минералам, что может быть связано с различием кристаллохимических радиусов (нм): 0,135; 0,136; 0,133 соответственно. Нанесение на одну диаграмму всех анализов (рис. 3, в) позволяет говорить о том, что для лауритов в целом отмечается рост содержания Os и Ir от западного рудного тела к центральному, а затем его уменьшение по направлению к восточному.

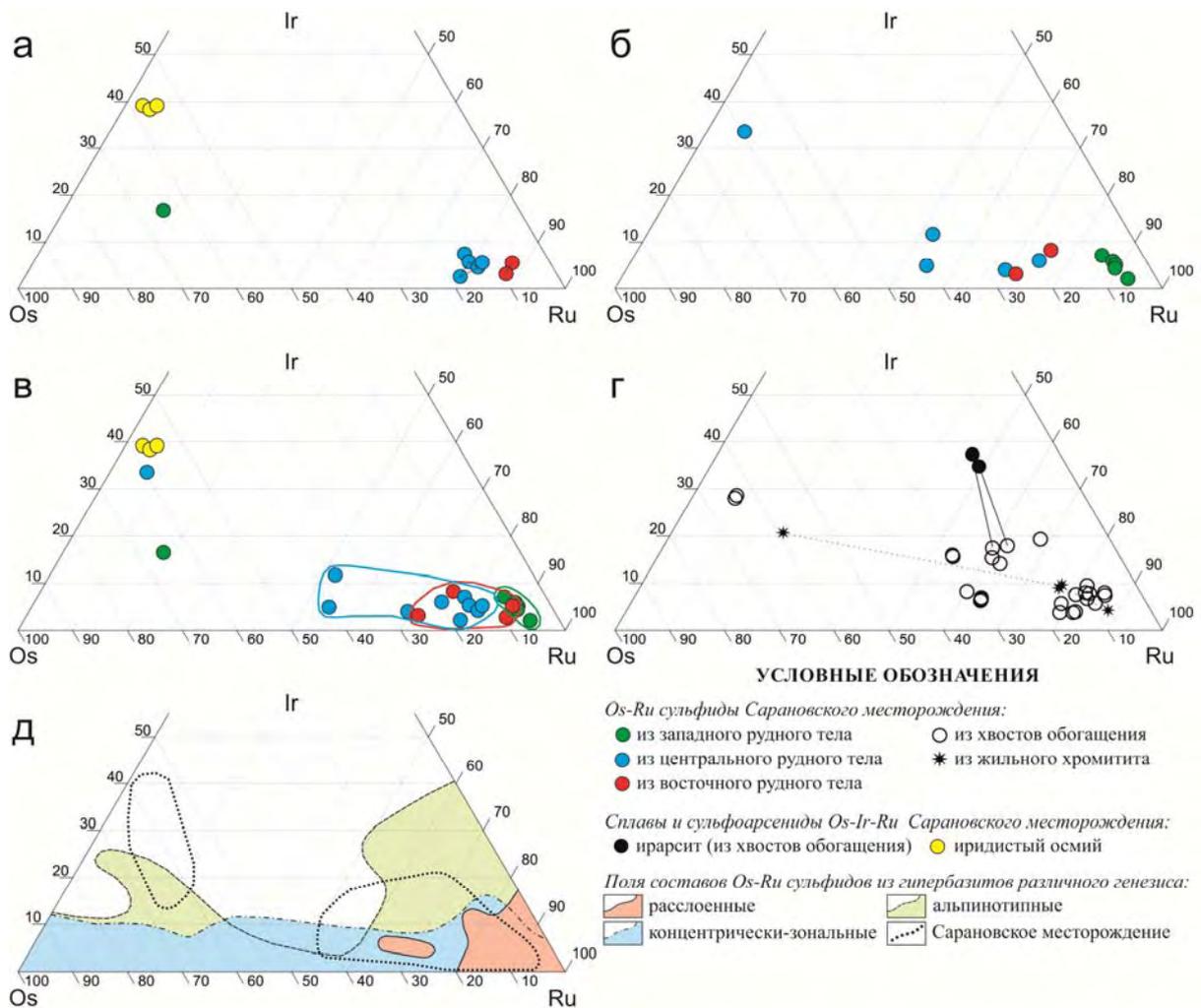


Рис. 3. Диаграмма Os-Ir-Ru для сульфидов: а – по О.К. Иванову [8]; б – по Ю.А. Волченко [1]; в – контуры составов для ЗРТ, ЦРТ и ВРТ, по [8] и [1]; г – данные настоящей работы и по [15]; д – гипербазиты различного генезиса, по [10, 13, 14, 16, 17, 18, 20, 21, 23, 24] и Сарановское месторождение, по [8, 1] и данным автора

А.Ю. Барковым с соавторами [16] в расслоенном комплексе Пеникат (Финляндия) зафиксированы зональные кристаллы лаурита, ядро которых обогащено Os, а кайма – Ru. Ирарсит отмечен на этих зернах в виде каемок. Подобные взаимоотношения они объясняют различной фугитивностью серы и мышьяка. В. О’Driscoll с соавторами [22] на поверхности МПМ отметили наличие вторичных пленок ирарсита и связали их образование с поздними низкотемпературными процессами (метаморфизм, серпентинизация). Описанные взаимоотношения позволяют нам предполагать следующее. Выявленный О.К. Ивановым иридийский осмий ( $Os_{0,48-0,54}Ir_{0,34-0,36}Ru_{0,03-0,05}$ ), по-видимому, образовывался первым, что может быть связано с наибольшей активностью водорода [11] в начале процесса серпентинизации. Затем кристаллизовались эрликманиты и обогащенные Os и Ir лауриты. Значительное содержание Ir (рис. 3, г) может объясняться более высокой температурой, при которой изоморфизм проходит легче. Снижение температуры среды приводит к последующей кристаллизации более высокорутениевого лаурита, а Ir накапливается во флюиде и образует собственные фазы в виде ирарсита только лишь при уменьшении содержания S и увеличении концентрации As.

Обогащенность тугоплавкими платиноидами и наличие сульфидов Os и Ir отличает Сарановское месторождение от других расслоенных комплексов и обнаруживает его сопоставимость с альпинотипными массивами (рис. 3, д). Ранее специфика интрузии была показана на примере повышенной хромистости и магнезиальности реконструированного состава исходного расплава [15].

Генеральная последовательность формирования МПМ, вероятно, имеет следующий вид: самородный осмий → эрликманит → лаурит → ирарсит, что может отражать эволюцию активности элементов (H, S, As,) в процессе серпентинизации.

Выявленная симметричная зональность в распределении лауритов по разрезу (высокорутениевые в западном и восточном, высокоосмиевые в центральном рудном теле) не согласуется с магматической дифференциацией. Вероятно, это обусловлено спецификой и полигенностью процессов серпентинизации, которая связывается О.К. Ивановым [7] как с автотермоморфическими процессами (лизардитизация), так и термальным влиянием внедрившихся даек габбродолеритов (антигортитизация).

Автор благодарен Е.П. Чирковой за проведение электронно-микроскопических исследований, а также И.И. Чайковскому за помощь в обсуждении настоящей работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волченко Ю.А. Избранные труды Т. 1. Платина Урала. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – С. 322-376.
2. Структурно-вещественная эволюция комплексов Платиноносного пояса Урала при формировании хромит-платиновых месторождений уральского типа. Часть II / Волченко Ю.А., Иванов К.С., Коротеев В.А., Оже Т. // Литосфера. – 2007. – № 4. – С. 73-101.
3. Платиноиды хромитоносных массивов Полярного Урала / Гурская Л.И. [и др.]. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. – 305 с.: ил.
4. Додин Д.А. Платинометалльные месторождения мира. Т. 2. Платиносодержащие хромитовые и титаномагнетитовые месторождения / Додин Д.А., Ланда Э.А., Лазаренков В.Г. – М.: ООО «Геоинформ-центр», 2003. – 409 с.
5. Платинометалльное оруденение в геологических комплексах Урала / К.К. Золоев, Ю.А. Волченко, В.А. Коротеев, И.А. Малахов, А.Н. Мардиросьян, В.Н. Хрыпов. – Екатеринбург, 2001. – 199 с.
6. Иванов О.К. Минералогия Сарановского хромитового месторождения, (Средний Урал) // Минералогический Альманах. – 2016. – Т. 21, Вып. 2. – 128 с.
7. Иванов О.К. Минеральные ассоциации Сарановского хромитового месторождения. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1997. – 123 с.: ил.
8. Иванов О.К. Вариации состава лауритов из хромититовых пластов Сарановской расслоенной интрузии / Иванов О.К., Аникина Е.В., Молошаг В.П. // Докл. Акад. наук. – 1996. – Т. 351, № 2. – С. 231-234.
9. Лазаренков В.Г. Месторождения платиновых металлов / В.Г. Лазаренков, С.В. Петров, И.В. Таловина. – М.: Недра, 2002. – 298 с.
10. Сравнительный петрографо-минералогический анализ платиноносных массивов юго-востока Алданского щита, острова Феклистова и Сихотэ-Алиня / Некрасов И.Я. и др. // Платина России. – М.: Геоинформмарк, 2004. – С. 165-174. 1994
11. Новгородова М.И. Самородные металлы в гидротермальных рудах. – М.: Наука, 1983. – 287 с.: ил.

12. Пилюгин А.Г. Геохимия и платиноносность хромититов Нижнетагильского и Светоборского массивов, Средний Урал: дис. ... к.г.-м.н.: 25.00.09 / Пилюгин Андрей Геннадьевич. – СПб, 2014. – 139 с.
13. Хромшпинелиды и акцессорная минерализация в хромититах и ультрамафитах Нуралинского массива (Южный Урал) / Савельев Д.Е., Зайков В.В., Котляров В.А., Зайкова Е.В., Крайнев Ю.Д. // Записки Рос. минералог. о-ва. – 2017. – № 1. – С. 59-84.
14. Толстых Н.Д. Коренная платина Светоборского и Каменушинского массивов платиноносного пояса Урала / Н.Д. Толстых, Ю.М. Телегин, А.П. Козлов // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 6. – С. 775-793.
15. Чайковский И.И. Петрология и минералогия даек Сарановского комплекса / И.И. Чайковский, А.А. Горбунов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2018. – Вып. 21. – С. 145-152.
16. Zoned sulfides and sulfarsenides of the platinum-group elements from the Penikat layered complex, Finland / Barkov A.Y., Fleet M.E., Martin R.F., Alapieti T.T. // Canadian Mineralogist. – 2004. – Vol. 42. – P. 515-537.
17. Compounds of Ru-Se-S, alloys of Os-Ir, framboidal Ru nanophases, and laurite-clinocllore intergrowths in the Pados-Tundra complex, Kola Peninsula, Russia / Barkov A.Y., Nikiforov A.A., Tolstykh N.D., Shvedov G.L., Korolyuk V.N. // European Journal of Mineralogy. – 2017. – V. 29, № 4. – P. 613-621.
18. Laurite and ruarsite from podiform chromitites at Kraubath and Hochgrössen, Austria: New insights from osmium isotopes / Malitch K.N., Junk S.A., Thalhammer O.A.R., Melcher F., Knauf V.V., Pernicka E., Stumpfl E.F. // Canadian Mineralogist. – 2003. – V. 41, – P. 331-352. – DOI: 10.2113/gscanmin.41.2.331
19. McDonough W.F. The composition of the Earth / McDonough W.F., Sun S.S. // Chemical Geology. – 1995. – V. 120, № 3-4. – P. 223-253.
20. Neradovsky Yu.N. PGM in chromite ore of the Sopcheozero deposit, Kola Peninsula / Neradovsky Yu.N., Savchenko E.E. // Geology of Ore Deposits. – 2008. – V. 50, № 8. – P. 746-748. – DOI: 10.1134/S1075701508080102.
21. Nilsson L.P. Platinum-group mineral inclusions in chromitite from the Osthhammeren ultramafic tectonite body, South Central Norway // Mineralogy and Petrology. – 1990. – V. 42, № 1-4. – P. 249-263. – DOI: 10.1007/BF01162694.
22. O'Driscoll B. Petrogenesis of the platinum-group minerals / O'Driscoll B., Gonzalez-Jimenez J.M. // Highly Siderophile and Strongly Chalcophile elements in High-Temperature Geochemistry and Cosmochemistry. Сер. книг: Reviews in Mineralogy & Geochemistry. – 2016. – V. 81. – P. 489-578.
23. Talkington R.W. Platinum-group minerals in Chromite Seams of the Stillwater Complex, Montana / Talkington R.W., Lipin B.R. // Economic Geology. – 1986. – V. 81, № 5. – P. 1179-1186.
24. Zaccarini F. Platinum-group minerals in chromitite xenoliths from the Onverwacht and Tweefonten ultramafic pipes, Eastern Bushveld Complex, South Africa / Zaccarini F., Garuti G., Cawthorn Grant R.G. // The Canadian Mineralogist. – 2002. – V. 40, № 2. – P. 481-497.

Т.В. ФАДЕЕВА  
Горный институт УрО РАН  
**О НАХОДКАХ КОККОЛИТОВ В СОЛЯХ  
ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Кокколиты различной сохранности были обнаружены в двух пробах из отложений верхних слоев подстилающей каменной соли и покровной каменной соли (Кунгурский ярус, Пермский период) Верхнекамского месторождения. Среди остатков определены четыре вида кокколитофорид - *Watznaueria barnesiae*, *Kamptnerius magnificus*, *Prediscosphaera ponticula* и *Loxolithus armilla*. Ранее кокколиты первых трех видов, а также *Gartnerago obliquum* и *Helicolithus trabeculatus* были определены в пробах из отложений, расположенных ниже 3 калийного горизонта Старобинского месторождения (Фаменский ярус, Девонский период). Таким образом, на данный момент мы имеем факты, что в палеозойских отложениях двух солевых месторождений обнаружены остатки одноклеточных водорослей по общераспространенному мнению считающимися биомаркерами мезозойских отложений. Все вышеперечисленные виды характерны для второй половины мелового периода, для *Watznaueria barnesiae* зафиксированы более широкие временные пределы существования – с конца верхней юры ([www.mikrotax.org](http://www.mikrotax.org)).

И.А. Шамрай с соавторами (1967) выразил мнение, «... что мощные толщи древних, так называемых криптогенных известняков нижнего палеозоя и допалеозоя формировались за счет массового накопления кокколитофорид». Авторы предположили возможную причину отсутствия находок этих организмов в палеозойских отложениях их неустойчивостью и способностью легко перекристаллизовываться даже под воздействием незначительных эпигенетических и метаморфических процессов. К настоящему времени опубликован ряд статей, в которых приведены фактические данные о находках объектов, предварительно отнесенных к кокколитам, в палеозойских отложениях. Аномальные палеозойские объекты, подобные кокколитам, обнаружены в Пенсильванских сланцах на реке Миссури (Gartner, Gentile, 1972). В этой же статье приведен подробный обзор опубликованных данных по находкам палеозойских кокколитов. Впервые о таком факте сообщил еще в 1870 году W.C. Gümbel. Следующим автором, кто сообщил о кокколитах палеозойского возраста был D. Noël (1961, 1965), включив в свои работы рисунки и электронные фотографии образцов из девонских отложений Марокко, карбона Алжира и Пенсильвании. Пенсильванские кокколиты были идентифицированы как *Ellipsagelosphaera frequens*, этот вид является обычным для юрских отложений. В 1970 году G. Deflandre описал и назвал кокколиты из силура-девона Северной Америки, так же, как и проблематичные формы, включая гелиолитидные тела из карбоновых отложений. A. Munneske с соавторами опубликовали несколько работ (1999, 2000, 2001, 2008) о находках известкового наннопланктона в силурийских отложениях острова Готланд в Швеции. Исследователи пришли к выводу, что известковый планктон вероятнее всего существовал уже в палеозое, но сохранность таких объектов возможно только при исключительных условиях.

Однако, все эти факты по мнению других исследователей (Mutterlose et al., 2005), не являются общепринятыми и считается, что эволюция известковых нанофоссилий началась в конце триаса.

Как известно, отложения мезозоя сосредоточены северо-западнее Верхнекамского месторождения. Ближайшие местонахождения, в которых установлены комплексы верхнеюрских кокколитофорид Лойно, Кировская область (Устинова, Тесакова,

2017; Ustinova, 2017) и Айюва, Республика Коми (Устинова, Лавренко, 2011). В составе этих комплексов отсутствуют виды, которые зафиксированы в соляных отложениях, кроме *Watznaueria barnesiae*.

Теоретически выявленные комплексы кокколитофорид из отложений Старобинского и Верхнекамского месторождений указывают на верхнемеловую контаминацию. Это предположение основано, прежде всего, на общепринятых данных о хронологических границах выявленных в обоих месторождениях видов кокколитофорид, частичной общности видового состава, относительно хорошей сохранности. Существуют данные о находках в пестроцветной толще в зоне Южнодуринского горизонтального сдвига (скважина 663, глубина 371 м) микрофауны среднеюрского возраста, выше (160-90 м) обнаружен споро-пыльцевой комплекс позднего мела (Петротектонические основы ..., 2000). Для доказательства или опровержения факта мезозойской контаминации пермских и девонских отложений соляных месторождений требуются дополнительные исследования.

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-05-00046.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с.
2. Устинова М.А. Известковый наннопланктон средневожских отложений р. Айюва (Тиманская область) / Устинова М.А., Лавренко Н.С. // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии.: Четвертое Всерос. совещ. – СПб., 2011. – С. 235-236.
3. Устинова М.А. Новые данные о микробиоте средневожского подъяруса разреза Лойно, Кировская область / Устинова М.А., Тесакова Е.М. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2017. – Т. 25, № 3. – С. 61-72.
4. Шамрай И.А. Пороодообразующее и стратиграфическое значение кокколитофорид / Шамрай И.А., Лазарева Е.П., Челмокаева С.С. // Ископаемые водоросли СССР. – М., 1967. – С. 81-84.
5. Gartner S. Problematic Pennsylvanian coccoliths from Missouri / Gartner S., Gentile R. // *Micropalaeontology*. – 1972. – V. 18, № 4 – P. 401-404.
6. SEM-observation of calcareous micro- and nannofossils from the Silurian of Gotland, Sweden: preliminary results / Munnecke A., Samtleben C., Servais T., Vachard D. // *Geobios*. – 1999. – V. 32, № 2. – P. 307-314.
7. Munnecke A. A new family of calcareous microfossils from the Silurian of Gotland, Sweden / Munnecke A., Servais T., Vachard D. // *Palaeontology*. – 2000. – V. 43. – P. 1153–1172. Part 6. – DOI: 10.1111/1475-4983.00165.
8. Munnecke A. New findings and stratigraphical distribution of the Ovummuridae (Palaeozoic calcareous microfossils) / Munnecke A., Servais T., Vachard D. // *Comptes rendus de l'Academie des Sciences, Serie II Fascicule A-Sciences de la Terre et des Planetes*. – 2001. – V. 333, № 3. – P. 179-185.
9. Munnecke A. Palaeozoic calcareous plankton: evidence from the Silurian of Gotland / Munnecke A., Servais T. // *Lethaia*. – 2008. – V. 41, № 2. – P. 185-194.
10. Mutterlose J. Mesozoic calcareous nannofossils – state of the art / Mutterlose J., Bornemann A., Herrle J.O. // *Paläontologische Zeitschrift*. – 2005. – V. 79/1. – P. 113-133.
11. Ustinova M. A. New Data on the Distribution of Calcareous Nannofossils in the Upper Jurassic Loino Section (Kirov Region, Russia) // *Paleontological Journal*. – 2017. – V. 51, № 1. – P. 95-106.

С.А. МИРОШНИЧЕНКО  
*Горный институт УрО РАН*  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РАЗРАБОТКИ  
ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО БАЛАНСА  
ДЛЯ КРУПНОГО НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО  
ПРЕДПРИЯТИЯ**

В 2017 году была проведена работа, включающая в себя аудит действующего водохозяйственного баланса крупнейшего на Западном Урале нефтеперерабатывающего предприятия с выработкой предложений по научно обоснованным подходам к расчету объемов водопотребления и водоотведения. Под водохозяйственным балансом любого промышленного предприятия понимается соотношение объемов потребления воды из всех источников и объемов отводимых сточных вод в течение года. На расчет объема потребления воды и составление баланса водопотребления и водоотведения влияют такие факторы, как характеристики водопотребляющего оборудования, особенности технологических процессов на производстве, длительность и назначение потребления воды, количество сотрудников на предприятии и т.д. Источником формирования сводной таблицы баланса является инвентаризация основных объектов водоснабжения. В таблицу заносятся данные об объемах водопотребления при максимальной загрузке предприятия на основе технологического регламента оборудования. В результате балансовых расчетов для предприятия устанавливаются индивидуальные нормы водопотребления и водоотведения. Под нормой водопотребления понимается максимально допустимое количество воды требуемого качества на отпуск единицы продукции установленного качества в определенных организационно-технических условиях производства. И соответственно под нормой водоотведения - максимально допустимое количество отводимых сточных вод установленного качества, образующихся при производстве единицы продукции (работы).

Рассчитанные объемы водопотребления и водоотведения необходимы при разработке целого ряда нормативных документов, прежде всего это договор водопользования и решение на сброс сточных вод. При согласовании водохозяйственного баланса контролирующие организации уделяют особое внимание проверке расчетов и не допускают необоснованного завышения объемов, которое может привести к лимиту для других предприятий на данном участке. Занижение объемов приведет к сверхлимитному забору или сбросу и соответственно получению предприятием штрафных санкций. Водохозяйственный баланс представляется в составе документов Схемы системы водопотребления и водоотведения предприятия (Приказ Минприроды России №205 от 08 июля 2009г "Об утверждении Порядка ведения собственниками водных объектов и водопользователями учета объема забора (изъятия) водных ресурсов из водных объектов и объема сброса сточных вод и (или) дренажных вод, их качества»). Баланс разрабатывается с учетом потребностей производства на длительный период и пересматривается в случае изменения технологической схемы предприятия. За последние десять лет на предприятии произошли следующие существенные изменения:

- 2013г.- в долгосрочную аренду передан источник технической воды предприятия в-р «Кама»;

- 2015г.- выведено из состава предприятия лакокрасочное производство;
- 2016г. – введено в состав газоперерабатывающее производство и построена собственная газотурбинная электростанция ТЭС-200, которая покрывает фактически полностью потребности электроэнергии, тепла и пара предприятием.

С учетом изменения водохозяйственной обстановки на предприятии была поставлена задача проанализировать с учетом проектной мощности очистных сооружений возможность приема всех образующихся сточных вод при условиях максимальной выработки продукции.

Задачи, связанные с распределением геоданных по большой территории, эффективно решать с применением геоинформационной системы. Выделяются следующие основные направления использования ГИС в рамках составления водохозяйственного баланса:

- нанесение водохозяйственной обстановки, включая систему трубопроводов, абонентов предприятия, инфраструктуру систем водопотребления и водоотведения;
- систематизация данных по инвентаризации объектов водопотребления и водоотведения;
- проведение гидрологических и водохозяйственных расчетов;
- подготовка отчетных форм

Использование для систематизации данных ГИС позволило в кратчайшие сроки построить схемы водопотребления и водоотведения по отдельным участкам водопользования с учетом проложенных на данной территории различных систем водоснабжения и водоотведения, повысило не только наглядность представления информации, но и сделало ее доступным для корректировки занесенных данным всем отделам предприятия. Благодаря инвентаризации на базе ГИС были устранены неточности и получены актуальные сведения по всему водохозяйственному комплексу предприятия, предложены пути по более эффективному использованию в производстве технических вод.

Применение в полевых обследованиях современного геодезического оборудования, а так же трассоискателя, позволило значительно снизить затраты на проведение работ по уточнению трасс коллекторов и водоводов, расположенных за границей территории предприятия. В рамках обследования было выявлено, что часть подземной трассы проходит через частную огороженную территорию, что может значительно затруднять проведение любых ремонтных и восстановительных работ в случае аварийной ситуации.

Другим примером использования ГИС стал уточненный расчет образования объемов талых и дождевых вод. В отличие от предыдущего расчета, где за основу бралась вся площадь, как асфальт, расчет объемов ливневых вод было предложено проводить с использованием значений коэффициентов стока для разного вида поверхностей (рис.1). На предприятии с использованием ГИС были выделены следующие типы поверхности: кровли зданий и асфальтовых покрытий, газоны, бульжные или щебёночные покрытия. Применение средневзвешенной величины для всей площади стока с предприятия позволил на 30% снизить объемы расчетных ливневых вод поступающих на очистные сооружения.



Рис. 1. Выделение участков поверхности с различным значением коэффициентов стока в пределах предприятия

Применение в работе ГИС позволило решить ряд задач связанных с наличием в месте сброса особо охраняемых территорий, границ 1-3 пояса зон санитарной охраны хозяйственно-питьевых водозаборов, черты населенных пунктов.

На основе проведенного аудита водохозяйственного баланса были выработаны следующие предложения

- Очистные сооружения предприятия, с учетом изменения водохозяйственной обстановки, на основе заложенных проектных данных, способны справиться с объемом поступления сточных вод при максимальной загрузке предприятия без ухудшения эффективности очистки сточных вод. В период активного снеготаяния для исключения их перегрузки часть стоков рекомендуется переводить для очистки на ООО «Новогор-Прикамье».
- Ввод новых мощностей на предприятии требует проведения работ по модернизации водохозяйственного комплекса, что необходимо учитывать в планах развития предприятия.
- Подтверждена правильность решения перевода солевого стока после химводоподготовки с ТЭС-200 на ООО «Новогор-Прикамье»; имеющиеся мощности не рассчитаны на поступление в больших объемах специфических стоков.
- Необходимо вернуть в состав предприятия водозабор «Кама», как неотъемлемую часть технологической цепочки нефтеперерабатывающего предприятия, что позволит учитывать региональные гидрохимические особенности р.Кама при расчете экологических платежей.
- Расчет объема поступления на очистные сооружения объема дождевых талых вод необходимо проводить с использованием значений коэффициентов стока для разного вида поверхностей, что позволит более объективно установить объем образующегося стока.
- В связи с изменившейся обстановкой Администрации города требуется пересмотреть границы 2-3 пояса ЗСО Большекамского водозабора в соответствии с требованиями СанПиН 2.1.4.1110-02.

А.А. ТИУНОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
(НА ПРИМЕРЕ Р. ЧЕПЦА В РАЙОНЕ ПОС. БАЛЕЗИНО)**

Характерными особенностями формирования русловых процессов является адаптация морфологии русла к характеру проходящих расходов воды. Формально стабильное русло реки может наблюдаться только при стабильности расходов воды, транспортировке взвешенных и влекомых наносов. В тоже время, большинство рек характеризуется существенной, внутrigодовой и между годичной, изменчивостью стока. Поэтому существенный интерес представляет оценка изменения морфометрии русла к изменениям расхода воды на основе анализа русловых процессов в реальных естественных водотоках.

Река Чепца, в районе населённого пункта Балезино, имеет аллювиальное русло, в составе которого преобладает песок (в основном средний песок  $D \sim 0,5$  мм), таблица 1. В тоже время питьевое водоснабжение Балезино осуществляется из Реки Чепца. Практически каждый год после прохождения половодья у местных властей становится актуальной проблема водоснабжения поселка из-за того что русло заносится и мелеет.

В связи с чем, перед нами встала задача оценки состояния русловых процессов на участке реки Чепца в районе водозаборных сооружений поселка Балезино. Целью работы является отработка современной технологии оценки и анализа русловых процессов при помощи гидродинамического моделирования.

Для решения данной задачи нами сделана гидродинамическая модель участка р. Чепца, в районе пос. Балезино, которая построена в программном комплексе SMS v.11.1 с использованием модуля RiverFlow2D GPU, который позволяет имитировать транспорт наносов.

Рассматриваемый программный пакет SMS v.11.1 неоднократно нами использовался для решения самых актуальных задач, таких как: оценка зон затопления, скоростного и уровня режимов при добыче нерудных строительных материалов (в реках Вятка [1], Сытва [2], в водохранилищах Воткинское и Нижнекамское); распространение загрязнения (в реках Вятка [3], Амур, в водохранилищах Клязьминское, Учинское, Камское [4], Воткинское, Магнитогорское [5]); распространение теплового поля (Исетское и Камское водохранилища); изменение гидродинамики потока (слияние рек Чусовая и Сытва [6]); по защите берегов (р. Дон в районе г. Павловска [7]); транспорт взвешенных наносов (р. Кама - г. Пермь [8]).

Для построения гидродинамической модели используется цифровая модель рельефа участка р. Чепца в районе пос. Балезино сделанная по материалам детальной эхолотной съемки р. Чепца летом 2017 г. Моделируемый участок имеет длину 2350 м и ширину от 140 до 320 м. Водозабор располагается в 1200 м ниже автодорожного моста через реку Чепца в районе пос. Балезино, рисунок 1. Для наиболее полного и эффективного задания особенностей морфометрии рассматриваемого участка построена треугольная сетка, состоящая из 27546 элементов с характерной длиной ребра элемента 8 м, со сгущением сетки на интересующем нас участке до 4 м (участок от автодорожного моста и ниже).

Для модельного расчета используются гидродинамические характеристики р. Чепца в районе пос. Балезино по характерному году соответствующему среднесезонным характеристикам 50% обеспеченности и максимальному суточному расходу

близкому к руслоформирующему, рисунки 2 и 3. В качестве характерного года был взят паводок 2013 г. Продолжительность расчета 60 суток, она охватывала как периоды подъема и спада весеннего половодья, так и летнюю межень. Так же в расчет брался Гранулометрический состав грунта реке Чепца в районе водозаборных сооружений пос. Балезино, таблица 1.

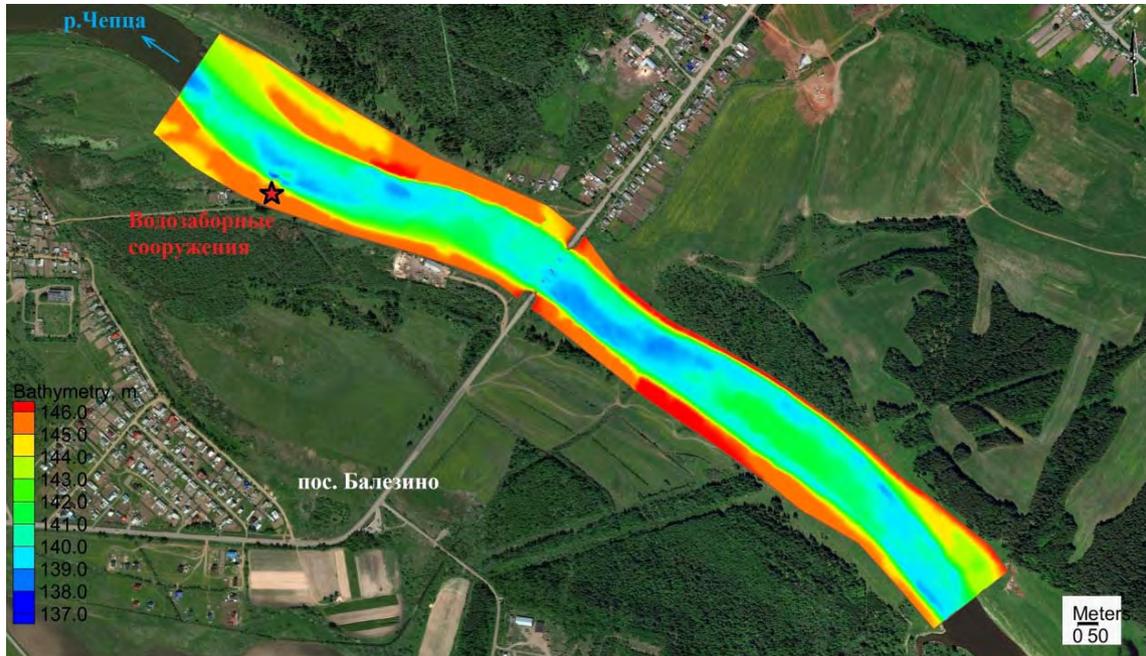


Рис. 1. Морфометрия моделируемого участка р. Чепца, в районе пос. Балезино

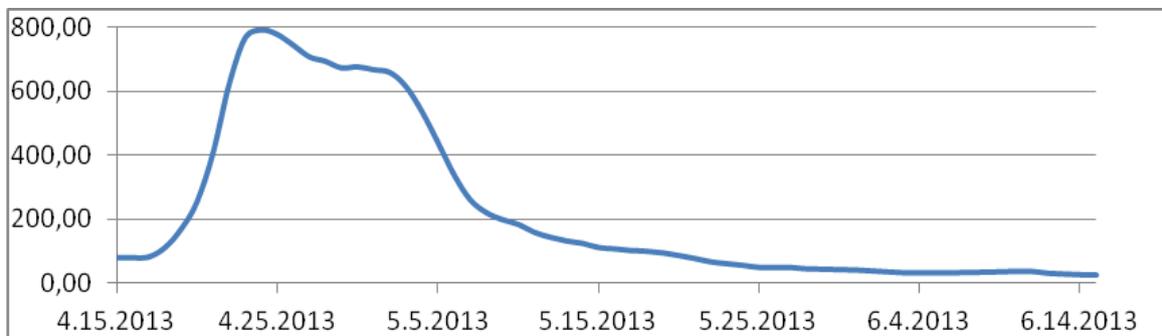


Рис. 2. Расход воды р. Чепца в районе пос. Балезино, паводок 2013 года

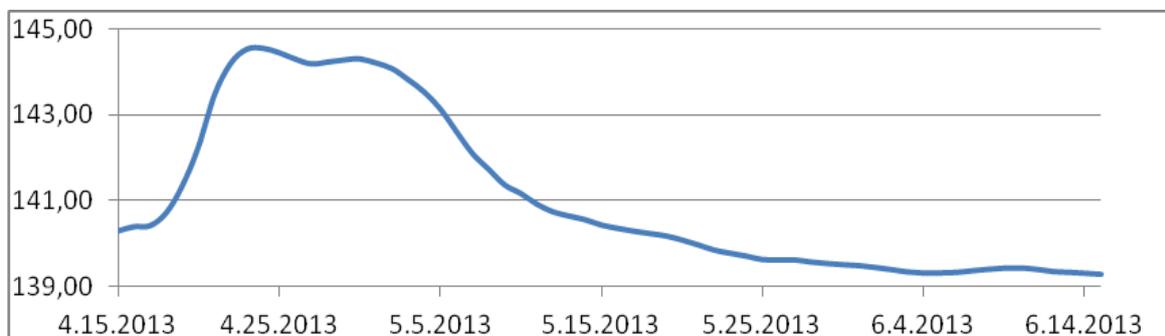


Рис. 3. Уровень воды р. Чепца в районе пос. Балезино, паводок 2013 года

## Физико-механические свойства грунтов

Наименование выработки	Гранулометрический состав, мм							
	Песок					Пыль		Глина
	2-1	1,0- 0,5	0,5- 0,25	0,25- 0,1	0,1- 0,05	0,05- 0,01	0,01- 0,002	<0,002
<b>р. Чепца в р-не водозаборных сооружений, пос. Балезино</b>	9,80	3,97	48,08	25,80	5,20	4,30	1,43	1,43

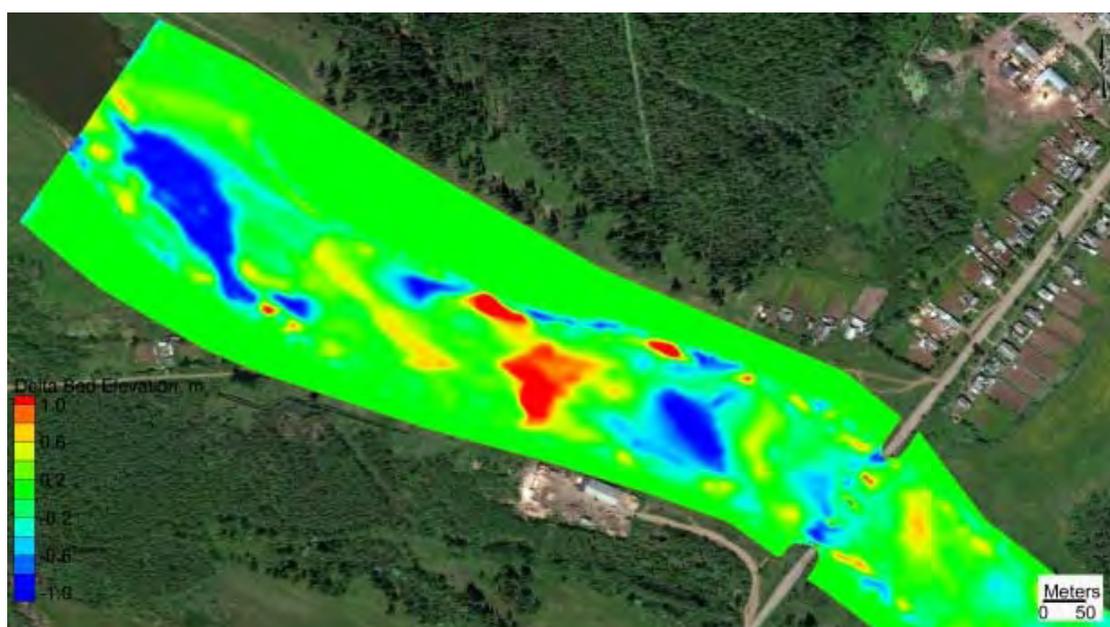
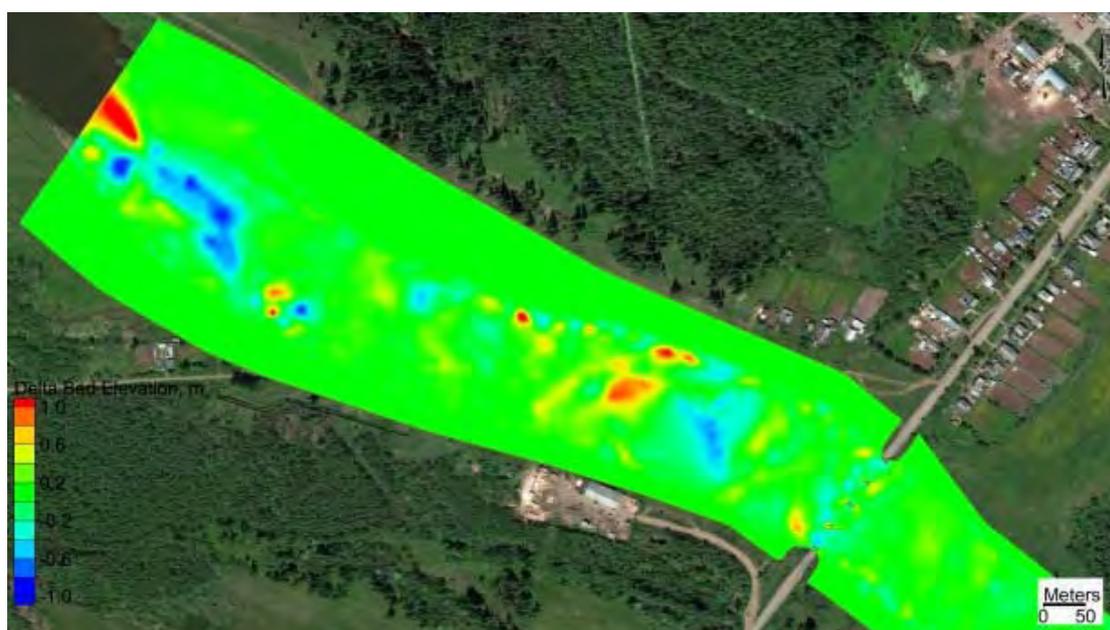


Рис. 4. Карта схема поля изменения дна на участке р. Чепца в районе водозаборных сооружений пос. Балезино, в расчетное время 10 и 30 дней

Расчеты показали, что вследствие специфических особенностей гранулометрического состава донных отложений, русло р. Чепца в районе пос. Балезино характеризуется высокой подвижностью.

Наибольшая интенсивность изменения морфометрии русла наблюдается во время прохождения пика паводка. В фазе спада паводка интенсивность русловых процессов падает. А в меженьный период их динамика значительно замедляется.

В целом модельные расчеты достаточно хорошо воспроизводят отложение наносов в районе водозабора. Так намыв в районе водозаборных сооружений за период паводка составляет порядка ~ 0,3 м. Это негативно скажется на деятельности водозаборных сооружений в долгосрочной перспективе 3–5 лет, что соответственно, приведет к проблеме с питьевым обеспечением пос. Балезино.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты / Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. – 2013. - № 3. – С. 16-32.
2. Лепихин А.П. Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений / А.П. Лепихин, Д.И. Перепелица // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. – 2007. – № 2. – С.80-93.
3. The risk of river pollution due to washout from contaminated floodplain water bodies during periods of high magnitude floods / Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Tiunov A. // Journal of Hydrology. – 2016. – V. 534, march 01. – P. 579-589.
4. Особенности организации рассеивающих водовыпусков для отведения избыточных рассолов в водные объекты / А.В. Богомолов, А.П. Лепихин, А.А. Тиунов, Т.П. Любимова, Я.Н. Паршакова // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2016. – № 2. – С. 72-86.
5. Отработка возможных схем снижения воздействия ОАО «ММК» на магнитогорское водохранилище на основе вычислительных экспериментов / А.П. Лепихин, Ю.С. Ляхин, А.А. Тиунов, О.Ф. Дробный, И.Е. Вахромеев // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 5. – С. 85-96.
6. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers / Lyubimova T., Lepikhin A., Konovalov V., Parshakova Ya., Tiunov A. // Journal of Gydrology. – 2014. – V. 508. – P. 328-342.
7. Богомолов А.В. Использование численных гидродинамических моделей для оценки эффективности проектных решений по защите берегов (на примере реки Дон в районе города Павловска) / Богомолов А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А. // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 1. – С. 50-57.
8. К проблеме оценки последствий крупномасштабной добычи нерудных строительных материалов на поверхностные водные объекты / Лепихин А.П., Любимова Т.П., Лепешкин С.А., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Перепелица Д.И. // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 3. – С. 108-119.

Н.В. ЛАВРОВА  
*Горный институт УрО РАН*  
**ГИДРАТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЕ**

Кунгурская Ледяная пещера является эталонной спелеосистемой, заложенной в переслаивающихся сульфатных и карбонатных отложениях. Ледянопещерская пачка, в которой образованы карстовые пустоты, представлена в основном зернисто-кристаллическими и скрытокристаллическими ангидритами [3]. Гипсы распространены в меньшей степени – на контактах с карбонатными породами, заполняют трещины, слагают присклоновые участки, слагают выступающие сколы и поверхностный слой толщиной до 5 мм на ангидритах.

Гидратация ангидритов широко распространенный процесс в пещере, проходящий двумя способами. Ненарушенная слоистость на контактах гипсов и ангидритов, реликты голубых ангидритов на свежих сколах, рассеченные огипсованными по трещинам зонами, отсутствие раздувов и деформаций по трещинам напластования свидетельствуют о метасоматическом замещении сульфата кальция без изменения объема породы. С другой стороны повсеместно отмечаются растрескавшиеся гипсово-ангидритовые глыбы, а также складки смятия внутри пластов гипсо-ангидритов, что свидетельствует об увеличении объема породы при гидратации. Наиболее огипсованные, увеличившие объем сульфатные породы в Кунгурской пещере обнаруживаются на участках, испытывающих напряжения растяжения вследствие прогибов пластов над подземными полостями [5].

Отдельные участки стен покрыты сетью гидратационных полигональных трещин, связанных со стрессом субвертикальной ориентировки. Длина трещин до 30-50 м, раскрытость до 5 см, глубина до 10 см. В большинстве случаев перпендикулярны напластованиям, могут быть параллельными или пересекаться.

Рентгеноструктурный анализ образцов гипсоангидритов, отобранных при проходке штольни из грота Вышка в Кунгурской пещере, показал значительную перестройку кристаллической структуры горной породы при процессах гидратации [4]. Среди специфических черт гидратации мономинеральных ангидритовых толщ при микропетрографических исследованиях в Кунгурской пещере отмечены: «расшелушивание» реликтов ангидрита в гипсе по системам концентрических трещин, присутствие в гипсе приуроченных к глинистым прослойкам прожилков селенита, что свидетельствует о субвертикальном растяжении и расслоении породы [2].

Эксперимент по исследованию гидратации гипс-ангидритовых пород начался 05.04. 2013 г. Было отобраны монолитные штуфы невыщелоченных и невыветрелых гипсоангидритовых пород иренского горизонта кунгурского яруса из обрушенных пород свода грота Дружбы Народов в центральной части Кунгурской пещеры. Образцы заложены в различных температурных зонах: зоне отрицательных, переходных и постоянных положительных вне пределов влияния паводковых и инфильтрационных вод. Проведено 5 циклов взвешиваний на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Статистического материала пока явно недостаточно. Однако отмечается устойчивое уменьшение веса для всех образцов.

По результатам опытов А.И. Печеркина по гидратации с образцами ангидрита, помещенными в стальные стаканы с насыщенном раствором сульфата кальция и дистиллированной водой, в течение полутора лет при постоянной температуре 20°C отме-

чалось уменьшение объемов систем ангидрит-вода в целом примерно на 3%, а также незначительное увеличение веса и объема образцов, что связано с разуплотнением горной породы [4].

В Кунгурской пещере Дорофеевым Е.П. зафиксированы «зоны дробления» ангидритов за гротами Перепутье и Грязным [5]. На протяжении десятков метров поднимаются до потолка пещерных ходов нагромождения ангидритовых глыб. Различная их ориентировка указывает не на простое оседание кровли, а на явление, аналогичное горным ударам в шахте. Не исключено, что «зоны дробления» появились в результате разрядки напряжений от гидратации ангидритов. Подобные взрывы, вызванные гидратацией ангидрита, описаны в штатах Техас, Оклахома и Нью-Мексико (США) вызвали дробление перекрывающих известняков на протяжении 300 м [1].

Изучение особенностей развития гидратационных процессов Кунгурской пещеры позволит определить характер развития деформаций в различных температурных зонах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунова К.А. Эпигенетические деформации в гипсо-ангидритовых породах / К.А. Горбунова, Е.Г. Максимович // Гидрогеология и карстоведение. – Пермь, 1975. – Вып. 7. – С. 60-65.
2. Калинина Т.А. Структурно-текстурная и минералогическая характеристика пород Кунгурской Ледяной пещеры // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2013. – Вып. 16. – С. 201-208.
3. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянского; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – 376 с.: ил.
4. Печеркин А.И. Геодинамика сульфатного карста. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1986. – 169 с.: ил.

#### Неопубликованная

1. Дорофеев Е.П. Карстовые явления в районе Кунгурской ледяной пещеры. / УНЦ, Ин-т геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого, Кунгурский стац. – 1977. – Т. 1. – № 822.

УДК 551.44

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.9

М.В. БОГОМАЗ

*Горный институт УрО РАН*

#### **УТОЧНЕНИЕ ПЛАНА И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ**

Карстовые пещеры и шахты, естественные полости некарстового происхождения – это обычно новые порою недостаточно изученные природные объекты. Практически все пещеры представляют собой объекты для туристско-экскурсионных целей. Сложность проникновения в пещеры часто препятствует их изучению силами специальных научных экспедиций. Поэтому перед спелеотури-

стом возникает специфическая и ответственная задача: во время спелеопутешествия дать достаточно полную и объективную характеристику пройденной пещеры.

Кунгурская Ледяная пещера (КЛП) – карстовая пещера в Европейской части России, одна из крупнейших в мире гипсовых пещер по протяженности. Вместе с Ледяной горой образует историко-природный комплекс регионального значения.

Первый план пещеры был составлен в 1703 году известными картографами Семеновом и Леонтием Ремезовыми. Он давал лишь общую картину подземных ходов. Часть объектов наносилась по рассказам местных жителей и не соответствовали действительности. В 1934 году группой "Гидростройпроекта" был составлен полуинструментальный план Кунгурской пещеры. Группа, под руководством Переслегина в течение 2-х сезонов 1934-1935 г.г. провела большую работу по разведке и съемке новых ходов и гротов. Ряд ходов не были нанесены на план или нанесены схематично, недостаточно четко показано положение осыпей и целиков.

В зимние периоды 1960-1964 г. г. была проведена инструментальная съемка под руководством научного сотрудника Е.П.Дорофеева. В итоге он в 1964 году составил план Кунгурской Ледяной пещеры в масштабе 1:500 (рис 1). Он был ориентирован по магнитному меридиану, склонение восточное 13°. Протяженность теодолитных ходов 3781,32 м, буссольных – 3118,37 м. Всего пройдено 5898,69 м. Если исключить 300 метров буссольных ходов, пройденных для нанесения контуров крупных гротов, общая протяженность снятой части пещеры составила 5600 метров в горизонтальном положении. До настоящего времени длина маршрута по этому плану составляла 1500 метров. [1]

В настоящее время пользуются планом Е.П. Дорофеева, составленным в 1964 г. [2] и оцифрованным Лавровым И.А. в 1999-2000 гг (рис. 2). Дальнейшее изучение пещеры показало необходимость уточнения и дополнения этого плана. Целью статьи автора является уточнение морфометрических показателей и плана Кунгурской Ледяной пещеры.

Прежде чем рассмотреть основные морфометрические показатели пещеры, нужно знать методику топографической съемки. План и разрезы пещеры являются документом, подтверждающим факт прохождения полости. Топографические материалы несут значительную информацию о происхождении карстовой полости, истории ее развития и заполнения различными отложениями.

Топографическая съемка пещеры – это комплекс топографо-геодезических работ для определения формы и размера пещеры. По материалам топографической съемки составляется топографический план пещеры, который является основным доказательством прохождения пещеры и в дальнейшем служит для решения ряда задач, таких как спортивные, научные, хозяйственные, инженерные и т.д.

Методика топографической съемки пещер, разработанная в 60-х годах XX века и усовершенствованная различными коллективами используется и теперь.

По результатам топографических съемок Кунгурской Ледяной пещеры, выполненных при помощи электронного тахеометра сотрудниками Кунгурской лаборатории-стационара и набора для спелеотопосъемки спелеологами Пермского края в течение 2016-2018 г.г., изменился ее план (рис. 3-5). На основании этого плана можно подсчитать морфометрические характеристики данной полости.

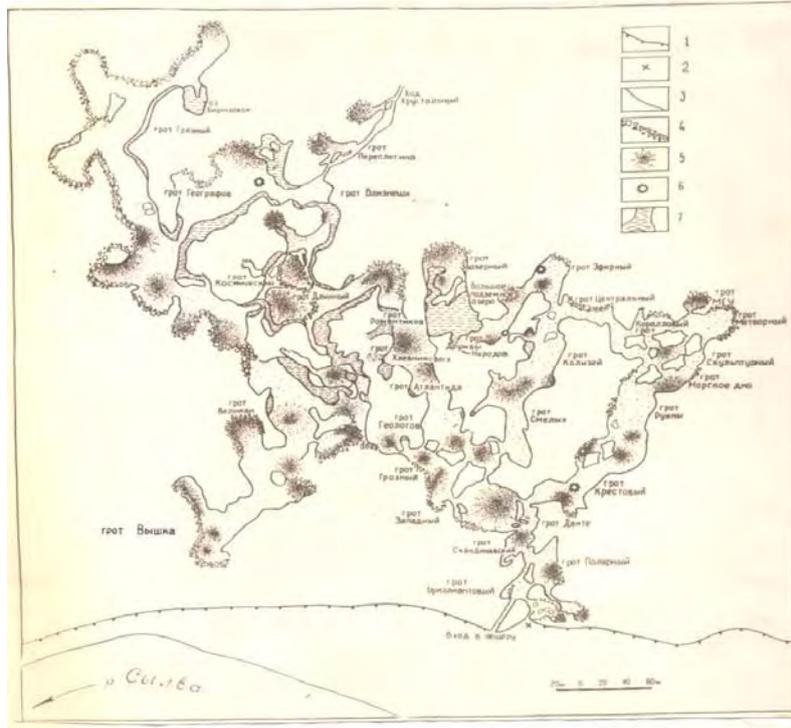


Рис 1. План Кунгурской Ледяной пещеры Е.П. Дорофеева, съемка 1964 г. [2]  
 1-Подножие Ледяной горы; 2-старый вход в пещеру; 3-стены гипсо-ангидритовых целиков; 4-стены, сложенные разрушенными породами; 5-глыбово-глинистые осыпи; 6 – органичные трубы; 7 – подземные водоемы.

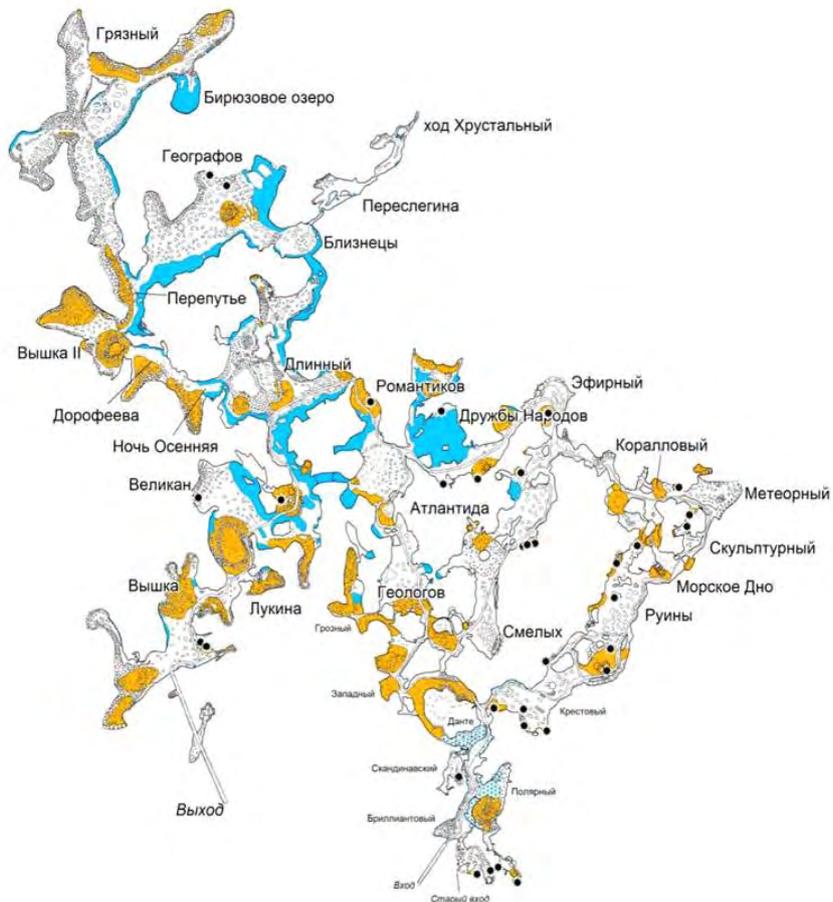


Рис. 2. План КЛП, оцифрованный Лавровым И.А. в 1999-2000 гг.

Трехмерная компьютерная модель пещеры дает наглядное представление о пещере и может использоваться для расчетов ее морфометрических характеристик. Промышленные образцы геосканеров позволяют быстро и точно построить объемную модель подземной полости, однако характеризуются высокой стоимостью. Цифровые приборы в более низком ценовом диапазоне (например, лазерный дальномер) в настоящее время широко применяются при топосъемке пещер. Если при “классической” топосъемке с помощью рулетки на каждом пикете обычно измеряются лишь параметры lгud (лево, право, верх, низ), дающие очень приблизительные параметры хода и не позволяющие описать форму его сечения, то данные приборы позволяют снимать контуры ходов пещеры. Первичным данными здесь являются множественные измерения до характерных точек стен, потолка и пола полости. В итоге формируется массив данных точек, позволяющий построить трехмерную модель пещеры (геосканер делает это автоматически, для обработки данных, полученных при использовании определенных методических приемов с помощью лазерных дальномеров, используются специальные программы).

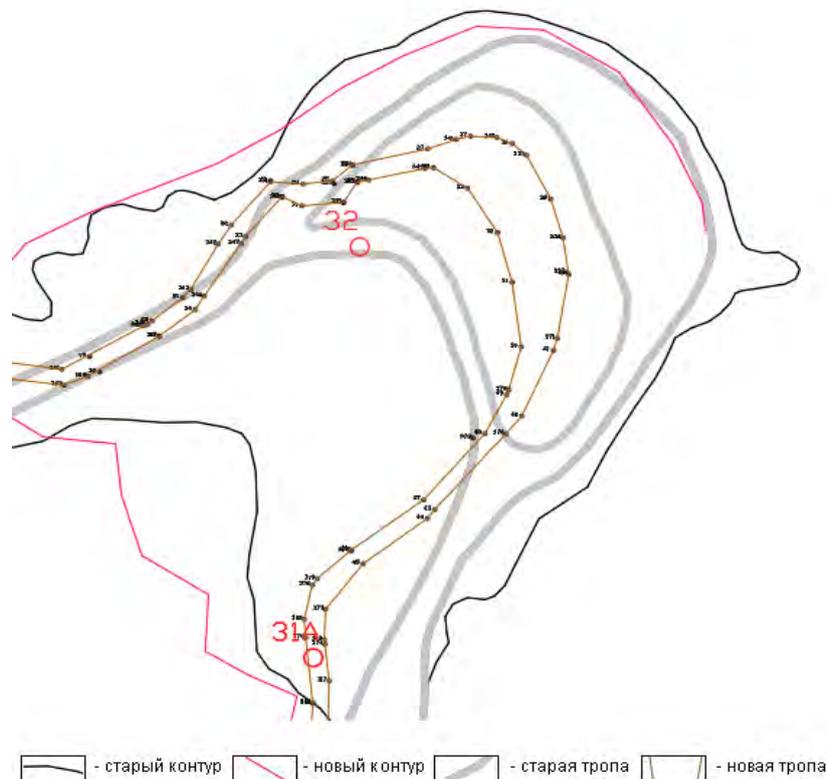


Рис. 3. Уточнение плана КЛП, грот Эфирный (Богомаз М.В., Глоба К.Н., съемка 2018 г.)

Морфометрическая характеристика – количественная характеристика форм подземного рельефа. К основным морфометрическим показателям любой пещеры относятся протяженность (м), средняя ширина (м), средневзвешенная высота (м), амплитуда (м), площадь ( $m^2$ ), объем ( $m^3$ ), удельный объем ( $m^3/m$ ), коэффициент площадной закарстованности (доли единицы). По мере накопления наших данных о Кунгурской пещере эти показатели также менялись (таблица 1) [1].

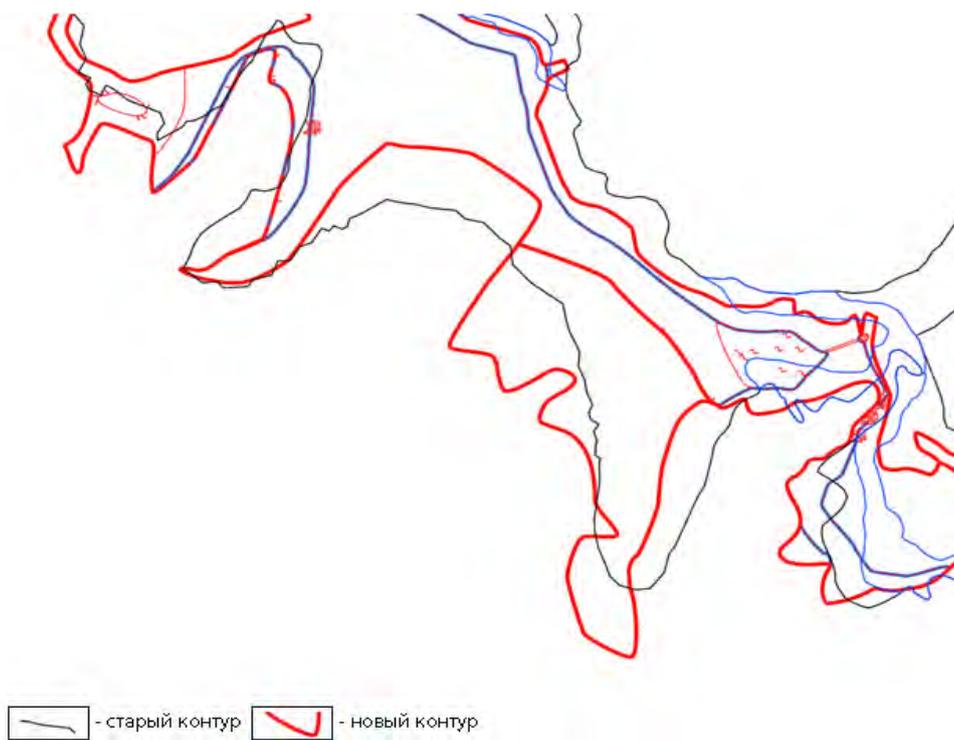


Рис. 4. Уточнение плана КЛП, гроты Ночь Осенняя, Дорофеева, Вышка II (Дудаков А., Барова А., Рублева Е., ЕКС, съемка 2016 г.)



Рис. 5. Уточнение плана КЛП, грот Хрустальный, Новый ход (Красиков А., Коньшин А., Швецова О.О., ПКС, съемка 2016 г.)

Изменения морфометрических показателей  
Кунгурской Ледяной пещеры (1859-2018 гг.)

Параметр	Год исследований					
	1859	1935	1965	2001	2003	2018
Протяженность ( $L$ ), м	1015	4600	5600	5700	5700	6525
Средняя ширина ( $b_{cp}$ ), м	-	-	-	11,4	11,4	11,7
Средневзвешенная высота ( $h_{cp}$ ), м	-	-	2,9	3,0	3,0	3,5
Амплитуда ( $Am$ ), м	-	-	-	30(+27/-3)	32(+27/-5)	32(+27/-5)
Площадь ( $S$ ), тыс. м <sup>2</sup>	-	-	52,0	65,0	65,0	76,0
Объем ( $V$ ), тыс. м <sup>3</sup>	-	-	150	195	206	267
Удельный объем ( $Q_{уд}$ )	-	-	17,9	-	36,1	40,9
Коэффициент площади закарстованности ( $K_s$ ), $S_{пещ}/S_{бл}$	-	-	-	-	0,28	0,33

К 2018 г. протяженность пещеры увеличилась на 800 м., площадь полости увеличилась на 11 тыс. м<sup>2</sup>, соответственно и объем увеличился на 60 тыс. м<sup>3</sup>. Спелеологические исследования в последние годы привели к обнаружению 2-х новых проходов.

Увеличение количественных характеристик пещеры свидетельствует об активности деформационных процессов карстовой системы с течением времени. Полученные данные позволили нам проследить динамику роста подземных полостей за счет ряда факторов: геологических, гидрогеологических и геоморфологических.

**Выводы.** Для карстовых пустот, которые развиваются в сульфатных и сульфатно-карбонатных массивах, характерно изменение морфометрических показателей в течении десятилетий, что связано с динамикой изменения физико-механических свойств пород.

Составление нового плана полости по результатам топографической съемки с использованием современных методик и инструментов, а также мониторинговые наблюдения и обнаружение новых ходов, позволяют уточнять морфометрические показатели пещер.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянского; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – 376 с.: ил..
2. Дорофеев Е.П. Новый план Кунгурской Ледяной пещеры // Пещеры. – Пермь, 1965. – Вып. 5 (6). – С.110-113.

УДК 556.314  
DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.10

А.С. КАЗАНЦЕВА  
*Горный институт УрО РАН*  
**О ФОРМИРОВАНИИ  
ХИМИЧЕСКОГО И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА  
ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ГРАНИЦЕ КСЕНОФОНТОВСКОГО  
И СОЛИКАМСКОГО КАРСТОВЫХ РАЙОНОВ**

Физико-географическая обстановка, геолого-литологические условия и тектонические процессы определяют формирование состава подземного стока. В зоне активной циркуляции это обусловлено количеством и составом атмосферных осадков, выпавших на территории Пермского края в разные периоды года. Территория северной и южной части края отличаются климатическими условиями, соответственно интенсивность выпадения осадков, сезонные температурные колебания, скорости ветров и, вследствие чего, источники формирования и питания подземных вод разные. Литологическая особенность строения Пермского края также обуславливает различия в процессах формирования состава подземных вод.

Изученная мощная зона разгрузки подземных вод расположена на границе Ксенофонтского и Соликамского карстовых районов, в административном отношении находится в Чердынском районе Пермского края. В тектоническом отношении район приурочен к северному окончанию Соликамской впадины и восточной части Колвинской седловины.

На сегодняшний день здесь не проводилось циклических наблюдений по изучению изотопного и химического состава подземных вод. Систематические наблюдения позволяют выявить условия формирования состава подземных вод, установить источники загрязнения вод и синхронность изотопного состава с другими объектами в разных географических зонах. Для хозяйственно-технического освоения эти данные играют огромную роль, так как воды региона являются пресными и являются источниками питьевой воды.

На изученной территории широко развиты карбонатно-сульфатные породы нижнепермского возраста [1]. Развитие карста связано в основном с кунгурскими и уфимскими карбонатно-сульфатными отложениями. Наибольшая трещиноватость и закарстованность приурочены к зонам разломов и дробления, благодаря чему вблизи земной поверхности возрастает инфильтрация атмосферных осадков и инфильтрация вод. Мощная зона вертикальной циркуляции в известняках способствует формированию значительных ресурсов подземных вод и развитию карстовых процессов, на что указывают многочисленные выходы их на поверхность в виде источников, а также наличие карстовых полостей в виде пещер (рис. 1). В период с начала 2017 г. по настоящее время нами проводятся ежеквартальные отборы водных проб для химического анализа и ежемесячные для изотопного анализа. Всего за исследуемый период обследовано 10 водопунктов и отобрана 131 проба, включая единичные замеры 4 источников у пещеры Дивья. Химический анализ отобранных водных проб был выполнен на современном оборудовании Autoa M90 фирмы Bruker в гидрохимической лаборатории ПГНИУ, анализ стабильных изотопов воды ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) определялся в Инсбрукском университете имени Леопольда и Франца (Австрия) с использованием современного лазерного оборудования L-2130-i, производства Picarro. В настоящий момент данные по изотопному анализу находятся в стадии систематизации и обобщения, в данной работе представлены первичные результаты анализа химического состава родниковых вод.

Основной дренаж на исследуемой территории является река Колва, к долине которой приурочены подземные источники. Содержание основных компонентов ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{N}^{\text{a+}}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) и значение минерализации воды в реке колеблется в широких пределах. Река Колва имеет гидрокарбонатно-кальциевый состав с минерализацией от 61 до 383 мг/дм<sup>3</sup> и являются нейтрально-слабощелочной (рН 6,5-7,9). Внутригодовая динамика минерального состава воды характеризуется максимальной минерализацией в зимний период, равной 383 мг/дм<sup>3</sup>, и минимальной в весенний период – 61 мг/дм<sup>3</sup> за счёт разбавления талыми водами. Изменение содержания таких компонентов, как  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{N}^{\text{a+}}$ ,  $\text{Cl}^-$  и минерализации речной воды коррелируется с изменением химического состава атмосферных осадков на протяжении осенне-зимнего периода (табл.). Такая корреляция указывает на метеогенное происхождение речной воды.

Таблица

Химические показатели р. Колвы и атмосферных осадков

Показатели	Единица измерения	р. Колва				Атм. осадки	
		Весна	Лето	Осень	Зима	Осень	Зима
рН		7,20	6,71	7,91	6,50	6,2	5,12
Минерализация	мг/дм <sup>3</sup>	61	285	228	383	6	12,2
$\text{HCO}_3^-$	мг/дм <sup>3</sup>	39	213,5	109,8	153	3,1	4,27
$\text{SO}_4^{2-}$	мг/дм <sup>3</sup>	6,1	6,6	27	55	1	1,17
$\text{Ca}^+$	мг/дм <sup>3</sup>	9,5	27,5	33,7	54	0,6	1,87
$\text{Mg}^{2+}$	мг/дм <sup>3</sup>	1,6	5,8	5,9	10,5	0,25	0,25
$\text{N}^{\text{a+}}$	мг/дм <sup>3</sup>	1,9	29	22,5	46,1	0,5	0,5
$\text{Cl}^-$	мг/дм <sup>3</sup>	1,6	0,4	34,4	56,7	0,5	0,5

Водные объекты относятся к разным водоносным зонам. Несколько родников расположены в пограничной зоне коренных соликамских и аллювиальных четвертичных отложений (P<sub>2</sub>slk и aQ) на западной границе депрессии (Покчинский, Вильгортский и родник Параскевы Пятницы). Водоносными породами этой зоны являются известняки, мергели, песчаники, алевролиты. Движение вод от областей питания к областям разгрузки происходит под действием разности гидростатических напоров по наиболее проницаемым слоям и пластам [2]. Воды этой зоны пресные с минерализацией 250-430 мг/дм<sup>3</sup>, причем в водах Вильгортского источника зафиксированы примеси сульфатов до 34 мг/ дм<sup>3</sup>. Максимальная минерализация приурочена к зоне разгрузки подземных вод в речных долинах на участках пересечения их с положительными тектоническими структурами.

На территории п. Нырб выделяются две водообильные зоны пресных вод: южная зона ассельско-артинского терригенного комплекса (sP<sub>1</sub>a-ag) и северная слабоводоносная надзона рифейско-нижнедевонских терригенных и метаморфических кварцитовидных пород (s.gR-D<sub>1</sub>). Воды источника, приуроченного к южной части поселка, относятся к гидрокарбонатно-кальциевому типу с примесями сульфатов и минерализацией до 207 мг/ дм<sup>3</sup> (Свято-Никольский родник), водоносными являются прослойки и линзы конгломератов, песчаников, реже алевролитов, мергелей, известняков. Подземные воды северной части (Вилипский родник) – гидрокарбонатно-кальциевые с минерализацией до 300 мг/ дм<sup>3</sup>.

Также к зоне нижнепермских отложений ассельско-артинского комплекса приурочены выходы подземных вод у пещеры Дивья. Воды этой зоны гидрокарбонатно-кальциевые с минерализацией до 285 мг/ дм<sup>3</sup>.

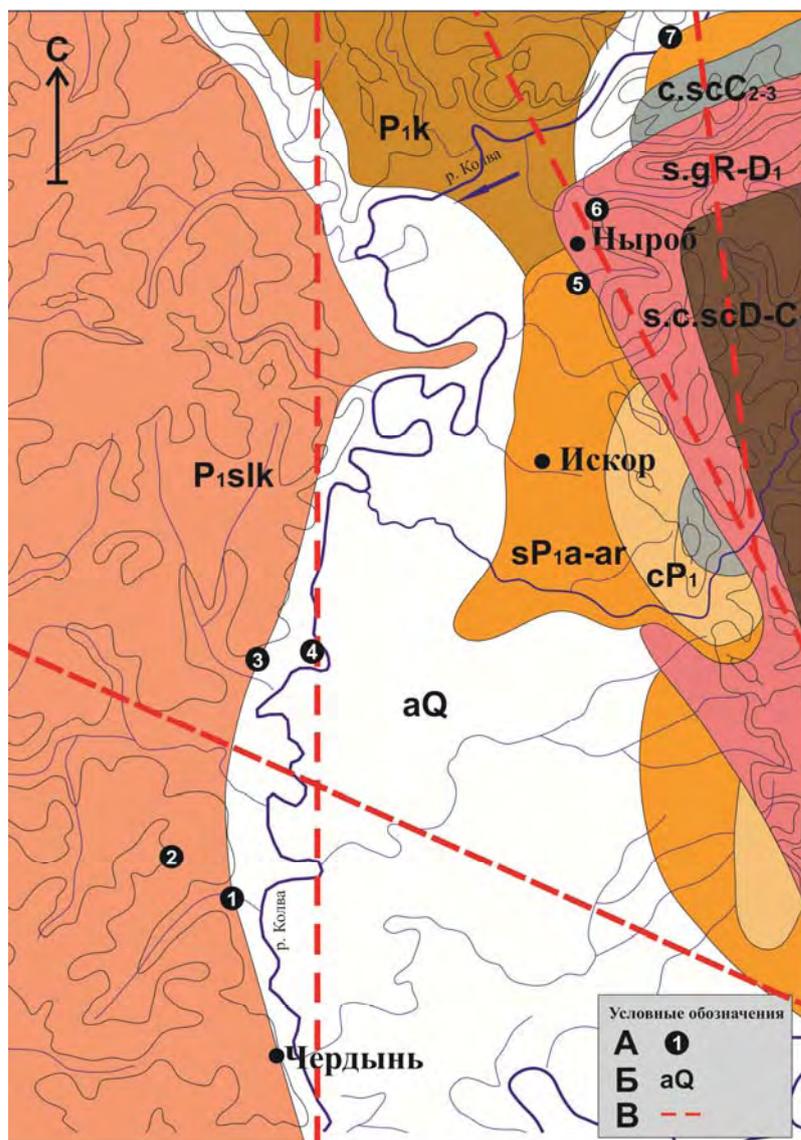


Рис. 1. Местоположение отбора проб воды в районе исследования

А – исследуемые водопункты: 1 – Покчинский родник; 2 – источник Параскевы Пятницы; 3 – Вильгортский родник; 4 – р. Колва; 5 – Свято-Никольский родник; 6 – Вилипский родник; 7 – Дивья пещера. Б – гидрогеологические подразделения:  $P_{1k}$  – кунгурская карбонатно-сульфатная серия;  $P_{2slk}$  – соликамская терригенно-карбонатная свита;  $aQ$  – четвертичный аллювиальный горизонт;  $sP_{1a-ar}$  – ассельско-артинский терригенный комплекс;  $cP_1$  – нижнепермская карбонатная серия;  $c.scC_{2-3}$  – надзона средневерхнекаменноугольных карбонатных и терригенно-карбонатных пород;  $s.gR-D_1$  – надзона рифейско-нижнедевонских терригенных и метаморфических кварцитовидных пород;  $s.c.scD-C$  – надзона девонско-нижнекаменноугольных терригенных карбонатных и терригенно-карбонатных пород (составлено по материалам Е.А. Иконникова, Л.А. Алексеевой, электронная версия А.В. Коряжиной (Шиловой), Е.Н. Пыстоговой, 2017); В – тектонические разломы [1].

Состав подземных вод исследуемых источников изменяется по сезонам, причем в двух источниках (Вилипский и Параскевы Пятницы) сезонные изменения менее выражены, минерализация вод практически остается постоянной, годовая динамика минерального состава колеблется в пределах  $\pm 10 \text{ мг/дм}^3$ , в остальных источниках – в пределах  $\pm 30 \text{ мг/дм}^3$ .

Результаты изучения химического состава вод карстовых источников свидетельствуют о том, что они в основном формируются в терригенно-карбонатном комплексе пород, в зоне активного водообмена питание этих вод происходит преимущественно за

счет инфильтрации атмосферных осадков, поскольку химический состав этих вод подвержен сезонным изменениям (рис.2).

Для нескольких источников (Вильгортский и Свято-Никольский) характерен смешанный гидрокарбонатно-кальциево-сульфатный состав вод и отмечена повышенная минерализация в результате присутствия сульфатного иона в пределах 20-60 мг/дм<sup>3</sup>, что указывает на дополнительный источник питания подземных вод. В пределах исследуемых родников выявлены зоны тектонических нарушений, в пределах которых по тектоническим трещинам осуществляется разгрузка минерализованных вод из нижележащих слоев. Вероятно, что нижележащие карбонатные породы частично загипсованы и их выщелачивание приводит к увеличению в воде как карбонатов, так и сульфатов кальция.

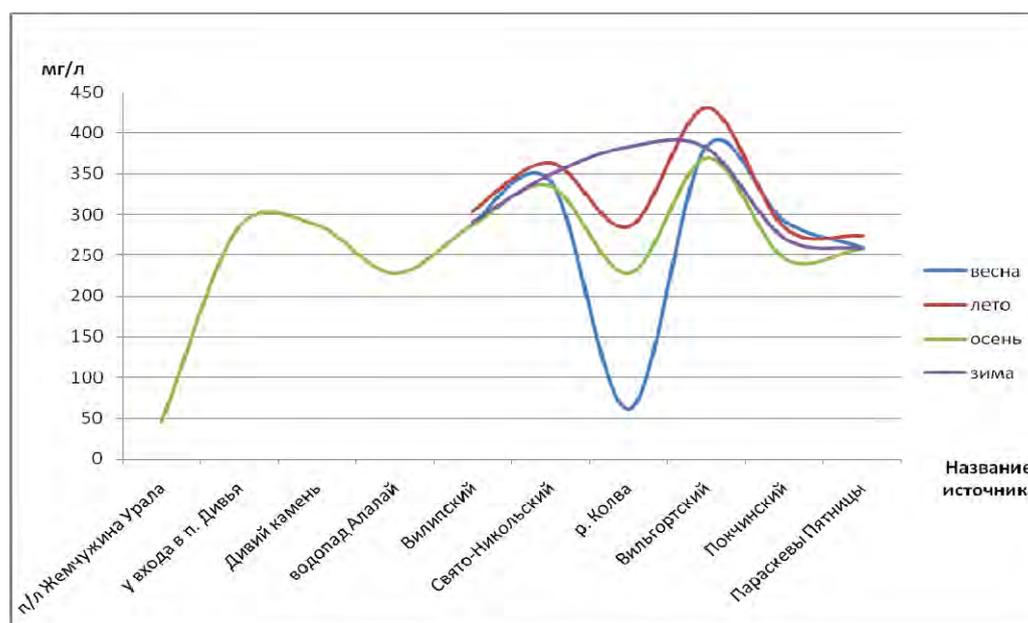


Рис. 2. Распределение минерализации водных объектов по сезонам

Таким образом, на границе Ксенофоновского и Соликамского карстовых районов сформировалась мощная зона разгрузки подземных вод под влиянием тектонических и литологических факторов. Здесь выделяются 2 типа гидрохимических фаций, которые определялись по двум или трем преобладающим по весу компонентам: гидрокарбонатно-кальциевая и гидрокарбонатно-кальциево-сульфатная. Наличие зон дробления и разломов создают благоприятные условия для формирования трещинно-карстовых вод и их концентрированной разгрузки. Питание подземных вод осуществляется в основном за счет атмосферных осадков, местами водами нижележащих слоев. Детальное изучение изотопного и химического состава подземных вод этой территории позволит установить цикличность и сезонность изменения изотопного и химического состава вод, и определить роль атмосферных осадков в формировании подземных вод. Эти данные в совокупности с микробиологическим и микроэлементным анализами помогут при решении задач по использованию подземных вод в хозяйственно-технических и промышленных целях, а также спрогнозировать карстовые процессы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Пермского края: Карты / под общ. ред. А.М. Тартаковского. – Пермь: [Раритет-Пермь], 2012. – 1 атл. (123 с.)
2. Отчет о результатах работ по составлению полистной гидрогеологической карты масштаба 1:500000 листов Р-39-Г, Р-40-В, Г, 0-40-Б / Иконников Е. А. и др. – Пермь, 1995.

А.В. КРАСИКОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**СТРУКТУРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ГРОТА ДЛИННЫЙ  
В КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЕ**

Картирование структурных элементов гротов и галерей в Кунгурской Ледяной пещере (КЛП) помогает проанализировать геологическую историю развития карстового массива, определить роль многих факторов в развитии тех или иных процессов. В данной статье автор приводит результаты картирования грота Длинный.

**Введение.** Грот Длинный заложен в гипсо-ангидридах нижней и средней частей ледянопещерской пачки кунгурского яруса приуральского отдела пермской системы. Имея протяженность 196 м, является самым длинным гротом пещеры, средняя ширина грота составляет 18, высота около 5 м [3]. Площадь грота составляет 3530 м<sup>2</sup>, уступая лишь гроту Великану, Грязному и Географов. Средняя мощность кровли 75 м, находится на расстоянии 360 м от р. Сылва.

Грот тянется на юго-запад до края мощной глыбово-глинистой осыпи, откуда поворачивает под прямым углом на юго-восток. Свод почти по всей протяженности плоский, со следами растворения. Первые 80 метров вдоль северо-западной стены грота тянется край самой крупной осыпи, разведанной в пещере. Далее грот тянется вдоль коренной стены, а затем пересекает обвальнй конус. Вдоль всей восточной стены грота простирается озеро площадью 850 м<sup>2</sup> (23% грота) с наибольшей глубиной до 5 м, частично заваленное гипсо-ангидритовыми блоками скатившимися с осыпи и обрушенными со сводовой части, на севере обрушившиеся глыбы разделяют озеро и оно становится мелководным. Озеро имеет множество поноров, уходящих в сторону озера грота Аквалангистов и свидетельствующих о большой деформации ангидритового целлика. В центре грота, перед поворотом, расположен вход в Заповедную часть пещеры.

**Методика работ.** Для структурного картирования в пределах съемочного поля был использованы тахеометры Leica TCR800 и Sokkia CX 106. Полученные данные были обработаны и преобразованы в графический вид с помощью системы автоматического проектирования и черчения AutoCAD. В ходе работы был построен план грота Длинный со структурными элементами и обновленным контуром, площадью 2850 м<sup>2</sup> (Рис.1).

Контур съемочного поля, только в некоторых случаях не совпадает с планом грота Длинный, что говорит о хорошем качестве плана, используемого сейчас в качестве основного [4]. Увеличение площади грота, связано с труднопроходимостью ходов и неполнотой прошлых съемок за северо-западной осыпью и юго-восточной части грота, а так же с менее точной обработкой полученных данных.

Частично увеличилась площадь распространения осыпи в северо-западной части грота, что можно связать со сползанием сульфатно-карбонатных обломков различного размера с осыпи под воздействием гравитационных процессов, нежели с обрушениями. [2]. За последний 30 летний период был зафиксирован всего лишь 1 обвал, что говорит об относительной устойчивости сводовой части грота.

В гроте выявлены следующие структурные элементы: слоистость пород, зона развития гидратации, органические трубы и трещины, которые предварительно были поделены на различные группы, которые представлены ниже.

**Слоистость.** Залегание слоев пологое в сводовой части грота – практически горизонтальное, а по периферии углы падения варьируют от 1-2 до 36°. Наибольшие значения выделяются в западной части грота.

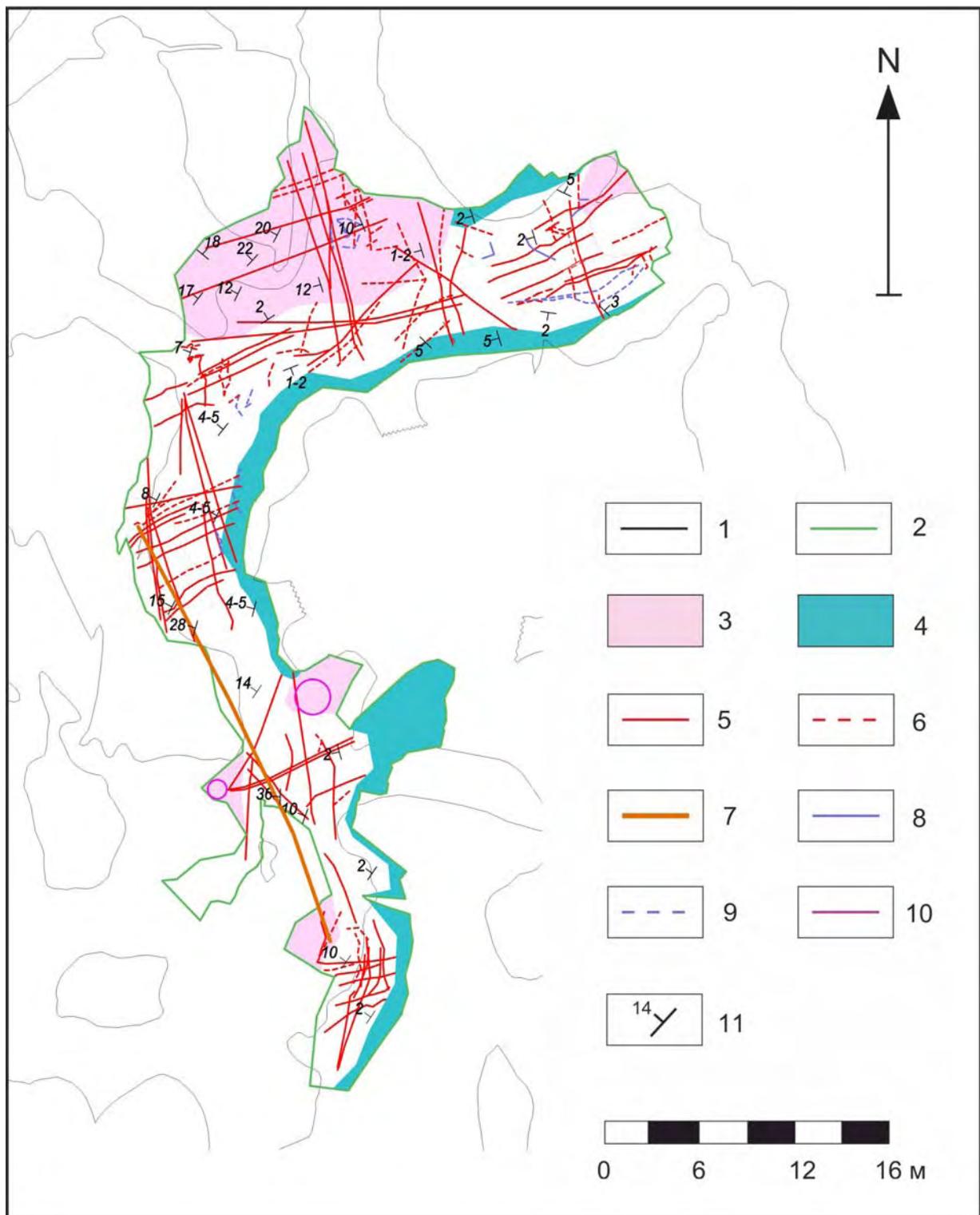


Рис. 1. План грота Длинный с выделенными элементами: 1 – контур грота (старый); 2 – контур съемочного поля; 3 – зона развития осыпей; 4 зона развития гидратации; 5 – тектонические трещины; 6 - внутрипластовые трещины. 7 – ось флексуобразного перегиба; трещины отрыва с величиной открытия до 15 см – 8, более 15 см – 9; «органные трубы» - 10; 11- угол падения слоистости.;

**Тектонические трещины** широко представлены в нижних и средних слоях ледянопещерской пачки и распределяются по всей площади грота. Их видимая

протяженность достигает до 50 метров. Они прослеживаются не только в сводовой части, но и на стенках грота формируя диагональную систему ( $10-48^\circ$  и  $330-357^\circ$ ). Большая часть трещин - закрытые, вертикальные, с углом падения до  $90^\circ$ , но присутствуют и более пологие (до  $67^\circ$ ) с ССЗ и СВ падением и открытые с величиной открытия до 10 см.

Трещиноватость в нижних слоях ледянопещерской пачки отличается от таковой в средних слоях. В нижних ангидритовых слоях, тектонические трещины чаще всего являются закрытыми и заполнены гипсом. В средних слоях, по большей степени, тектонические трещины являются открытыми, очень часто пересекаются с трещинами меньшего порядка, которые дробят слои на более мелкие блоки, способствуя усилению неустойчивого положения блоков в сводовой части грота Длинный (СЗ часть грота).

**Зона развития гидратации**, включающая **гидратационные «трещины»**, распространены в юго-восточной и центральной частях грота. Гидратационные «трещины» представляют собой трещины в ангидрите, стенки которых часто замещены вторичным гипсом на глубину от 5 – 7 см до 50 см. Большая часть из них сомкнута, но есть и вторично раскрытые (до 5 см). Основная часть трещин имеют такую же систему азимутов простирания, как и в гроте Великан [1]. Практически на всей протяженности западной части грота выделяется система гидратированных тектонических трещин, шириной до 10м (рис 2).



Рис. 2. Флексурообразный перегиб

**Внутрипластовые трещины** прослеживаются не только по всему периметру сводовой части, но и в стенках грота Длинный, обычно не выходят за пределы одного пласта. Обычно они распределены параллельно, но довольно часто и перпендикулярно, либо близко к этим значениям, к распространению основных тектонических трещин. Их протяженность составляет от 0,5 до 10 метров. Они представлены единичными трещинами, системами трещин или зонами микротрещин. По степени проявления бываю закрытыми и открытыми, с величиной открытия до 5-7 см. Углы падения внутриблоковых трещин варьируют от  $45^\circ$  до  $90^\circ$  (рис. 3.).



Рис. 3. Внутрипластовые трещины

Трещины отрыва, которые нанесены, не являются субгоризонтальными, имеют углы наклона, которые варьируют от  $2-3^\circ$  до  $15^\circ$ , мощность раскрытия таких трещин до 40 см. По своей природе некоторые из них имеют сложную форму, часто секут тектонические трещины под острым углом.

Органные трубы являются специфичным образованием КЛП. Они формируются инфильтрационными водами, а для их развития необходимы вертикальные проницаемые зоны.

**Выводы.** В ходе работы над построением графического плана грота Длинный, обновлен контур грота и граница осыпей. Его изменение можно связать с добавлением новых данных полученных при съемке и более точной обработки этих результатов.

Анализ распределения углов падения позволил прийти к выводу, что в юго-западной части грота Длинный происходит пликативный флексуобразный перегиб слоистости, определяющий конфигурацию всей западной части грота, который сформировался на фоне крупной зоны концентрационных тектонических трещин, которые в дальнейшем были подвержены процессам гидратации. Тектонические трещины развиты повсеместно на всей площади грота формируют несколько диагональных систем, что говорит нам о том, что их происхождение связано с внешним полем тектонических, преимущественно сжимающих напряжений.

Крутое падение слоев в северной части грота возможно связано с крылом антиклинали северо-западного простирания. Тектонические и внутриблоковые трещины, выделенные на данном участке, секут крыло антиклинали под острыми углами, что может говорить об их (право)сдвиговой природе.

«Гидратационные» и внутрипластовые трещины часто имеют те же простирания, что и «тектонические», что предполагает их унаследованную природу развития от тектонических трещин и активизацию в процессе гидратации ангидритовой толщи.

Активное развитие гидратационной зоны и трещин гидратации в восточной части грота, частично связано с тем, что на поверхности карстового массива в районе распространения грота Длинный идет уклон с северо-восточной части на юго-запад, также присутствуют крупные карстовые воронки, как в северной и западной части. Осадки, выпадающие на поверхности карстового массива, проникая через систему трещин, образуют подзону подвешенных инфильтрационных вод в восточной части грота, где местным водоупором являются доломиты неволинской пачки. Карстовые воды постепенно просачиваются через кровлю грота, что подтверждается постоянной каплей над озером.

Трещины отрыва сформировались в ходе гравитационных процессов происходящих в массиве, часто их простирание совпадает с тектоническими трещинами. Развитие осыпей тесно связано с «органными трубами». Осыпи «оконтуривают» грот практически со всех сторон, а главным фактором их проявления, служат породы, обрушенные в ходе образования органических труб. Фактически, органические трубы определяют края стенок гротов, определяя их морфологию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красиков А.В. Структурные элементы грота Великан в Кунгурской Ледяной пещере // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2018. – Вып. 21. – С. 402-406.
2. Красиков А.В. Анализ и оценка устойчивости кровли в гротах Кунгурской Ледяной пещеры / А.В. Красиков, Д.Е. Трапезников, О.И. Кадебская // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2016. – Вып. 19. – С. 362-371.
3. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянского; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – С. 82-88.
4. Лавров И.А. Электронный план Кунгурской ледяной пещеры / И.А. Лавров, А.А. Чугаева // Пещеры: межвуз. сб. науч. тр. / ПГУ. – Пермь, 2001. – С. 73-75.

К.Н. ГЛОБА  
*Горный институт УрО РАН*  
**МАРКШЕЙДЕРСКИЙ МОНИТОРИНГ  
В КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЕ**

Безопасность посещения пещеры является главным условием и требованием эксплуатации естественных подземных сооружений. Значительная часть этого условия достигается с помощью маркшейдерского контроля.

В соответствии со статьей 24 Федерального закона Российской Федерации от 21 февраля 1992 года № 2395-1 «О недрах» маркшейдерский контроль является одним из основных при обеспечении безопасности недропользования [2].

На сегодняшний день государство предъявляет недропользователям определённые требования к производству маркшейдерских работ. Отвечающие современным требованиям маркшейдерские работы в Кунгурской Ледяной пещере (далее КЛП) начали производить с 2008 года. До этого в 1964 году Дорофеевым был составлен единственный инструментальный достоверный и полный план пещеры с анализом пройденных теодолитных ходов и, начиная с 2003 года, Кунгурская лаборатория-стационар осуществляла ежегодное тригонометрическое нивелирование экскурсионной тропы и гидропостов.

Маркшейдерское обеспечение эксплуатации естественных подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, включает создание маркшейдерской опорной сети, съёмку горных выработок, систематические наблюдения за движениями земной поверхности и толщи горных пород, ведение горно-графической маркшейдерской и геологической документации.

В 2009 г. на объекте «Кунгурская Ледяная пещера и Ледяная гора» составлен и согласован с Западно-Уральским управлением Ростехнадзора проект маркшейдерских работ; в 2013 г. создана опорная маркшейдерская сеть (далее ОМС) на поверхности, соответствующая точности полигонометрии 1 разряда, создана подземная ОМС (полигонометрия 2 разряда).

В 2017 г. Кунгурской лабораторией-стационаром «ГИ УрО РАН» был выполнен значительный комплекс маркшейдерских работ на данном объекте, в частности: разработан и согласован с Западно-Уральским управлением Ростехнадзора проект наблюдательной станции; выполнена съёмка земной поверхности Ледяной горы в пределах горного отвода и составлен план поверхности в М 1:1000; составлен совмещённый план поверхности и пещеры; создана наблюдательная станция в пещере в виде сети деформационных марок; составлены план ОМС и карточки закладки пунктов ОМС; систематизирована документация за предыдущие годы (научно-исследовательские работы, графический материал, отчёты и др.).

Начиная с 2017 г. на объекте ведётся полный комплекс маркшейдерской документации, согласно инструкции по производству маркшейдерских работ, а именно – это: журналы нивелирования гидропостов, измерений, съёмки и состояния пунктов ОМС и др. [2].

В 2017 г. были начаты работы по уточнению контура пещеры, осыпей, озёр, экскурсионной тропы, несущих и ограждающих конструкций (стен, колонн, анкеров, бытовых сооружений). В данный момент составляется новый уточнённый план пещеры и уже выявлены расхождения с планом, составленным Дорофеевым [1].

В конце 2017 г. был выполнен нулевой цикл измерений по мониторинговым деформационным маркам в пещере. Наблюдения за сдвигами массива в пещере включают систематические измерения с помощью тахеометра, обработку полученных данных и визуализацию результатов в виде графиков, профилей, чертежей, трёхмерных моделей. В 2015-2016 гг. в кровле пещеры было заложено 266 деформационных марок из специальной прочной конструкционной стали. Деформационные марки установлены в кровле свода над экскурсионной тропой и в потенциально опасных участках. Все установленные марки имеют сертификаты качества и соответствия стандарту. Марка представляет собой металлический штырь длиной 200 мм, диаметр крепежа – 20 мм, диаметр шарообразного знака – 30 мм.

Методика проведения наблюдений заключается в определении координат X, Y, Z центра марок с точностью до миллиметров. Съёмка марок осуществляется с пунктов маркшейдерской опорной и съёмочных сетей 2 раза в год в осенний и весенний период. По результатам измерений составляются ведомости вычислений координат марок. Затем по формуле тригонометрии (1) вычисляется вектор сдвига точки. При его значении больше 10 мм делаются выводы об опасности участка, характере протекания деформационного процесса и мерах обеспечения безопасности.

$$\Delta L = \sqrt{(X_n - X_0)^2 + (Y_n - Y_0)^2 + (Z_n - Z_0)^2} \quad (1)$$

где  $X_n$  – координата X точки текущей серии наблюдений, м;  $X_0$  – координата X точки начальной серии наблюдений, м;  $Y_n$  – координата Y точки текущей серии наблюдений, м;  $Y_0$  – координата Y точки начальной серии наблюдений, м;  $Z_n$  – координата Z точки текущей серии наблюдений, м;  $Z_0$  – координата Z точки начальной серии наблюдений, м.

Если длина вектора  $\Delta L$  превышает 10 мм, то в данном месте прогнозируется обвал и необходимо принятие срочных мер по укреплению свода.

В данный момент выполняется вторая серия наблюдений по деформационным маркам. По результатам которой можно будет провести анализ деформированного состояния массива.

Исследования в натуральных условиях позволяют выявить количественные показатели, характеризующие деформации в конкретных горно-геологических условиях.

Таким образом, пещера как опасный производственный объект 3 класса опасности, на сегодняшний день, нуждается в постоянном наблюдении за деформациями массива. Прогнозирование обвалов и анализ напряженно-деформированного состояния массива являются главной целью маркшейдерского мониторинга на данном объекте.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорофеев Е.П. Новый план Кунгурской Ледяной пещеры // Пещеры. – Пермь, 1965. – Вып. 5 (6). – С.110-113.
2. О недрах: закон РФ от 21.02.1992 № 2395-1.
3. Инструкция по производству маркшейдерских работ. РД 07-603-03. – М.: НТЦ «Пром. безопасность, 2003 – 116 с.

Б.А. БАЧУРИН  
*Горный институт УрО РАН*  
**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОГЕНЕЗА  
КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА**

Проблема кислотного дренажа шахт и отходов стоит перед многими горнодобывающими предприятиями мира, разрабатывающих руды, содержащие сульфидные минералы [6]. Окислительное растворение сульфидных минералов формирует кислые стоки, содержащие повышенное содержание сульфатов и широкого спектра тяжелых металлов (ТМ) и токсичных микроэлементов (МЭ), причем данные процессы зачастую продолжаются и на постэксплуатационном этапе и имеют значительную продолжительность (десятки – сотни лет).

Подобный тип техногенеза характерен и для Кизеловского угольного бассейна (КУБ), что связано с высокой сернистостью углей (до 6%) и содержанием сульфидов во вмещающих породах. Вследствие прекращения шахтного водоотлива произошло затопление горных выработок с образованием в отработанных шахтных полях техногенного водоносного горизонта, разгружающегося в вышележащие горизонты подземных вод и на поверхность через горные выработки и родники. Как и во время функционирования угледобывающих предприятий, шахтные воды имеют кислую реакцию ( $\text{pH}=2-3$ ), сульфатный состав и отличаются высоким содержанием железа, алюминия и ряда микрокомпонентов [1, 5]. Другим источником загрязнения являются угольно-породные отвалы, суммарный объем кислых стоков с которых колеблется от 27,9 до 37,3 м<sup>3</sup>/ч, а в их составе в сверхнормативных количествах присутствуют алюминий, железо, марганец, кобальт, никель, кадмий, бериллий, литий и ряд других микроэлементов [1, 5].

Обобщение результатов гидрорежимных наблюдений свидетельствует об отсутствии четких тенденций в изменении состава шахтных вод [4], что связано с многофакторностью процесса их формирования (объем выработанного пространства затопленных шахт, горно-геологические и гидрогеологические условия, минеральный состав пород и др.). Затруднена и оценка пород отвалов, как потенциальных источников поллютантов, что связано с недостаточной изученностью форм нахождения тяжелых металлов и органических соединений в составе минеральной фазы отходов. Имеющиеся данные свидетельствуют, что трансформация пород отвалов под влиянием гипергенных факторов сопровождаются деструктивными реакциями физико-химической природы, приводящими к повышению геохимической подвижности соединений [2]. В связи с этим, прогноз особенностей кислотного дренажа пород должен базироваться на учете их минералогического состава и форм нахождения потенциальных поллютантов, определяющих потенциал кислотного дренажа и масштабы выщелачивания отдельных микроэлементов [6].

С целью уточнения характера данных процессов в условиях КУБа проведено исследование грунто-смесей 8 разновозрастных породных отвалов, представленных сильно пиритизированными обломками алевролитов, аргиллитов и песчаников с включениями и прослоями каменного угля. Кроме того, исследован состав подотвальных вод и прилегающих к отвалам почв.

Для оценки геохимической подвижности и миграционных свойств тяжелых металлов (ТМ) проведено атомно-абсорбционное определение содержания кислоторастворимых (извлекаемых горячим раствором 5н  $\text{HNO}_3$ ), подвижных (ацетатно-аммонийный буферный раствор) и водорастворимых форм, что позволяет учесть участие в миграции ионообменных и непрочно связанных соединений и оценить возмож-

ные масштабы усиления их эмиссии при изменении окислительно-восстановительного равновесия среды.

При изучении органической составляющей отходов и стоков основное внимание уделялось битуминозным компонентам (ХБА), являющихся наиболее миграционно-способными фракциями ОВ [3]. При их исследовании использовались современные химико-аналитические методы, позволяющие судить о структурно-групповом и индивидуальном составе органических соединений и характере их геохимической трансформации: тонкослойная (ТСХ) и инфракрасная (ИКС) спектроскопия, хромато-масс-спектрометрия (ХМС). Учитывая, что одним из основных факторов, влияющим на преобразование отходов и масштабы эмиссии поллютантов в природные геосистемы, являются атмосферные осадки, комплекс исследований дополнен экспериментальным моделированием поведения систем «отходы – вода» (последовательное 4-кратное растворение в дистиллированной воде).

Ниже приводятся результаты изучения характера загрязнения исследованных отходов и стоков Кизеловского угольного бассейна тяжелыми металлами и органическими соединениями.

Тяжелые металлы. Полученные результаты (табл. 1) свидетельствуют, что содержание кислоторастворимых форм ТМ уменьшается в следующем ряду: Fe >> Cr > Mn > Pb, Cu, Zn > Ni > Co > Cd. Близким распределением характеризуются исследованные ТМ по степени доступности растениям: Fe >> Mn > Cr > Zn, Ni, > Cu > Pb, Co, Cd. Следует отметить, что зафиксированные концентрации данных форм ТМ в породах отвалов не превышают принятые в России ПДК и ОДК для почв.

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов в угольно-породных отвалах и почвах

ТМ	Содержание, мг/кг (min-max)					
	породы			почвы		
	к/р	подв.	в/р	к/р	подв.	в/р
Fe	1691,0-19380,3	130,1-918,2	0,3-167,0	9367,0-35650,0	97,3-734,2	2,4-392,0
Cr	10,0-55,1	1,8-18,9	0,3-0,7	0-23,5	0-8,9	0-1,5
Mn	2,6-48,8	0,6-21,6	0-2,6	7,5-47,8	1,8-9,7	0,2-4,8
Pb	2,1-27,7	0-2,2	0-1,1	0-3,5	0-0,3	0-0,2
Cu	4,1-24,3	0,2-4,0	0-2,9	3,8-110,2	0,2-2,2	0,2-1,8
Zn	3,7-22,6	0,6-6,7	0,2-2,2	12,3-102,3	1,2-8,8	0,3-2,5
Ni	2,9-11,8	0,3-2,4	0-1,7	2,1-45,8	0,8-3,2	0,06-1,8
Co	0-4,3	0-1,7	0-0,8	1,9-14,3	0,2-1,0	0,05-0,56
Cd	0-3,4	0-1,0	0-0,7	0-3,5	0-0,3	0-0,2

Формы ТМ: к/р – кислоторастворимая, подв. – подвижная, в/р - водорастворимая

Распределение содержания водорастворимых форм ТМ в грунто-смесях отвалов несколько отличается: Fe > Zn, Mn, Cu > Ni > Pb, Co, Cd. Зафиксированные концентрации водорастворимых форм ТМ повсеместно превышают значения ПДК вод рыбохозяйственных водоемов.

В балансе валового содержания ТМ доля кислоторастворимых форм ТМ не превышает 27%, подвижных – 5-6%, водорастворимых – 2%, т.е. их количества, способные принимать участие в техногенных потоках рассеяния и поглощаться биотой, составляют лишь незначительную часть от общего количества, содержащегося в отходах угледобывающего производства.

Результаты исследования почвенного покрова на участках, прилегающих к отвалам, подтверждает эмиссию ТМ в природные геосистемы за счет водно-эрозионных процессов, причем в ряде случаев отмечается более высокое содержание их подвижных форм, что обусловлено накоплением миграционных соединений на природных геохимических барьерах.

Результаты экспериментального моделирования поведения систем «отходы – вода» свидетельствуют, что при последовательном многоэтапном воздействии воды происходит повышение геохимической подвижности ТМ и увеличение содержания их миграционно-способных форм. В процессе выщелачивания содержание Fe в водных вытяжках колебалось в пределах 0,15-0,76 мг/дм<sup>3</sup>; максимальные концентрации других микроэлементов не превышали 0,05-0,08 мг/дм<sup>3</sup>. Исследование состава подотвальных вод показывает, что они характеризуются кислой реакцией (pH – 3,0-3,4) и повышенным содержанием сульфатов (3376-9274 мг/дм<sup>3</sup>). Содержание в них ТМ характеризуется следующими значениями (мг/дм<sup>3</sup>): Fe<sub>общ</sub> – 42-876; Mn – 3,31-13,91; Zn – 0,13-18,0; Ni – 0,18-4,44; Cu – 0,04-1,32; Pb – 0,17-0,55; Co – 0-0,67; Cr – 0,01-0,95; Cd – 0-0,14.

Экспериментально установлено, что после взаимодействия с водой содержание в отходах подвижных форм Ni, Fe, Mn, Cd, Co возрастает в 2 раза, а Zn, Cu, Cr – в 3 раза, по сравнению с их исходным содержанием, что свидетельствует о разрушении прочно-связанных с минеральной матрицей комплексов и переводом соединений в миграционно-способные формы.

**Органические соединения.** Содержание битуминозных веществ (ХБА) в исследованных грунто-смесях относительно невелико – 0,5-6,0 г/кг, из них на долю углеводородных соединений (нефтепродуктов) приходится всего 2-13% ХБА (0,04-2,39 г/кг). По данным лабораторного моделирования поведения системы «отходы – вода» водные вытяжки грунто-смесей отвалов характеризуются следующими показателями: содержание аквабитумоидов (ХБА) – 0,60-2,35 мг/дм<sup>3</sup>, НП – 0,05-0,80 мг/дм<sup>3</sup>. В отдельных водных вытяжках зафиксировано присутствие фенолов (0,002-0,005 мг/дм<sup>3</sup>), более высокие концентрации которых отмечены в шахтных водах (0,03-0,10 мг/дм<sup>3</sup>).

По данным ХМС битумоиды водных вытяжек пород отвалов представлены преимущественно алифатическими УВ и гетеросоединениями с явным доминированием кислородсодержащих структур (табл. 2).

Таблица 2

Состав битумоидов отходов угледобывающего производства  
(% на МНФ ХБА)

Объект	Углеводороды			Гетеросоединения				
	алканы	нафтены	арены	О-содержащие	Н-содержащие	S-содержащие	Hal-содержащие	полиэлементные
Породы отвалов	42,8-52,7	1,2-1,7	4,6-7,3	15,4-49,2	0,8-1,9	0-10,1	1,4-3,1	0-8,0
Водная вытяжка	54,6-62,5	1,7-1,8	отс.	33,2-34,4	0-0,2	отс.	1,4-6,6	0-3,7
Подотвальные воды	16,0-24,2	0-1,1	0,3-0,5	65,1-65,4	4,5-9,7	0-4,1	отс.	4,3-4,4
Шахтные воды	6,4-19,5	0,6-3,2	0-1,1	70,0-84,6	0,4-3,0	0-1,5	0,2-2,8	0-6,1

Алифатические УВ представлены рядом C<sub>10</sub>-C<sub>44</sub> с бимодальным распределением н-алканов (первый максимум C<sub>13</sub>-C<sub>14</sub>, второй C<sub>20</sub>-C<sub>21</sub> или C<sub>35</sub>-C<sub>36</sub>), наличием изоалка-

нов, алкенов и изопреноидов с длиной цепи  $C_{10}$ - $C_{22}$ . Кислородсодержащие соединения включают алифатические нормальные, разветвленные, насыщенные и ненасыщенные спирты карбоновых кислот и их производные. Ароматические кислородные структуры представлены фуранами, фенантренами и фталатами. На долю последних приходится 11,4 -23,9 % углеводородной фракции выщелачиваемых комплексов.

Моделирование поведения системы “порода – вода” показало, что инфильтрующиеся воды выносят целую гамму органических соединений, многие из которых с экологической точки зрения практически не изучены. В качестве основных индикаторов присутствия угольной органики в составе аквабитумоидов могут рассматриваться гидрированные аналоги полициклических ароматических соединений (нафталины, фенантрены, антрацены). Среди идентифицированных структур обращает особое внимание возросшее количество низкомолекулярных, ненасыщенных, галогенированных углеводородов и оксиранов, свидетельствующих об активном протекании в породных отвалах физико-химических и биохимических процессов деструктивного и синтетического характера.

Исследование состава подотвальных вод показало значительный уровень их органического загрязнения: ХБА – 0,80-11,38 мг/дм<sup>3</sup>, НП – 0,20-1,75 мг/дм<sup>3</sup>, бензол – 0,36-0,39 мг/дм<sup>3</sup>, толуол – 0,11-0,17 мг/дм<sup>3</sup>, фенолы – 0,03-0,06 мг/дм<sup>3</sup>. По всей видимости, данное явление обусловлено многоэтапным воздействием атмосферных осадков на породы отвалов, приводящим к поступлению в водную фазу не только легкорастворимых соединений, но и прочно связанных с минеральной матрицей структур. Аквабитумоиды подотвальных вод, в отличие от водных вытяжек пород, более окисленные – на долю смолисто-асфальтеновой фракции приходится до 79%. По данным ХМС в составе ХБА доминируют неуглеводородные структуры, при подчиненном содержании УВ, представленных преимущественно n-алканами ряда  $C_{17}$ - $C_{35}$ . В группе гетеросоединений, как и в водных вытяжках пород, доминируют фталаты, на долю которых приходится 12,2-51,4% фракции. Высокое содержание данных соединений, являющихся, по всей видимости, продуктами трансформации ароматических структур, обусловлено их устойчивостью в условиях гипергенеза. Кроме того, подотвальные воды несут в окружающие геосистемы целый комплекс других ароматических экотоксикантов – алкилированные бифенилы и антрацены, пирен, флуорантен, галогенированные бензолы, бензамины и бензнитрилы, пиперидины, арилсульфокислоты и т.п. Помимо эфиров, экологически опасными являются и другие производные кислот, представляющие собой продукты более глубоких изменений карбоксильных алифатических и ароматических структур. Из их многообразия отметим амиды и нитрилы кислот, галоидированные и сульфированные эфиры и т.д.

Полученные данные свидетельствуют, что преобразование угольно-породных отвалов в условиях гипергенеза приводит к геохимической трансформации природных органических соединений с образованием широкого спектра структур преимущественно кислородсодержащего типа, обладающих высокой растворимостью и миграционной способностью в водной среде.

Таким образом, результаты лабораторного моделирования поведения систем «отходы – вода» свидетельствуют, что вода выступает не только как растворяющая и транспортирующая поллютанты среда, но и как активный реагент, способствующий активизации процессов кислотного дренажа и миграции ТМ и органических соединений. Экспериментально доказано, что при взаимодействии отходов с водой происходит разрушение органо-минеральных комплексов пород, увеличение геохимической подвижности и масштабов эмиссии поллютантов в прилегающие ландшафты и гидросферу, формируя в них очаги загрязнения. Учитывая, что переход соединений в водную фазу является сложным и многоэтапным процессом, зависящим от климатических условий, можно прогнозировать значительную длительность естественного затухания процессов кислотного дренажа, являющегося основным механизмом эмиссии поллютантов в окружающую среду.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бачурин Б.А. Экологические проблемы горнопромышленных районов Пермского края / Б.А. Бачурин // Экология и промышленность России. – 2006. – Апрель. – С. 32-35.
2. Бачурин Б.А. Эколого-геохимические аспекты выщелачивания техногенно-минеральных образований горного производства // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы Всерос. конф. – Томск: Изд-во НТЛ, 2012. – С. 199-202.
3. Бачурин Б.А. Методические особенности контроля органического загрязнения гидросферы (на примере горнопромышленных территорий) / Б.А. Бачурин, Т.А. Одицова // Вестн. Тамбовского ун-та. Сер. Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, № 5. – С. 1646-1649.
4. Имайкин А.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений / Имайкин А.К., Имайкин К.К. – Пермь, Перм. гос. нац. иссл. ун-т., 2013. – 112 с.
5. Максимович Н.Г. Экологические последствия ликвидации Кизеловского угольного бассейна / Н.Г. Максимович, Н.В. Черемных, Е.А. Хайрулина // Географич. вестн. – 2006. – № 2. – С. 128-134.
6. Anawar H.M. Sustainable rehabilitation of mining waste and acid mine drainage using geochemistry, mine type, mineralogy, texture, ore extraction and climate knowledge // Journal of Environmental Management. – 2015. – V. 158. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.04.045.

УДК 553.94:550.84

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.14

Н.Ф. ФЕТИСОВА

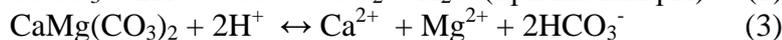
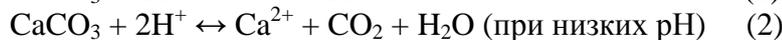
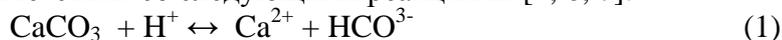
*Горный институт УрО РАН*

### **ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННОЙ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ КИСЛЫХ ШАХТНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ КОСПАШСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА**

Закрытие шахт Кизеловского угольного бассейна и прекращение работы водоотливов повлекло постепенное восстановление уровней визейско-башкирского ( $C_{1v}$ - $C_{2b}$ ) водоносного горизонта и образование ряда восходящих источников, как с чистыми, так и загрязненными водами [1, 2]. В естественных ненарушенных условиях данный горизонт отделён от распространённого ниже водоносного комплекса угленосной толщи водоупорной пачкой битуминозных незакарстованных пород. В зонах крупных разрывных нарушений указанный водоупор нарушается и рассматриваемые гидрогеологические подразделения оказываются гидравлически связанными [2]. Вследствие гидравлической связи с трещинно-карстовыми водами надугольного карбонатного комплекса шахтные воды, при более высоком уровне относительно подземных вод, проникают в горизонты трещинно-карстовых вод и загрязняют их [1]. Слагающие верхневизейский подъярус карбонатные породы способствуют нейтрализации кислых шахтных вод.

С целью оценки масштабов нейтрализации рассмотрены восходящие источники № 29 и № 31, которые в ранее выполненных исследованиях [1, 2] характеризуются как источники экстремально загрязнённых подземных вод. Их разгрузка происходит на участках рельефа, приуроченных к долинам рек Полуденный Кизел и Восточный Кизел, в местах выхода на поверхность карбонатных пород визейского яруса.

Кислота, полученная при окислении пирита, может нейтрализоваться реакцией с кальцитом  $\text{CaCO}_3$ , доломитом  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  и другими карбонатными минералами. Растворение кальцита и доломита шахтными водами приводит к повышению величины рН и концентрации щелочных компонентов ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$ ), а также  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в шахтных водах в соответствии со следующими реакциями [4, 6, 7]:



Повышение рН в результате этих реакций приводит к осаждению металлов в форме гидроксидов, оксигидроксидов и карбонатов [3, 5].

Согласно исследованиям [6, 7] при нейтрализации шахтных вод в известняковых дренажных системах без доступа кислорода по мере увеличения рН до почти нейтральных значений концентрации растворенных  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  и других металлов в шахтных водах обычно снижаются из-за их осаждения или адсорбции, однако концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$ , как правило, не изменяются.

В настоящем исследовании были изучены и обработаны результаты химических анализов проб шахтных вод (шурф 2-бис, ш. Коспашская), незагрязненных (скважина № 5) и загрязненных (групповые восходящие родники № 29 и № 31) подземных вод везейско-башкирского водоносного горизонта. Расположение водопунктов представлено в опубликованных работах [1, 2]. Исходными данными послужили результаты гидрохимического мониторинга Кизеловского угольного бассейна за 2009-2013 гг., выполненные МНИИЭКО ТЭК. Усредненный химический состав подземных и шахтных вод по отдельным водопунктам представлен в таблице.

Таблица

Химический состав подземных и шахтных вод

Водопункт (кол-во проб)	рН	Содержание, мг/дм <sup>3</sup>									
		С.О.	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K	Fe	Al	Mn
Скважина 5 (7)	7,8	170,86	36,71	165,53	35,42	11,50	2,72	0,29	0,09	0,05	0,001
Родник 29 (12)	5,26	10385,0	5602,5	288,88	415,71	459,68	9,37	20,60	1804,26	7,22	30,23
Родник 31 (8)	6,26	5954,7	2870,7	596,88	566,81	345,85	9,66	16,04	862,69	1,96	18,39
Шурф 2-бис (10)	3,39	10835,0	4521,1	-	311,65	318,67	7,27	37,58	2644,7	71,29	34,72

Воды указанных восходящих источников характеризуются слабокислой реакцией среды со средним значением рН=5,7. При этом вода в роднике № 29 более кислая (рН<sub>ср</sub>=5,3), чем в роднике № 31 (рН<sub>ср</sub>=6,3). Воды родников характеризуются близким составом с шахтными водам ш. Коспашская, в то же время они отличаются наличием  $\text{HCO}_3^-$ , который отсутствует в шахтных водах. При этом концентрации гидрокарбонатов в родниках значительно превышают их концентрации в незагрязненных подземных водах (табл.).

Содержание  $\text{Ca}^{2+}$  в водах обоих родников и содержание  $\text{Mg}^{2+}$  в роднике № 29 значительно выше, чем в шахтных и чистых подземных водах. Повышенные концентрации  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  свидетельствуют о более интенсивном растворении кальцита и доло-

мита кислыми водами. В роднике № 29 концентрации  $Mn^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$  сопоставимы с шахтными водами. При разбавлении шахтных вод подземными водами визейско-башкирского горизонта концентрация вышеперечисленных компонентов снизилась бы значительно. В роднике № 31 содержание  $SO_4^{2-}$  и  $Mn^{2+}$  ниже, чем в рассматриваемых шахтных водах ш. Коспашская, что может свидетельствовать как о большей степени нейтрализации и выпадении этих компонентов из раствора, так и о разбавлении. Однако, высокие концентрации  $HCO_3^-$  и  $Ca^{2+}$  противоречат предположению о существенном влиянии разбавления, т.к. в этом случае концентрации  $HCO_3^-$  и  $Ca^{2+}$  также бы уменьшились. Содержание  $Fe_{общ}$  в обоих источниках остается высоким, но в целом ниже, чем в шахтных водах. Концентрация  $Al$  в источниках снижается на порядок по сравнению с шахтными водами.

Таким образом, анализ гидрохимических данных позволяет предполагать, что рассмотренные источники представляют собой разгрузку шахтных вод, поступающих из горных выработок, подвергшихся различной степени нейтрализации при фильтрации в карбонатных породах. При этом их разбавление незагрязненными водами визейско-башкирского горизонта на данных участках незначительно.

Для определения возможной величины pH и концентрации  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$  и  $SO_4^{2-}$  при разбавлении шахтных вод незагрязненными водами визейско-башкирского горизонта было выполнено моделирование смешивания в различных пропорциях с использованием геохимического кода PHREEQC 3.0. При моделировании учитывались данные химических анализов шахтных и подземных вод, отобранных 14.06.2012 г.

На графиках (рис. 1) показаны изменения величины pH и концентрации  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$  и  $SO_4^{2-}$ , полученные в результате моделирования смешивания шахтных и подземных вод. На графике 1а можно видеть, что величина pH достигает значений 5,3-6,3, соответствующих тем, что определены в исследуемых источниках, только при разбавлении шахтных и незагрязненных подземных вод в пропорции более, чем 1 : 9. При таком разбавлении концентрации рассмотренных компонентов оказываются значительно ниже, чем наблюдаемые в источниках (табл.).

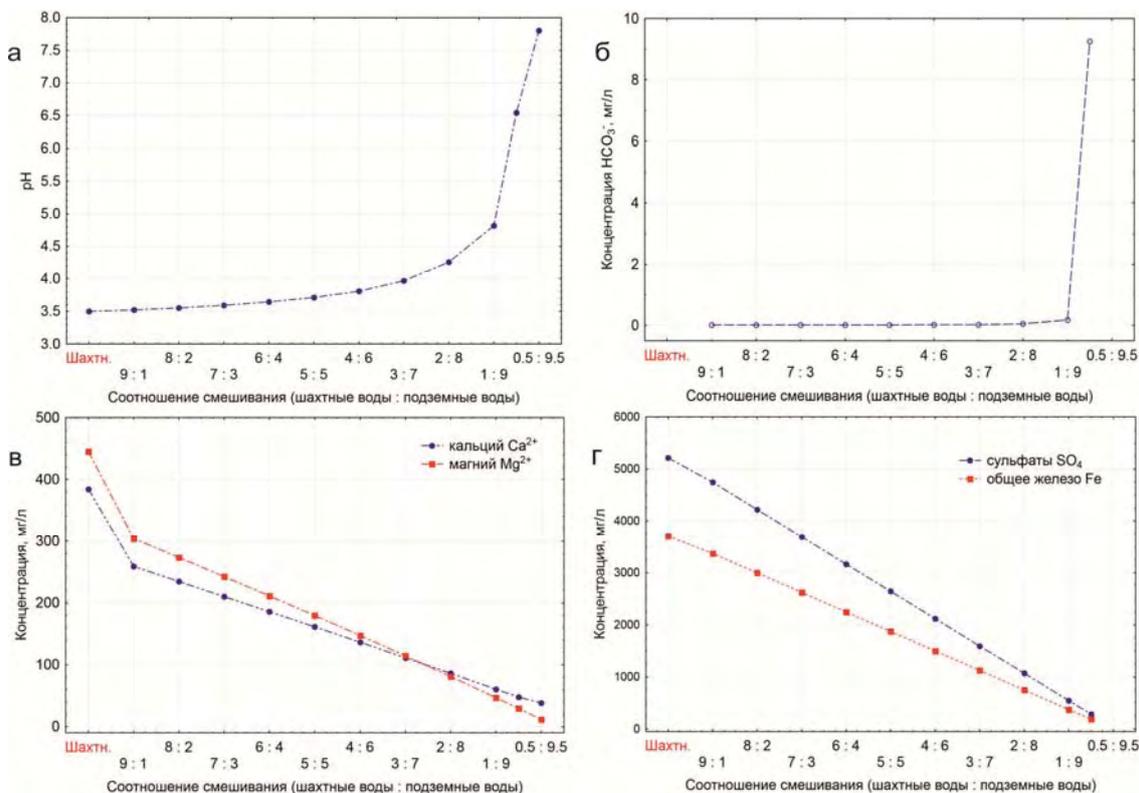


Рис. 1. Моделирование смешивания шахтных и подземных вод

Анализ гидрохимических данных и выполненного моделирования смешивания позволяют утверждать, что формирование химического состава вод источников № 29 и № 31 происходит в большей степени за счет растворения карбонатных минералов кислыми шахтными водами и в меньшей степени за счет разбавления шахтных вод подземными водами визейско-башкирского водоносного горизонта. При взаимодействии шахтных вод с карбонатными породами увеличивается рН раствора (до около нейтральных значений), содержание Са, Mg и HCO<sub>3</sub>, снижаются концентрации Al, Fe<sub>общ</sub>, Mn и ряда микрокомпонентов, в том числе тяжелых металлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имайкин А.К. Гидрогеоэкологические последствия подземной добычи угля на Коспашском месторождении каменного угля // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 2. – С. 419. – URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6075>
2. Имайкин А.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений / Имайкин А.К., Имайкин К.К. – Пермь, Перм. гос. нац. иссл. ун-т., 2013. – 112 с.
3. Фетисова Н.Ф. Особенности техногенного минералообразования в условиях Кизеловского угольного бассейна // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН*. – Пермь, 2016. – С. 65-67.
4. The geochemistry of acid mine drainage / D.W. Blowes, C.J. Ptacek, J.L. Jambor, C.G. Weisener // *Treatise on Geochemistry*. – 2003. – V. 9. – P. 149-204.
5. Acid Mine Drainage: Innovative treatment technologies / prepared by C. Costello; U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office. – Washington, 2003. – P. 5.
6. Cravotta C.A. Limestone drains to increase pH and remove dissolved metals from acidic mine drainage / Cravotta C.A., Trahan M.K. // *Applied Geochemistry*. – 1999. – V. 14., №. 5. – P. 581- 606.
7. Cravotta C.A. Downflow Limestone Beds for Treatment of Net-Acidic, Oxidic, Iron-Laden Drainage from a Flooded Anthracite Mine, Pennsylvania, USA: 1. Field Evaluation / Cravotta C.A., Ward S.J. // *Mine Water and the Environment*. – 2008. – V. 27, №. 2. – P. 67-85.

УДК 550.43:622.363.2

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.15

Т.А. ОДИНЦОВА

*Горный институт УрО РАН*

#### **ГЕНЕТИЧЕСКИЕ РАЗНОСТИ БИТУМОИДОВ СОЛЕЙ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Битумоиды – один из основных компонентов рассеянного органического вещества (РОВ), геохимические характеристики которых позволяют судить как об условиях осадконакопления, так и особенностях постседиментационных преобразований осадочных пород.

Для получения геохимической информации о битумоидах солей был изучен керн контрольно-стволовой скважины № 704-1 Полововодовского участка (принятой условно за фоновую), солеразведочных скважин Палашерского (№ 107г-1) и Белопашнинского (№№ 2202, 2203, 2205-2207) участков, сопряженных с Уньвинско-Шершневской зоной нефтегазонакопления.

Выделение битумоидов из керна проводилось методом холодной экстракции с использованием хлороформа (хлороформенный битумоид ХБА) и спиртобензола (спиртобензольный битумоид СББ). Процедура извлечения битумоидов из солей не унифицирована и на практике используются разные методические подходы, описанные в предыдущих работах [1, 4]. Вещественно-структурный состав битумоидов изучали с использованием ИК-Фурье спектрометра Frontier и газового хроматографа Agilent 6890N MSD 5975.

#### Результаты количественного анализа.

Содержание ХБА в керне скважины № 704-1 изменяется от 6,9-36,5 мг/кг в солях сильвинитово-карналлитовой зоны (СЗ-КЗ) до 244,5-442,4 мг/кг в подстилающей каменной соли (ПдКС). Содержание СББ в соляной части разреза изменяется в диапазоне 6,6-467,1 мг/кг, т.е. вполне сопоставимо с содержанием ХБА, что указывает на присутствие как автохтонной, так и аллохтонной органики [3].

Битуминозность солей Уньвинско-Шершневской зоны нефтегазонакопления значительно выше: содержание ХБА изменяется от 10,5-547,0 мг/кг в солях СЗ-КЗ до 1352,4-2378,0 мг/кг в ПдКС. Максимальная битуминозность в СЗ и КЗ характерна для керна скважины № 107г-1, пробуренной в пределах контура нефтяного месторождения им. Архангельского, что можно связать с присутствием миграционных компонентов. В меньшей степени это проявляется в разрезе скважины № 2202, расположенной в законтурной части Шершневского нефтяного месторождения.

В части образцов был проведен количественный анализ битумоидов нерастворимого остатка (Н.О.) солей. Содержание ХБА<sub>НО</sub> в комплексных образцах керна скважины № 704-1 составляет 17,9-562,9 мг/кг Н.О., в самом керне - 6,9-442,4 мг/кг соли. Несомненно, битуминозность Н.О. солей выше битуминозности самих солей и увеличение содержания Н.О. неизбежно приводит к росту подвижной органики в породах (рис. 1).

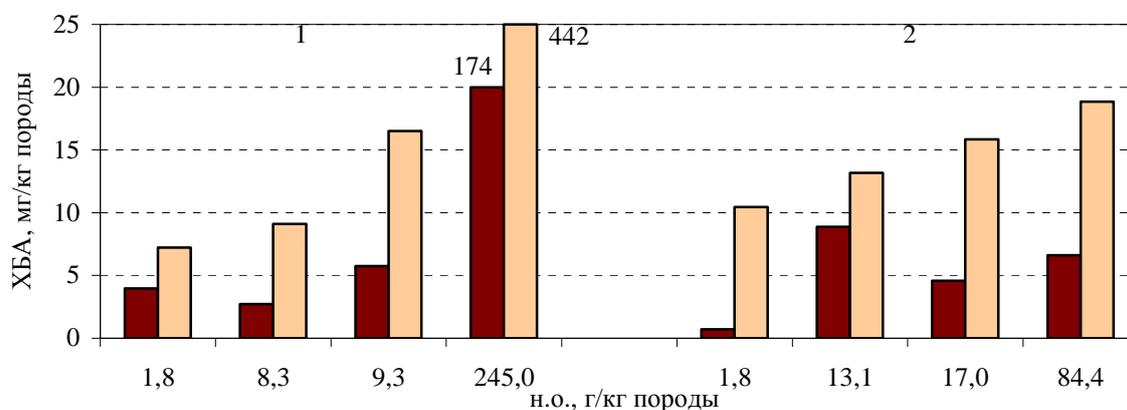


Рис. 1. Содержание ХБА в солях и их нерастворимых остатках  
1 – скв. № 704/1, 2 - скв. № 2205, ■ - соль, ■ - Н.О. соли

Однако расчеты на породу показали, что массовая доля ХБА<sub>НО</sub> в ХБА солей, вскрытых скважиной № 704-1, составляет 29,9-54,8% (среднее значение 39,7%). Можно было бы предположить, что остальные 45,2,6-70,1% ХБА солей генетически связаны с Н.О. и по отношению к хлоридной матрице являются параавтохтонными. В этом случае ХБА<sub>НО</sub> должен нести признаки остаточного битумоида, а ХБА соли, включающий параавтохтонную составляющую, признаки миграционного характера. Но даже по содержанию УВ это не подтверждается: в ХБА<sub>НО</sub> на долю УВ приходится 29,0-88,4% (среднее 57,2%), в ХБА солей – 7,2-88,6% (сред-

нее 29,4%). Приведенные данные свидетельствуют, что битуминозность солей обусловлена не только присутствием глинистого материала, а всем морским биоценозом, хотя вопрос о развитии органической жизни в условиях бассейнов соленакопления является дискуссионным [5]. В керне скважины № 2205 доля ХБА<sub>Н.О.</sub> в ХБА солей составляет 6,7-67,4% (среднее 35,5%) и связь между содержанием Н.О. и его битуминозностью не прослеживается (рис. 1). По всей видимости, рост содержания ХБА в солях в данном случае связан с влиянием миграционных компонентов, которые по отношению к вмещающим отложениям являются, как минимум, аллохтонными.

#### Результаты качественного анализа.

*Фоновая скважина № 704-1.* По данным ИК-спектроскопии в составе ХБА солей доминируют кислородные соединения: на спектрах наиболее интенсивными являются эфирная (1000-1300 см<sup>-1</sup>) и карбонильная (1700-1750 см<sup>-1</sup>) полосы. По данным хромато-масс-спектроскопии (ХМС) в широком наборе О-содержащих соединений наиболее представительными являются простые эфиры, спирты и кислоты, преимущественно в сложноэфирной форме. Наиболее встречаемыми являются кислоты с числом атомов углерода в цепи С<sub>2</sub>-С<sub>18</sub>, т.е. являются продуктами преобразования липидов морского биоценоза. Обнаружены и длинноцепочечные спирты (С<sub>21</sub>-С<sub>23</sub>, С<sub>41</sub>), связанные с восками растительного или животного происхождения. Часть спиртов и кислот имеет ациклическую изопреноидную структуру (фарнезол, дигидрофитол, фарнезановая, фитановая кислоты и т.д.), присущую в основном растительной органике. Имеются и циклические изопреноиды (кислородные производные циклогексенов, бициклопентанов, бициклодеканов и т.д.), но стероиды не обнаружены, хотя фиксируется присутствие холестерина (частота встречаемости 27%). Простые эфиры, оксифиры, кетоксифиры преимущественно циклические, со структурой фурана, тетрагидрофурана, пирана и т.д. Они представляют собой продукты преобразования углеводного материала, на что указывает и разнообразие производных фураноз и пираноз. Ароматические структуры представлены производными фенола, бензальдегида и бензойной кислоты, которые являются меткой высшей растительности.

УВ в битумоидах керна скважины № 704-1 преимущественно алифатические, их содержание в гексановой фракции ХБА составляет 1,8-85,7%, доля цикланов – 0,2-5,1%. Алифатичность – генетический признак сапропелевой органики. Среди алифатики преобладают нормальные (0,8-66,3%) и изопреноидные (0,1-51,5%) алканы. По совокупности геохимических характеристик (молекулярно-массовое распределение,  $\Sigma_{n-C \leq 20} / \Sigma_{n-C \geq 21}$ , нч/ч) установлено, что около 70% n-алканов продуцировано морским планктоном, а остальные – с участием высшей растительности. Поступление континентальной органики в бассейн седиментации отражено на периодическом увеличении коэффициента  $\Sigma_{\text{изопреноанов}} / \Sigma_{\text{n-алканов}}$  до значений 1,47-2,97 и росте гомологов от С<sub>25</sub> и выше в составе n-алканов. Обстановка осадконакопления при этом имела преимущественно восстановительный режим – значения коэффициента пристан/фитан (Pr/Ph) меньше единицы. Коэффициент термической зрелости Pr+Ph/n-C<sub>17</sub>+n-C<sub>18</sub> достаточно высок (0,16-8,49, среднее значение 2,08), что указывает на слабую преобразованность РОВ. Однако, на фоне этой сингенетичной и незрелой органики в солях хаотично встречаются перфторалкилдисульфиды, алкилантрацены, флуорантен, пирен, алкилдибензотиофены и т.п., синтез которых реализуется при достаточно жестких термобарических условиях, что позволяет связать их с флюидными потоками из нижележащей части разреза.

*Скважины №№ 107г-1, 2202, 2203, 2205-2207.* ХБА керна этих скважин характеризуется высоким углеводородным индексом, особенно в части циклических УВ, доля

которых в анализах достигает 11,0-19,5%. Но преобладающей остается алифатика, на долю которой приходится порядка 80% гексановой фракции ХБА. Н-алканы (3,4-57,8%) представлены гомологическими сериями от C<sub>10</sub> до C<sub>44</sub> с максимальным содержанием C<sub>16</sub>-C<sub>18</sub> и C<sub>20</sub>; в единичных образцах максимум приходится на C<sub>25</sub>-C<sub>29</sub> и C<sub>36</sub>. По геохимическим коэффициентам ( $\Sigma n-C \leq 20 / \Sigma n-C \geq 21$ , нч/ч) среди н-алканов преобладают короткоцепочечные четные гомологи, основным продуцентом которых являются липиды морского генезиса, преобразование которых реализуется в восстановительной обстановке эвапоритовых фаций [2].

Ациклические изопреноидные УВ (3,0-41,11%) представлены насыщенными, ненасыщенными, регулярными, нерегулярными структурами i-C<sub>11</sub>, i-C<sub>12</sub>, i-C<sub>15</sub>-i-C<sub>22</sub>, i-C<sub>24</sub>, i-C<sub>25</sub>, i-C<sub>30</sub>, i-C<sub>39</sub>. Преобладают Ph и Pr, коэффициент отношения которых для 79% анализов имеет значения 0,27-0,99. Доля низших структур ( $\leq i-C_{16}$ ), генерация которых реализуется при достаточно глубоком окислении фитола, мала и лишь в единичных образцах достигает 25-31% от суммы изопреноидных.

Расчеты геохимических коэффициентов нормальных и изопреноидных алканов показали, что отношение  $\Sigma$ изопреноиды/ $\Sigma$ н-алканы = 0,09-0,98 (среднее значение 0,50), т.е. органика достаточно зрелая. Вместе с тем, коэффициент термической зрелости Pr+Ph/n-C<sub>17</sub>+n-C<sub>18</sub> и индексы созревания Pr/n-C<sub>17</sub>, Ph/n-C<sub>18</sub> достаточно высоки и отвечают низкой степени преобразования РОВ. Для 75% анализов Pr+Ph/n-C<sub>17</sub>+n-C<sub>18</sub> = 1,15-5,09 (среднее 2,24), Pr/n-C<sub>17</sub>=0,64-2,92 (среднее 1,20), Ph/n-C<sub>18</sub>=1,18-26,73 (среднее 4,88). Значения этих показателей увеличиваются вниз по разрезам скважин, что обусловлено снижением н-алканов и ростом изопреноидов в ХБА керна с глубиной (рис. 2, 3).

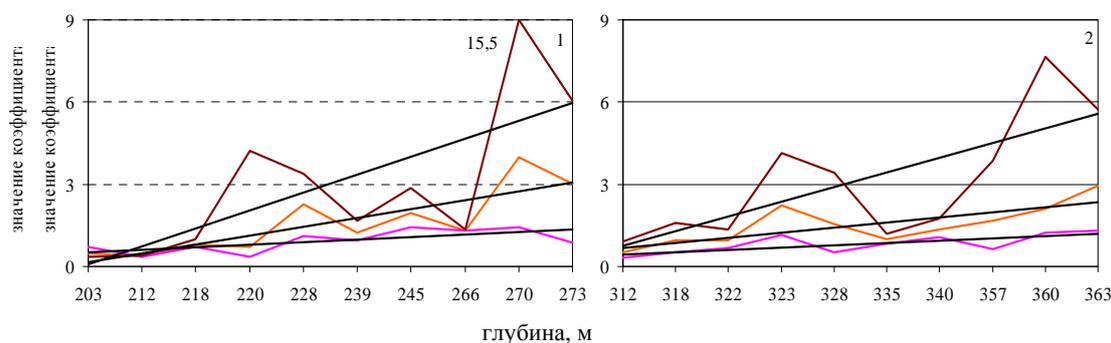


Рис. 2. Характер изменения геохимических коэффициентов по разрезу 1- скв. № 2202, 2 - скв. №2207, — термический коэффициент Pr+Ph/n-C<sub>17</sub>+n-C<sub>18</sub>, индексы созревания: — Ph/n-C<sub>18</sub>, — Pr/n-C<sub>17</sub>, — линия тренда

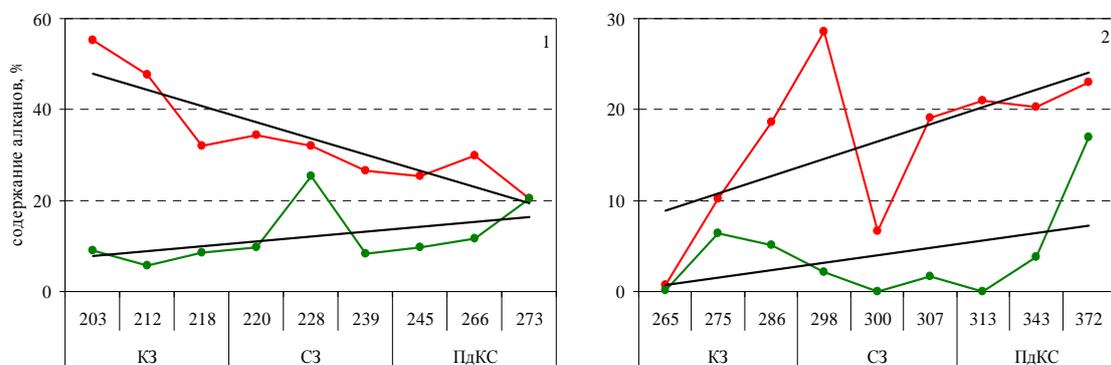


Рис. 3. Характер изменения нормальных и изопреноидных алканов по разрезу 1 - скв. № 2202, 2 - скв. № 704/1, — н-алканы, — изопреноиды, — линия тренда

В ХБА керна фоновой скважины № 704-1 тенденция в части n-алканов обратная, даже без учета высоких показателей маркирующей глины (рис. 3). Учитывая, что температуры в пределах соленосной части разреза достаточно близкие, выявленные факты можно объяснить только поступлением миграционных компонентов из нижележащей части разреза. Причем в их составе присутствуют не только алифатические УВ, влияние которых на геохимию битумоидов проявилось наиболее ярко. Среди нафтенов идентифицированы адамантаны (метил-, этиладамантаны; функциональные производные с O, N, S), наиболее разнообразные в ХБА керна скважины № 2202. Среди аренов присутствуют карбо- и гетероциклические структуры (метилфлуорены, метилантрацены, метилбензотиазолы, бензокарбазолы и т.д.) с максимальным содержанием в карналлите пласта Д скважины № 107г-1.

Таким образом, на отдельных участках зоны нефтегазонакопления в составе ХБА солей зафиксированы соединения, синтез которых в термобарических условиях соляной толщи достаточно проблематичен, что позволяет связать их с разгрузкой флюидных потоков из нижележащей части разреза, в том числе и нафтидного типа.

#### Выводы:

- в соответствии с генетической классификацией рассеянного органического вещества битумоиды солей Верхнекамского месторождения относятся преимущественно к сапропелевым, сингенетичным вмещающим отложениям;

- битумоиды преимущественно автохтонные, продуцированные органическим материалом морских фаций, и в разной мере содержащие аллохтонный континентальный гумус;

- геохимическая характеристика нормальных и изопреноидных алканов крайне изменчивы, что сложно объяснить первичными факторами – генетическими особенностями исходного биогенного ОВ, условиями его fossilization и преобразования в геомолекулярные формы;

- одной из наиболее вероятных причин геохимического разнообразия является воздействие на сингенетичную органику соляных пород флюидных потоков из нижележащей части разреза, являвшихся носителями геохимически активных веществ с высоким энергетическим потенциалом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бачурин Б.А. Методические особенности изучения органического вещества солей / Б.А. Бачурин, Т.А. Одинцова // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского, посвящ. 200-летию РМО / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2017. – Вып. 20. – С. 289-296.

2. Ильинская В.В. Генетическая связь углеводородов органического вещества пород и нефтей. – М.: Недра, 1985. – 160 с.: ил.

3. Методическое руководство по люминесцентно-битуминологическим и спектральным методам исследования органического вещества пород и нефтей. – М.: Недра, 1979. – 204 с.: ил.

4. Одинцова Т.А. Особенности органического вещества солей зон нефтегазонакопления / Т.А. Одинцова, Б.А. Бачурин // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2018. – Вып. 21. – С. 443-450.

5. Федоров Ю.А. Рассеянное органическое вещество пород древних солеродных бассейнов // Физико-химические закономерности осадконакопления в солеродных бассейнах. – М., 1986. – С. 3-12.

А.А. БОРИСОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ВАРИАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА  
В ПОЧВЕННЫХ ГАЗАХ  
ПЕРМСКОГО ПРИКАМЬЯ**

Почва почти всегда содержит большое количество пор (10-60% объема), частично заполненных водой и газами. Состав почвенных газов, с одной стороны, определяется скоростью биохимических процессов, происходящих в почве, с другой поступлением газов из атмосферы и подстилающих материнских пород. Однако по своему составу почвенный воздух значительно отличается от атмосферного воздуха, причем, несмотря на быстрый газовый обмен, не происходит выравнивание концентраций газов в почве и атмосфере. Это отображается в специфике компонентного состава почвенного воздуха, который имеет значительно большее количество углекислого газа, меньшее количество кислорода, и примерно близкое атмосферному воздуху количество азота. Кроме того, почвенный воздух всегда содержит небольшое количество летучих органических соединений (ЛОС) [1].

Поскольку на формирование состава газов в почвах оказывают влияние экзогенные и эндогенные процессы различной интенсивности и направленности, модельные лабораторные исследования с определенной степенью достоверности позволяют дать количественную оценку газосодержания почвы, т.е. оценить естественные процессы формирования природного приповерхностного газового фона [2].

На территории Пермского Прикамья изучение состава почвенных газов выполнялось в рамках различного вида работ, и их география достаточно обширна. Было установлено, что формирование газогеохимических аномалий и динамика изменений концентраций в почве таких компонентов, как метан, тяжелые углеводороды, гелий и других, связаны с проявлением и активизацией различных природных и техногенных процессов [3].

Для территории Пермского Прикамья характерно господство подзолистого процесса почвообразования, обусловленного существующей физико-географической обстановкой. Материнскими почвообразующими породам являются покровные суглинки, элювиально-делювиальные отложения, водно-ледниковые отложения, элювий коренных пород, современные аллювиальные и делювиальные отложения [4]. Наиболее распространёнными являются дерново-подзолистые почвы. Они имеют тяжелый механический состав и формируются чаще всего на некарбонатных покровных глинах и тяжелых суглинках.

Газовый состав данных почв достаточно разнообразный, но прослеживаются следующие закономерности:

- в центральных районах дерново-подзолистые почвы, сформированные на рыхлых образованиях, характеризуются пониженным содержанием в газовом составе диоксида углерода;
- дерново-среднеподзолистые почвы, развитые в центральных и южных территориях и сформированные на некарбонатных породах, характеризуются более высоким содержанием диоксида углерода.

Подзолистые почвы широко распространены в северных районах Пермского Прикамья. Сильно- и среднеподзолистые почвы тяжёлого механического состава данных районов в составе почвенных газов содержат мало диоксида углерода и углеводородных компонентов, что объясняется слабой интенсивностью микробиологических

процессов и малым количеством гумуса. Для слабоподзолистых почв восточной части Пермского Прикамья так же характерно достаточно низкое содержание этих газовых компонентов, что возможно связано с тем, что материнскими почвообразующими породами являются покровные глины и тяжелые суглинки.

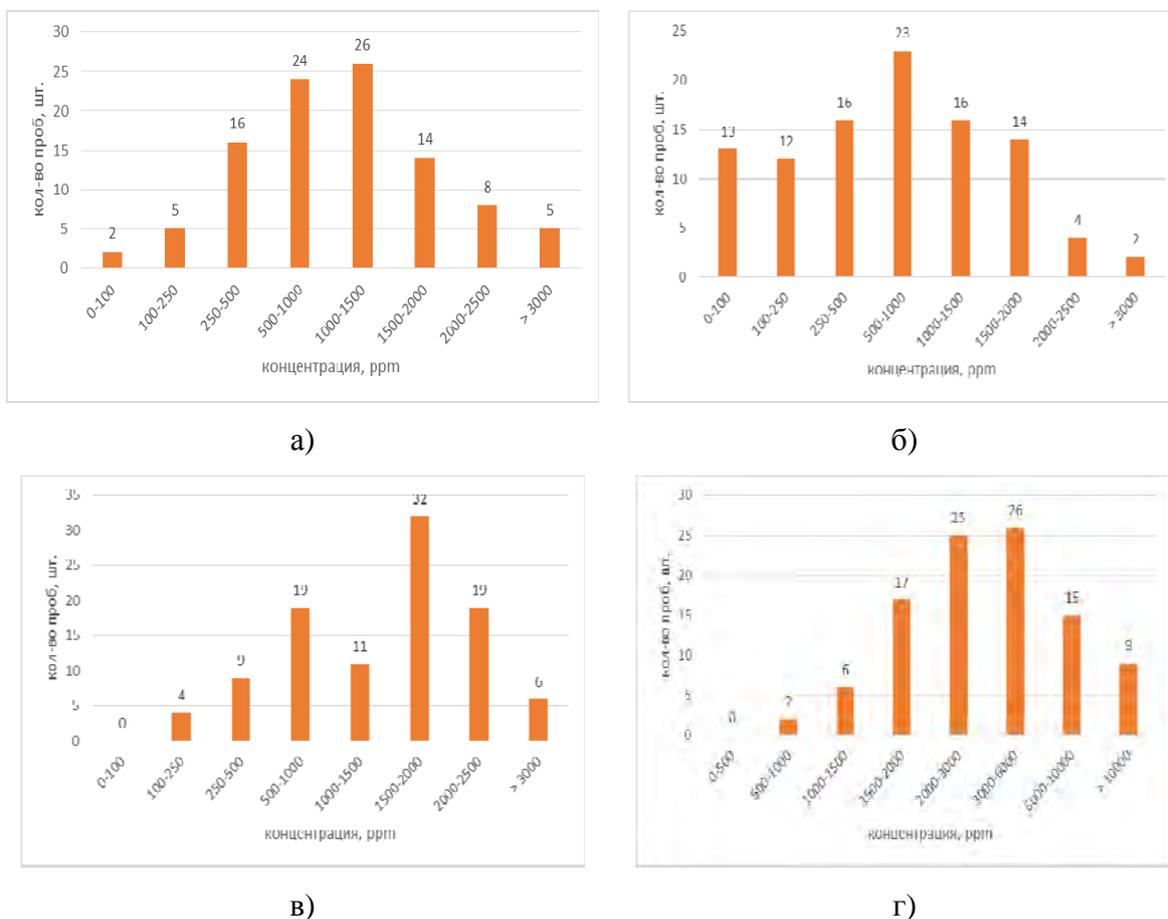


Рис. 1. Гистограммы распределения диоксида углерода в почвенных газах Пермского Прикамья  
а – дерново-подзолистые почвы; б – подзолистые почвы;  
г – почвы лесостепи; д – почвы торфяного типа.

Достаточно отличными от других являются темноцветные почвы кунгурской лесостепи. Материнскими почвообразующими породами являются покровные некарбонатные глины и тяжелые суглинки, содержащие углекислую известь в виде включений. Почвенные газы данных почв характеризуются повышенным содержанием в своем составе диоксида углерода.

Почвы болотного и торфяного типа распространены довольно широко на рассматриваемой территории. Для них характерным является чрезвычайно высокое содержание в составе почвенных газов компонентов, связанных с процессами преобразования органического материала. Концентрации диоксида углерода в данных почвах значительно превышают его содержание в других типах почв. Характерной особенностью данных почвенных газов является наличие большого количества сингенетического метана.

В целом для почвенных комплексов Пермского Прикамья наблюдается значительная неравномерность содержания диоксида углерода. По уровню снижения содер-

жания в почвенных газах диоксида углерода почвы можно распределить следующим образом: болотные и торфяные почвы – почвы лесостепи – дерново-подзолистые – подзолистые.

Представляет интерес изучение изменчивости содержания диоксида углерода в почвенных газах от техногенных факторов. Теоретически данный газогеохимический показатель может отражать поступление глубинного газа, выделяющегося при деформации карбонатных отложений в пределах мульд оседания на шахтных полях Верхнекамского месторождения солей. О реальности данных процессов свидетельствуют результаты поинтервального опробования шпуров с помощью экспресс-газоанализатора Escorprobe-5: на многих пикетах максимальные концентрации диоксида углерода приурочены к нижней части почвенного разреза (глубины 30-50 см). Вместе с тем, как показывают данные автоматизированной станции газогеохимического мониторинга, в отличие от углеводородов, четкой связи изменчивости содержания диоксида углерода в подпочвенном воздухе от характера деформации породного массива не отмечается (рис. 2).

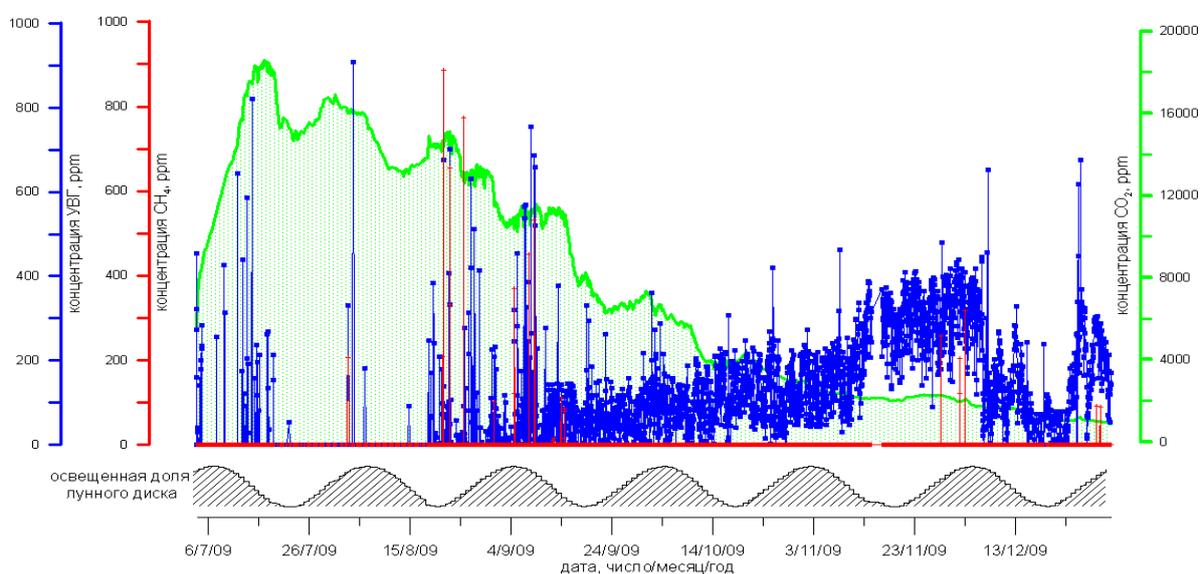


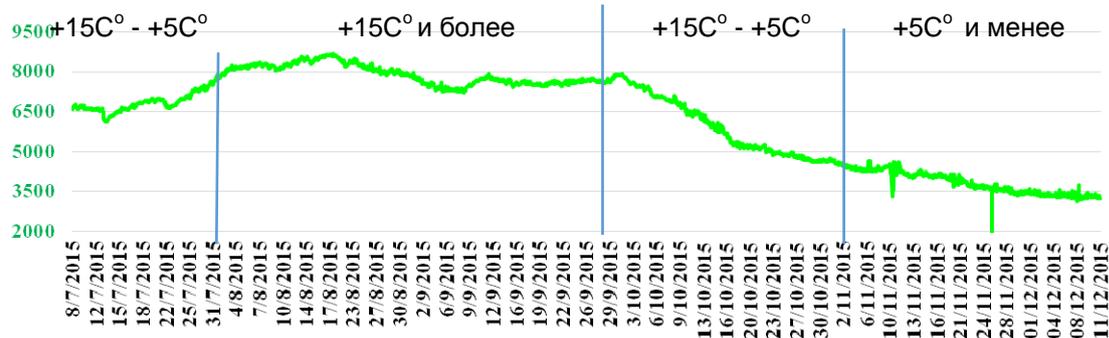
Рис. 2. Характер временной изменчивости компонентов подпочвенного воздуха в пределах мульды оседания подработанного породного массива

По всей видимости, на временную флуктуацию диоксида углерода в приповерхностной части разреза значительное влияние оказывают метеорологические факторы, маскирующие глубинное влияние (рис. 3).

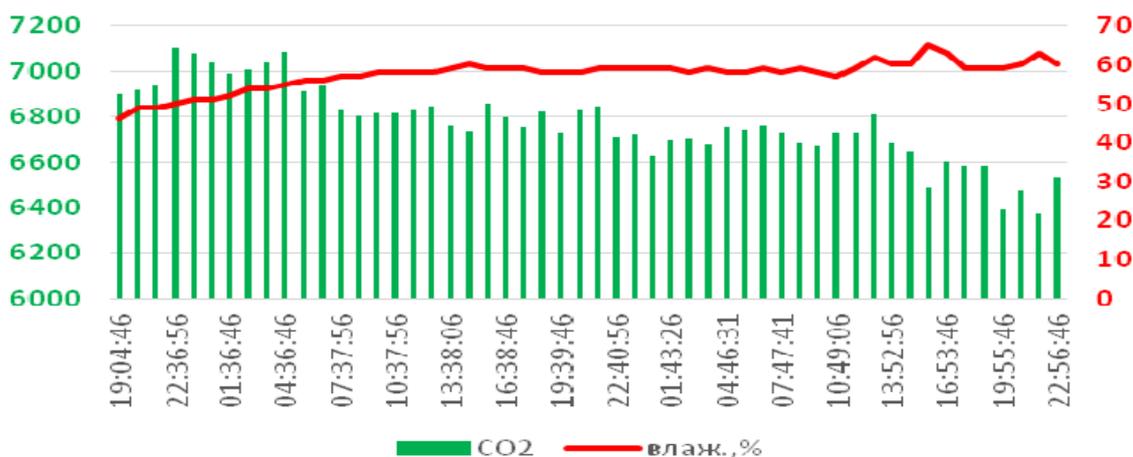
Из числа данных факторов основное влияние оказывает температура воздуха, контролирующая активность жизнедеятельности почвенной микрофлоры, одним из продуктов которой является углекислый газ. Как видно из рис. 3а, снижение температуры приводит к «затуханию» активности почвенной микрофлоры и соответственно концентрации диоксида углерода в почвенных и подпочвенных газах (минимум в зимний период).

Менее четкая связь прослеживается с влажностью – более высокая концентрация диоксида углерода характерна для «сухих» периодов, характеризующихся отсутствием или низкой интенсивностью атмосферных осадков.

Связь содержания в почвенных газах диоксида углерода с изменением барометрического давления не прослеживается.



а) температура воздуха



б) влажность

Рис. 3. Сопоставление содержания в почвенных газах диоксида углерода с метеорологическими факторами

Таким образом, для привлечения диоксида углерода в качестве газогеохимического показателя процессов техногенеза в геологической среде Верхнекамского месторождения требуются более детальные режимные наблюдения, позволяющие уточнить влияние экзогенных и эндогенные факторов на его изменчивость.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский Г.В. Функции почв в биосфере и экосистемах / Г.В. Добровольский, Е.Д. Никитин – М.: Наука, 1990. – 258 с.
2. Глаголев М.В. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера: учеб. пособие / М.В. Глаголев, А.Ф. Сабреков, В.С. Казанцев. – Томск: Изд-во гос. пед. ун-та, 2010. – 102 с.: ил.
3. Борисов А.А. Оценка влияния природных факторов на особенности «газового дыхания» недр // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 68-70.
4. Коротаев Н.Я. Почвы Пермской области. – Пермь: Перм. кн. изд-во, 1962. – 278 с.

А.Ф. СМЕТАННИКОВ, Д.В. ОНОСОВ, Е.Ф. ОНОСОВА  
*Горный институт УрО РАН*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ  
КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ  
ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР, МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ И КАРТОФЕЛЯ**

Плодородие почв связано с наличием комплекса питательных компонентов: азот, фосфор и калий (N, P, K), компонентов-мелиорантов (доломит, ангидрит) и микроэлементов (в основном халькофильных). От необходимого и достаточного наличия всех упомянутых компонентов зависит плодородие почв и их возможность произвести полноценный урожай. Данные свойства обусловлены природным плодородием почв, либо восстановлением плодородия почв путем внесения недостающих компонентов и, в первую очередь, удобрений (питательных компонентов). Необходимость внесения упомянутых компонентов диктуется особенностями агрохимических свойств почв конкретных регионов. Острая необходимость, внесения всего комплекса существует для почв Пермского края и других северных регионов России, где более 70% почв являются кислыми дерново-подзолистыми.

Ранее ГИ УрО РАН была предложена программа по утилизации глинисто-солевых отходов (шламов) после переработки К-Mg руд с целью извлечения благородных металлов и использования в качестве удобрений пролонгированного действия. Была разработана технология переработки шламов [1,2].

Из состава шламов следует, что в них присутствует весь комплекс компонентов – удобряющих (K, Ca), мелиорирующих (доломит, гипс, ангидрит) и микроудобрения. Определенный диссонанс вносит отсутствие двух компонентов из триады питательных – фосфор (P) и азот (N). Компонентами шламов, препятствующими использованию их непосредственно в качестве удобрений, является наличие остаточных технологических реагентов и хлоридов калия и натрия.

Разработанная технология способствует преобразованию шламов в экологически инертные материалы, сохраняющие весь комплекс описанных выше компонентов.

Основной способ переработки – высокотемпературный обжиг. При обжиге происходит твердофазное преобразование минеральной массы и на основе хлоридов, сульфатов, доломитов формируется новообразованные минералы – пироксен, сингенит, афтиталит, мелилит, включающие K и Na из состава разрушенных хлоридов, доломита, гипса. При этом хлор уходит в возгоны. Т.е. в обожженном материале практически не остается хлоридов, как минералов, и хлора, как элемента, а также части других исходных минералов. В таблице 1 показан общий процесс преобразования шлама в «огарок», используемый в качестве комплексных удобрений пролонгированного действия.

Таблица 1

Состав шламов и продуктов их переработки, масс. %  
(по данным РКФА)

<i>Обезвоженный шлам</i>							
ангидрит	кварц	КПШ	доломит	галит	сильвин	пирит	хлорит
22	16	18	14	11	16	2	1
<i>Гранулят (продукт обогащения)</i>							
ангидрит	кварц	КПШ	доломит	галит	сильвин	пирит	хлорит
25	16	22	18	3	8	4	3
<i>Огарок (продукт обжига гранулята)</i>							
ангидрит	кварц	КПШ	пироксен	галит	сильвин	мелилит	-
2	12	22	46	1	8	8	

Были применены разные температуры обжига для выявления оптимальных параметров, соответствующих прогнозируемым свойствам продуктов переработки шламов (огарков), как удобрений. В таблице 2 показан состав огарка при разных температурах обжига. Наиболее оптимальный режим обжига 900<sup>0</sup>С. При этой температуре происходит формирование максимального количества сингенита – водного сульфата калия и кальция. Базой для формирования сингенита являются сильвин, галит и ангидрит. Т.е. минеральный материал обожженного гранулята характеризуется «уходом» хлора и формированием новых калиевых и кальциевых минералов. Растворимость последних в почвах больше, чем КПШ, но несравнимо меньше, чем хлоридов калия.

Немаловажным является то обстоятельство, что поступление калия в почву, учитывая низкую растворимость этих двух минералов низкая (соответственно КПШ наиболее труднорастворим, сингенит менее), Следовательно, низкие дозы огарка неэффективны, но при внесении оптимальных доз, можно прогнозировать действие одного внесения на 4-8 лет. В этом явлении заключается смысл понятия «удобрения пролонгированного действия».

Таблица 2

Состав огарка при разных температурах обжига, масс. %  
(по данным РКФА)

t <sup>0</sup> С	Минеральный состав (прибл. вес. %)									
	кварц	КПШ	доломит	галит	сильвин	ангидрит	гематит	пироксен	*сингенит	слюда
600	10	18	8	5	4	44	2	13		1
800	9	15	5	3	4	40	2	19	2	1
900	8	13	2	1	2	18	2	43	8	

\*Сингенит –  $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$

В качестве конечного продукта получен огарок (рис.1).

Огарок можно использовать: 1) в качестве мелиоранта для нейтрализации кислотности почв и улучшения агрофизических свойств; 2) в качестве калиевых и кальциевых удобрений пролонгированного действия; 3) как микроудобрения, содержащие добавки халькофильных элементов (Cu, Zn). В силу указанных свойств их можно использовать как комплексные удобрения пролонгированного действия.

Удобрения могут быть использованы для кислых дерново-подзолистых почв Пермского края и севера России под картофель, под зерновые культуры и многолетние

травы. Кроме того, эти удобрения могут быть использованы в районах с аридным климатом и вулканическими почвами, также как удобрения пролонгированного действия под многолетние культуры.



Рис. 1. Огарок обожженный при температуре 900<sup>0</sup>С

Испытания удобрений проводились в несколько стадий:

- анализ в Пермском НИИ сельского хозяйства;
- лабораторные испытания в растильнях на проростках ячменя;
- в качестве укрывных материалов для солеотвалов;
- микроделяночные испытания на зерновых культурах (пшеница, ячмень);
- микроделяночные испытания на картофеле по Госзаданию № 007-015-44-17-05 от 07.12.2017 г.

Агрохимический анализ был проведен в Пермском НИИ сельского хозяйства, который показал, что продукт переработки отходов – огарок содержит в своем составе питательные компоненты (калиевый полевой шпат), мелиорирующие компоненты (доломит, ангидрит) и микроудобрения в качестве халькофильных элементов.

Лабораторные испытания проводились в растильнях на слое почвы:

1. 0 (без удобрений); 2. NPK; 3. NP+1 г. огарка; 4. NP+2 г. огарка.

Испытания показали, что исследуемые продукты имеют щелочной характер (7,6), растворимость 11,06 г/г (за месяц).

Всходы появились на 5 день после посева. В вариантах с огарком они были более дружные, чем на контроле.

Важным показателем влияния почвенной среды, применения химикатов является длина проростков корней. Этот показатель был выше по сравнению с контролем на 15-18%.

Сравнительная оценка огарка с традиционными удобрениями (ам. селитра, суперфосфат простой, хлористый калий) показала, что они по эффективности не уступают, т.е. появление и количество всходов, длина корней, прирост сухого вещества были одинаковыми с вариантом NPK (разница в пределах ошибки опыта).

Для использования в качестве укрывного материала огарки необходимо смешивать с почвой, поскольку продукты выветривания солеотвалов не могут быть использованы как среда для прорастивания многолетних трав и зерновых культур в силу того, что хлоридная составляющая составляет до 50% в верхней части солеотвала.

Смешивание продуктов переработки шламов (огарков) со стандартной почвой способствует прорастанию семян многолетних трав и ячменя в пропорции 50х50%, но слой нанесения толщиной 10 см не является эффективным т.к. корневая система, как трав, так и ячменя развивается на глубину 10 см и, достигая поверхности отвала, угнетается.

Главным выводом испытания является зависимость сочетания смеси огарка и стандартной почвы в пропорции 50х50% и толщиной продуктивного слоя не менее 20 см.

В этом случае корневая система трав и зерновых культур развивается свободно, и данный состав может быть использован в качестве укрывных материалов для солеотвалов и среды для выращивания многолетних трав с целью рекультивации солеотвалов. На рис.2 показаны результаты прорастивания многолетних трав на грунте (контроль) и на слое огарка с подложкой из материала солеотвала.



Рис. 2. Лабораторные исследования огарка

а) контроль грунт;

б) в подложке поверхностный слой солеотвала, на нем слой композита (огарок + почва)

Стандартное калийное удобрение (хлористый калий) в рекомендуемой дозе для зерновых культур 60 кг/га повысило урожайность более чем в 2 раза по сравнению с контролем, с фоном на 15 и 17% соответственно. Применение отходов калийной промышленности способствовало формированию урожайности зерновых культур на уровне стандартного удобрения KCl. Прибавка урожая яровой пшеницы по сравнению с контролем составила 1,42-1,78 т/га, с фоном 0,23-0,28 т/га, ячменя – 1,30-2,02 и 0,34-0,47 т/га соответственно.

Внесение низких доз калийных удобрений было неэффективным, так как содержание обменного (доступного) для растений калия в почве было высоким.

Таким образом, применение отходов калийной промышленности в рекомендуемой дозе под зерновые культуры в качестве удобрения является эффективным приемом, так как повышается урожайность зерновых и решается экологическая проблема утилизации отходов [3].

В таблице 3 приведены результаты испытаний.

Таблица 3

Результаты испытаний огарков в качестве удобрений  
продолженного действия

Варианты	Яровая пшеница					Ячмень				
	урожай- ность	прибавка				урожай- ность	прибавка			
		к контролю		к фону			к контролю		к фону	
		т/га	%	т/га	%		т/га	%	т/га	%
Без удобрений- контроль	1,68	-	-	-	-	2,04	-	-	-	-
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> - фон	3,18	1,50	89	-	-	3,59	1,55	76	-	-
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>KCl</sub> 30	3,30	1,62	96	0,12	4	3,83	1,79	88	0,24	7
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> K <sub>KCl</sub> 60	3,65	1,97	117	0,47	15	4,21	2,17	106	0,62	17
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> +УЛТП-1 30	3,18	1,50	89	-	-	3,34	1,30	64	-	-
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> +УЛТП-3 30	3,10	1,42	84	-	-	3,38	1,34	66	-	-
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> +УЛТП-1 60	3,46	1,78	106	0,28	9	4,06	2,02	99	0,47	13
N <sub>60</sub> P <sub>60</sub> +УЛТП-3 60	3,41	1,73	103	0,23	7	3,93	1,89	93	0,34	9
НСР <sub>05</sub>		0,21					0,38			

В 2017 году проводились микроделяночные испытания огарков в качестве удобрений продолженного действия для картофеля на полях ПНИИСХ, по следующей схеме:

1. б/у; 2. пр+фон (без Калия); 3. прк (90 кг); 4. пр+ог.1 (60 кг/га); 5. пр+ог.1 (90 кг/га); 6. пр+ог.1 (120 кг/га); 7. пр+фон (без Калия); 8. пр+ог.2 (60кг/га); 9. пр+ог.2 (90 кг/га); 10. пр+ог.2 (120 кг/га); 11. пр+фон (без Калия); 12. пр+ог.3(60кг/га); 13. пр+ог.3 (90 кг/га); 14. пр+ог.3 (120 кг/га);

Три гнезда – 1,75 м<sup>2</sup>. Таких гнезд 14 в одной линейке умножаем на три = 42 гнезда в одном варианте. Всего таких вариантов – 6 повторений. Общая площадь опытного участка получается 42х6=250 м<sup>2</sup>.

Испытания показали, что картофель без удобрений развивается значительно хуже, чем с внесением удобрений в комплексе азот-фосфор-огарок (К) и азот-фосфор-калий (традиционный комплекс). Последние два выглядят одинаково, но это показывает, по крайней мере, одинаковое воздействие. Результаты оценивались после сбора урожая путем сравнения веса клубней, качества и анализа высушенных клубней (агрохимический анализ) и продуктов озоления клубней и ботвы с последующим анализом состава примесей. На рис.3 показаны микроделянки посадок. Общая площадь испытаний 250 м<sup>2</sup>.



Рис. 3. Посадки картофеля с использованием удобрений пролонгированного действия  
1. б/у; 2. пр-фон; 3. прк; 4. пр+ог.1(60кг/га); 5. пр+ог.2 (90 кг/га); 6. пр+ог.2 (120 кг/га)

#### **Выводы:**

Испытания огарков в качестве удобрения пролонгированного действия, проведенные в рамках настоящих исследований, дало в целом положительный результат, поэтому их можно применять наряду с удобрениями стандартного типа. Дополнительным достоинством огарков, как удобрений, является наличие в них большого количества микроэлементов необходимых для растений. В то время как в стандартных удобрениях эти микроэлементы отсутствуют. Кроме того, к уникальным свойствам огарков можно отнести наличие минералов мелиорантов, что в условиях кислых дерново-подзолистых почв Пермского края и севера России в целом имеет огромное значение.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Способ получения коллективного концентрата: пат. 2530923 Рос. Федерация: МПК С 22 В11/00 (2006.01) / Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Синегрибов В.А., Новиков П.Ю., Семенов А.А.; патентообладатель ГИ УрО РАН. – № 2013121966/02. заявл. 13.05.2013; опубл. 20.10.2014. – Бюл. № 29.
2. Способ переработки отходов калийного производства: пат. 2497961 Рос. Федерация: МПК С 22 В 11/00 (2006.01), С 22 В 7/00 (2006.01) / Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Синегрибов В.А., Косолапова А.И., Новиков П.Ю., Семенов А.А.; патентообладатель ГИ УрО РАН. – № 2012142039/02. заявл. 02.10.2012; опубл. 10.11.2013.
3. Результаты испытаний отходов переработки калийно-магниевых руд в качестве удобрений пролонгированного действия / А.Ф. Сметанников, А.И. Косолапова, Е.М. Митрофанова, Б.А. Бачурин, Д.В. Оносов, Д.С. Фомин, В.Р. Ямалтдинова, Д.Г. Шишков, Е.Ф. Оносова // Вестн. Перм. науч. центра. – 2017. – № 4. – С. 58-63.

А.С. БОРИСОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОЛОТА  
В ТЕРРИГЕННО-КАРБОНАТНЫХ КОМПЛЕКСАХ  
НА ЗАПАДНОМ СКЛОНЕ УРАЛА**

Поиск и выявление новых месторождений золота во всем мире является одним из приоритетных направлений для исследования. «Карлинский» тип месторождений золота, относительно недавно открытый в США (в 1960 году) в силурийских терригенно-карбонатных толщах, уже приобрел мировое значение, так как за последние годы добыча золота из месторождений «карлинского» типа только в США составляет 9-10% от общемировой добычи золота [1].

В представляемом материале показаны результаты изучения распределения золота на одном из участков на Западном склоне Урала. Основной целью проводимых работ были поиски месторождений золота «карлинского» типа».

Месторождение золота классического «карлинского» типа имеют несколько характерных особенностей:

1) большинство месторождений «карлинского типа» локализовано в силур-девонской формации Роберт Маунтинс (Roberts Mountains Formation), которая и контролирует, в основном, положение золотоносной провинции [2];

2) это гидротермально-метасоматические (стратиформные) месторождения золота – мышьяковисто – сульфидных руд, с тонкодисперсными выделениями золота в сульфидных;

3) месторождения приурочены к окремнелым битуминозным терригенно-карбонатным толщам палеозойского возраста [3].

На территории СНГ выделены аналоги месторождений «карлинского» типа»:

1) месторождение золота Суздальское [4,5];

2) месторождение Большевик [6];

3) месторождение золота Сухой лог;

4) месторождение Майское [7].

Эти месторождения выделялись, как аналоги месторождений «карлинского» типа, по характерным особенностям локализации и составу пород:

– битуминозные (углистые) терригенно-карбонатные породы

– положение в зоне пассивной континентальной окраины, осложненной валлообразным поднятием (возможно, форма проявления разломов)

– сульфидный (преимущественно пирит-арсенопиритовый) состав руд с тонкодисперсными выделениями золота в сульфидных.

Перспективный участок (Ольховский) находится в Пермском крае, на территории Горнозаводского района, севернее поселка Пашия.

Располагается в висячем крыле Боровухинского надвига в пределах синклиальной структуры северо-северо-западной ориентировки, ограниченной и осложнённой разрывными нарушениями той же ориентировки. Вмещающие породы представлены известняками (реже доломитами) франского и фаменского ярусов верхнего девона. В мульде синклинали, выходят доломитизированные известняки турнейского яруса, перекрываемые переслаивающимися аргиллитами, алевролитами и песчаниками западно-уральской свиты визейского яруса нижнего карбона. Характерной особенностью является высокое содержание битуминозного вещества.

Участки благороднометальной минерализации имеют площадной характер развития и представлены собственно сульфидной минерализацией. Наиболее высокие содержания связаны с зонами разломов, секущих вмещающие терригенно-карбонатные породы.

Золотоносность связана с сульфидной минерализацией как в классическом «карлинском типе», а так же выявлена в органических образованиях (битумах).

Сульфидная минерализация представлена, в основном, пиритом нескольких генераций. Золотоносными являются пирит, реже сфалерит ранней тонкозернистой генерации, содержащей мышьяк. Мышьяковистый пирит приурочен, в основном, к зонам гидрослюдистой проработки, доломитизированные разности не содержат мышьяковистый пирит.

С зонами разломов так же связано проявление углеродисто-гидрослюдистого метасоматоза (аргиллизации), выраженного в виде разнонаправленных углеродисто-гидрослюдистых прожилков и жил различной мощности и интенсивности. Проявление метасоматоза связывается с процессами активизации, протекавшими в пермское и мезозойское время.

Аргиллизиты, развитые по карбонатным породам имеют следующий состав: каолин (2-3%), бесцветная слюда (1-2%), кварц (до 25%), битуминозные образования (до 2,5-3.0%), карбонат (до 25-30%) и мелкозернистый пирит в виде тонко распыленной массы, и шпиров часто округлой формы до 1 см или линз (до 4-8 см). Суммарная пиритизация в отдельных интервалах может достигать 15%.

Таким образом, территория перспективного участка расположена в висячем крыле Боровухинского надвига, в пределах синклинальной структуры северо-северо-западной ориентировки, ограниченной и осложнённой разрывными нарушениями той же ориентировки, участок сложен известняками (реже доломитами) франского и фаменского ярусов верхнего девона, перекрываемые переслаивающимися аргиллитами, алевролитами и песчаниками западноуральской свиты визейского яруса нижнего карбона.

Тонковкрапленная золото-сульфидная минерализация, аналогична классическому «карлинскому» типу. Проявлена сопутствующая минерализация свойственная месторождениям «карлинского» типа, в том числе выявлено органическое вещество.

Данные параметры позволяют отнести Ольховский участок, к аналогам месторождений «карлинского» типа.

### **Результаты минералого-аналитических исследований**

В ходе бурения поисковых скважин было отобрано и, в дальнейшем, проанализировано 3322 пробы.

Пробы анализировались пробирным и атомно-абсорбционным методами, но показали довольно низкие содержания золота.

Для изучения форм нахождения золота, из анализируемых проб выделялись монофракции минералов и дополнительно исследовались (Таблица 1).

Установлено, что концентрации золота в терригенно-карбонатных отложениях исследуемого участка связаны с сульфидной минерализацией, как в классическом «карлинском» типе [8].

Однако содержания золота, проанализированные пробирным методом и ААС, были довольно низкие.

Так же было установлено, что большая часть проанализированных проб содержит органическое вещество.

## Содержание золота в монофракциях пирита

№ п/п	№ пробы	Вес монофракции, г	Содержание Au, г/т
1	304-68,3	2,138	12,8
2	304-72,5	5,342	8,9
3	306-67	2,018	2,5
4	306-77,6	5,719	9,5
5	307-106	2,830	7,6
6	307-131	2,984	0,7
7	309-114,4	2,794	7,1
8	309-115,4	4,167	6,5
9	309-116	6,353	6,2

Исходя из этого, проведен анализ органического вещества (ОВ) в терригенно-карбонатных отложениях Ольховского участка, в лабораториях ГГР ГИ УрО РАН, а так же КамНИИКИГС, который позволил отнести органическое вещество к сапропелевому типу. Была показана идентичность ОВ в породах Ольховского участка и ОВ нерастворимых остатков соляных пород ВКМС (где были обнаружены промышленные содержания Au и платиноидов). Эти результаты привели к выводу о возможном присутствии большего содержания Au в терригенно-карбонатных породах связанных с органическим веществом и на Ольховском участке. Что позволило сделать вывод о необходимости применения иных методов анализа проб, для более корректного определения содержания Au.

Поскольку в породах содержащих концентрации золота присутствует значительное количество ОВ (сапропелевый тип), то была применена методика определения содержания золота связанного с ОВ (**пробирный анализ с шерберной плавкой и атомно-абсорбционным окончанием и пробирно-масс-спектрометрический анализ с подшихтовкой хлоридами**).

1) Пробирным анализом с шерберной плавкой и атомно-абсорбционным окончанием было проанализировано 202 пробы, и были уверенно получены содержания 1 г/т и выше, среднее содержание золота по ним составляет 1,80 г/т.

Содержание золота менее 1 г/т зафиксировано в 23 пробах из 202, среднее содержание золота по ним составляет 0,55 г/т.

2) Анализ вещественного состава проанализированных интервалов показывает, наличие органического вещества. В случае связи золота с ОВ и анализе проб содержащих ОВ традиционными методами возможны большие потери золота в ходе анализа.

Поскольку определение золота связанного с органическим веществом представляет трудности в связи с возможным уходом в возгоны при пробирной плавке или при минерализации проб для подготовки к анализу атомно-абсорбционным методом (ААС), поэтому по ряду проанализированному «шерберным» методом выполнен анализ с использованием метода определения золота связанного с органическим веществом.

Для сравнения были использованы методы ААС. Пробы анализировались прямым ПМС-методом и ПМС с подшихтовкой проб хлоридом натрия (Табл. 2) [9,10].

Таблица 2

### Определение содержания Au

в битуминозных известняках, алевролитах и корах выветривания методами: атомно-абсорбционный (ААС); пробирно-масс-спектрометрический (ПМС); пробирно-масс-спектрометрический (ПМС) с подшихтовкой хлоридами.

Состав	Метод анализа			
	ААС	ПМС	ПМС·с·NaCl Прямое определение	ПМС·с·NaCl Пересчет
Известняк	0,098	1,26	0,17·(20%·шихты·NaCl)	0,20
Алевролит	0,22	1,76	2,10·(48%·шихты·NaCl)	3,11
Кора	0,054	0,85	3,68·(30%·шихты·NaCl)	4,78

Содержания золота в колонке ПМС без пошихтовки аналогично зафиксированных в основной массе проб проанализированных шерберным методом. Метод анализа ПМС с шихтовкой хлоридами в интервалах с таким содержанием, достаточно уверенно фиксирует содержания золота в 2-5 раз большие.

Использование данные анализа ПМС с шихтовкой хлоридами позволит при подсчете балансовых руд выделить более крупные блоки, поскольку часть золота связанная с ОВ войдет в анализ.

### Заключение

1. По результатам исследований, в пределах Ольховского участка установлено две формы нахождения золота:

1) Золото, связанное с минералами носителями (преимущественно с пиритом, кальцитом, сфалеритом);

2) Золото, связанное с органическим веществом (битумы, углеродисто-гидрослюдистое вещество).

3) Результаты исследования показали, что доля золота связанного с органическим веществом преобладает.

4) Необходимо, в первую очередь провести ревизию фактического материала по опробованию Ольховского участка и выделить участки обогащенные ОВ. Выполнить анализ двумя указанными выше методами на содержание золота.

5) При постановке поисковых работ на других участках перспективной площади, рекомендуется применять указанный комплекс методов при анализе результатов опробования

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков А.В. Геолого-генетическая модель месторождений золота Карлинского типа / А.В. Волков, А.А. Сидоров // Литосфера. – 2016. – № 6. – С. 145-165.

2. Константинов М.М. Золоторудное месторождение Карлин. – М.: Науч. мир. – 2000. – С. 272.

3. Константинов М.М., Золоторудные месторождения типа Карлин и критерии их выявления // Руды и металлы. – 2000г. – Вып. 1.

4. Рафаилович М.С. Геолого-структурная позиция, прогнозно-поисковая модель месторождения Суздальское. (Восточный Казахстан) / Рафаилович М.С., Дьячков Б.А. // Известия НАН РК. Сер. геологии и техн. наук. – 2011. – Вып. 6. – С. 45-61.
5. Рафаилович М.С. Геолого-структурная позиция, прогнозно-поисковая модель месторождения Суздальское. (Восточный Казахстан) / Рафаилович М.С., Дьячков Б.А. // Известия НАН РК. Сер. геологии и техн. наук. – 2011. – Вып. 6. – С. 45-61.
6. Золотоносность арсенопирита золото-сульфидных месторождений Восточного Казахстана / Ковалев К.Р., Калинин Ю.А., Наумов Е.А., Колесникова М.К., Королюк В.Н. // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 2. – С. 225-242.
7. Волков А.В. Крупнотоннажные в мировой и Российской золотодобычи // Золото и технологии. – 2012г. – № 2.
8. Особенности распределения золота в известковисто-терригенных комплексах пашийской перспективной площади на западном склоне Урала (Ольховский участок) / А.С. Борисов, А.Ф. Сметанников, С.Б. Суслов, А.В. Филатов, А.А. Рыжов, С.Н. Петухов, Н.М. Рыбьякова, Д.И. Некрасов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2018. – Вып. 21. – С. 247-252.
9. Сметанников А.Ф. Особенности анализа золота, связанного с органическими соединениями / А.Ф. Сметанников, Э.М. Седых // XXI Международная Черняевская конференция по химии, аналитике и технологии платиновых металлов: тез. докл. – Екатеринбург, 2016. – С. 61-
10. Способ качественного и количественного определения органических соединений благородных металлов в породах различного состава: пат. № 2354967 Рос. Федерация: МПК G 01 N 30/06 (2006.01) / Сметанников А.Ф., Серебряный Б.Л., Красноштейн А.Е.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Уралкалий-Технология». – № 2007134762/28; заявл. 18.09.2007; опубл. 10.05.2009. Бюл. № 13.

УДК 550.85; 553.46

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.19

А.Ю. ПУЗИК

*Горный институт УрО РАН*

**ИЗУЧЕНИЕ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД  
САРАНОВСКОЙ ШАХТЫ «РУДНАЯ»  
НА ГЛАВНОМ САРАНОВСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ**

Россия обладает небольшой сырьевой базой хромовых руд, по масштабу уступающей большинству ведущих мировых продуцентов хромитового сырья. Государственным балансом запасов Российской Федерации учитывается 50,3 млн т хромовых руд категорий А+В+С1+С2, включая 17,7 млн т запасов категорий А+В+С1. При этом в разработку вовлечено лишь 5,9 млн т суммарных запасов хромовых руд страны. Еще 32,4 млн т запасов хромитов заключено в месторождениях, имеющих статус подготавливаемых к эксплуатации. Российский потенциал прироста запасов хромовых руд значителен — прогнозные ресурсы только категории Р1 более чем в 2,5 раза превышают запасы А+В+С1+С2 хромовых руд и насчитывают 137,9 млн т. Однако большая их часть представлена хромитами низкого качества[1].

В связи со сложившейся тенденцией сырьевой зависимости от импорта и нехватка собственного сырья в данной отрасли РФ, представляется актуальным вовлечение отходов обогащения хромитовых руд (хвостов). В данной работе представлены некоторые результаты изучения минералого-технологических характеристик хвостов обо-

гащения руд Сарановской шахты «Рудная», с целью определения возможности их использования в качестве источника хромового сырья. В Пермском крае находятся три месторождения Сарановской группы, суммарно заключающие 15% российских запасов хромовых руд: стратиформные Главное Сарановское и Южно-Сарановское с запасами соответственно 4,6 млн т и 2,9 млн т хромитов, а также Сарановские валунчатые россыпи — 0,2 млн т; среднее содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в рудах составляет 38–39%. На участке Промежуточный в пределах Сарановского массива локализованы прогнозные ресурсы категории Р1 хромовых руд стратиформного типа в количестве 2,7 млн т.[1]

В настоящее время шахтой разрабатывается Главное Сарановское месторождение, объектом исследования стал конус хвостов после обогащения на фабрике. До 1935 года месторождение обрабатывалось карьером, а затем штольной до гор. +462 м. Ниже горизонта 462 м, начиная с 1940 года, месторождение обрабатывается подземным способом Сарановской шахтой "Рудная". Главное отличие руд Сарановского месторождения – локализация оруденения в виде выдержанных пластов мощностью от 0,5 - до 12м, протяжением до 2 км. Пласты круто падают вниз и без признаков рационального выклинивания прослежены до глубины 500-800 м. Сейчас разрабатываются три наиболее мощных пласта, известные как Западное, Центральное и Восточное рудные тела с близким составом руд. Добытая руда проходит обогащение на обогатительной фабрике, которая находится непосредственно на промышленной площадке шахты и связана с шахтой в единую технологическую цепочку. Обогащение, до представленного исследования, проводилось двумя способами. Фракция руды крупностью от 4 до 100 мм обогащается в тяжелой суспензии и фракция руды 1 - 4 мм проходит обогащение на отсадочной машине [2]. После первых полученных данных на предприятии построили дополнительную цепочку по обогащению фракции 0,4 мм на винтовом сепараторе. Объект исследований представлен конусом хвостов Сарановской обогатительной фабрики крупностью 0-100 мм (рис.1А).

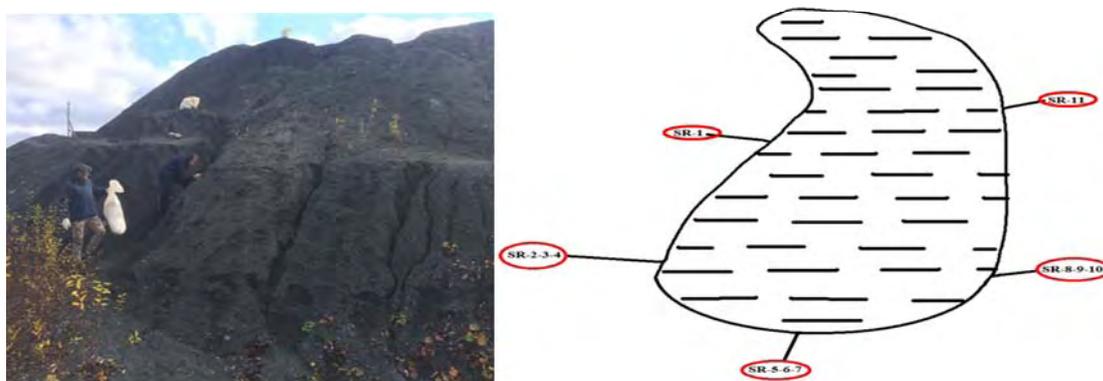


Рис.1А – фотография конуса хвостов,  
Б – план внешнего вида конуса с местами отборов проб

На плане (рис. 1Б) показаны места отбора проб, а их количество и объем представлены в таблице 1. Как видно из таблицы общий объем опробования составил 370 литров. Опробование происходило двумя способами, бороздовым (пробы SR-1 и SR-11) и точечным из подошвы, середины и кровли конуса.

Для определения гранулометрического состава конуса хвостов, пробы были рассеяны на три класса крупности +4, 4-2, -2 мм, а полученные результаты были статистически обработаны. Выяснилось, что в большей степени преобладает класс -2мм (49% и более), который в дальнейшем и был обогащен. Обогащение фракции -2мм выполня-

лось на винтовом сепараторе в водном потоке. По полученным результатам была дана оценка эффективности обогащения, в виде процентного соотношения исходных хвостов и полученных концентратов. Как оказалось, середина и кровля имеют в среднем около 60% выхода концентрата от исходной пробы. В свою очередь подошва имеет выход ПК только 45%. Минеральный и химический состав, пока, изучен только в одной пробе SR-6 (табл.2).

Таблица 1

Объемы опробования, литры

Номер пробы	Объем
SR-1	50
SR-2 (подошва)	30
SR-3(середина)	30
SR-4 (кровля)	30
SR-5 (подошва)	30
SR-6 (середина)	30
SR-7(кровля)	30
SR-8(подошва)	30
SR-9(середина)	30
SR-10(кровля)	30
SR-11	50
<b>Общий объем</b>	<b>370</b>

Таблица 2

Минеральный состав пробы

№ п/п	Фракции	Хромит	Серпентин	Кальцит	Доломит	Кварц	Альбит	Магнетит	Актинолит	Сумма
1	Исходная	59,4	26	3,8	3,6	2,1	2,8	1,8	0,5	100
2	Тяжелая	100	0	0	0	0	0	0	0	100
3	Легкая	31,1	32,8	6,8	6,8	8,6	4,6	6,2	3,1	100

Исходная проба почти на 60 % состояла из хромита и почти на 40 % из примесей, не являющихся полезными компонентами. После гравитационного обогащения, были выделены тяжелая и легкая фракции. Как видно из таблицы, минеральный состав после обогащения существенно изменился. Химический состав пробы представлен в таблице 3. Прослеживается тенденция, которая подтверждает улучшение качества сырья при его обогащении указанным выше способом.

Результаты экспериментального обогащения приведены в таблице 4. На основании данных полученных при анализе гранулометрического состава материала конуса можно сделать вывод, что хвосты являются относительно однородным объектом с размером частиц меньше 2 мм. Результаты, полученные при определении минерального и химического составов исходной пробы, легкой и тяжелой фракций, также дают возможность предполагать, что и в других пробах будет сохраняться данная тенденция улучшения качества получаемого продукта. Основным выводом состоит в том, что хвосты обогащения хромитовых руд Сарановской Шахты «Рудная» на Главном Сарановском месторождении, являются дополнительным источником хрома. Ниже представлена

таблица результатов обогащения. Как видно из таблицы, процент извлечения полезного компонента равен 79 %, что является хорошим показателем.

Таблица 3

Химический состав проб, масс. %

	Исходные хвосты (-2 мм)	Концентрат после обогащения (тяж. фракция)	Легкая фракция
Na <sub>2</sub> O	0.063	0.05	0.51
MgO	13.71	12.23	24.21
SiO <sub>2</sub>	3.85	1.51	34.64
CaO	0.73	0.33	5.74
K <sub>2</sub> O	0.05	0.03	0.16
TiO <sub>2</sub>	0.62	0.64	0.54
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.43	43.01	10.32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.61	25.08	8.24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.24	18.49	5.28
MnO	0.16	0.17	0.25
Co	0.01	0.01	0.07
Ni	0.12	0.12	0.02
SO <sub>3</sub>	0.07	0.06	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.04
ППП	0.34	0.45	9.96
Сумма	100.00	100.00	100.00

Таблица 4

Результаты обогащения

№ пробы (хвосты предприятия)	Вес исходной пробы, кг	Сод. Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> масс. %	Кол-во Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , кг	Вес концентрата, кг	Содержание Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> масс. %	Кол-во Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , кг	% извлечения
1	51	31.43	16.02	30	43.01	12.7	79.0
Хвосты после сепаратора				Вес легкой фракции, кг	Содержание Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> масс. %	Кол-во Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , кг	% извлечения
1				21	10.3	2.163	21.0

Планируется продолжать исследования, с применением дополнительного комплекса методов обогащения включающих магнитную и электромагнитную сепарацию. Также намечено проведение анализов с применением прецизионных методов исследования, это и микрондовый анализ, метод ИСП-МС, электронная микроскопия и т.п. Данные разновидности аналитических методов исследования, позволят определить количественное содержание благородных и редкометалльных элементов, а также выявить форму их нахождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году» / Минприроды России. – М., 2016. – С. 94-99.
2. Технологический регламент Сарановской обогатительной фабрики.

# МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.20

А.А. БАРЯХ

*Горный институт УрО РАН*

## **АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОМЕХАНИКИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ**

Вся российская добыча калийных солей в настоящее время сосредоточена в пределах Верхнекамского месторождения (ВКМС), которое является вторым в мире по разведанным запасам – более 3,8 млрд. тонн. Разработка ВКМС и других месторождений минеральных солей связана с риском возникновения аварий, обусловленных разрушением водозащитной толщи (ВЗТ), и, как следствие, прорывом пресных или слабоминерализованных вод в горные выработки [1, 2]. В этой связи исторически геомеханические исследования были востребованы практикой освоения ВКМС. Как правило, они основывались на эмпирических и инженерных подходах [3]. Применение методов математического моделирования к расчету устойчивости ВЗТ на рудниках ВКМС началось примерно с 90-х годов прошлого века [4,5] и постоянно развивается. Здесь, в первую очередь следует отметить комплексирование геомеханики с геофизическими методами [6], когда выделенные по результатам сейсморазведочных наблюдений неоднородности (природные и/или техногенные) непосредственно включаются в расчетную схему математического моделирования состояния ВЗТ. Этот подход, получивший название сейсмогеомеханический, в настоящее время в плановом режиме применяется на всех рудниках ВКМС и постоянно совершенствуется. Это относится как к методике и технологии геофизических исследований, так и к геомеханической компоненте [7].

Для сейсмогеологических условий (ВКМС) наземные малоглубинные сейсморазведочные исследования в мониторинговом режиме позволяют локализовать участки негативных изменений упругих параметров породного массива размерами в несколько десятков метров по латерали в интервале глубин от 100 до 500. Подобные исследования могут при необходимости дополняться инженерными сейсморазведочными наблюдениями, которые обеспечивают изучение верхней части разреза от приповерхностных отложений до первых горизонтов ВЗТ. Для повышения детализации геологического строения и определения состояния породного массива на уровне продуктивных пластов проводятся высокочастотные сейсморазведочные исследования из горных выработок. Результатом интерпретации многоуровневых сейсморазведочных исследований являются физико-геологические модели повышенной детальности, которые представляют исходные данные для текущих и прогнозных геомеханических оценок состояния ВЗТ на потенциально опасных участках шахтных полей калийных рудников.

Для получения адекватных геомеханических оценок безопасности подработки ВЗТ при математическом моделировании используется и другая эмпирическая информация, связанная, в частности, с развитием процесса сдвижения во времени. На основе этих данных производится калибровка геомеханических моделей ВЗТ. Теоретическое описание поведения соляных пород под нагрузкой, формулировка новых критериев разрушения [8] базируется на результатах их лабораторных испытаний в сложных режимах нагружения [9].

На потенциально опасных по нарушению сплошности ВЗТ участках, сейсмогеомеханический контроль которых осуществляется в ежегодном режиме, стали применяться трехмерные постановки (рис.1). Это потребовало использования высокоэффективных вычислительных технологий решения трехмерных задач геомеханики на многопроцессорной суперкомпьютерной технике (суперкомпьютер URAN Института математики и механики УрО РАН, г.Екатеринбург). Совершенство математических моделей, их параметрического обеспечения и средств вычислений, безусловно, позволило повысить достоверность геомеханических прогнозов состояния ВЗТ.

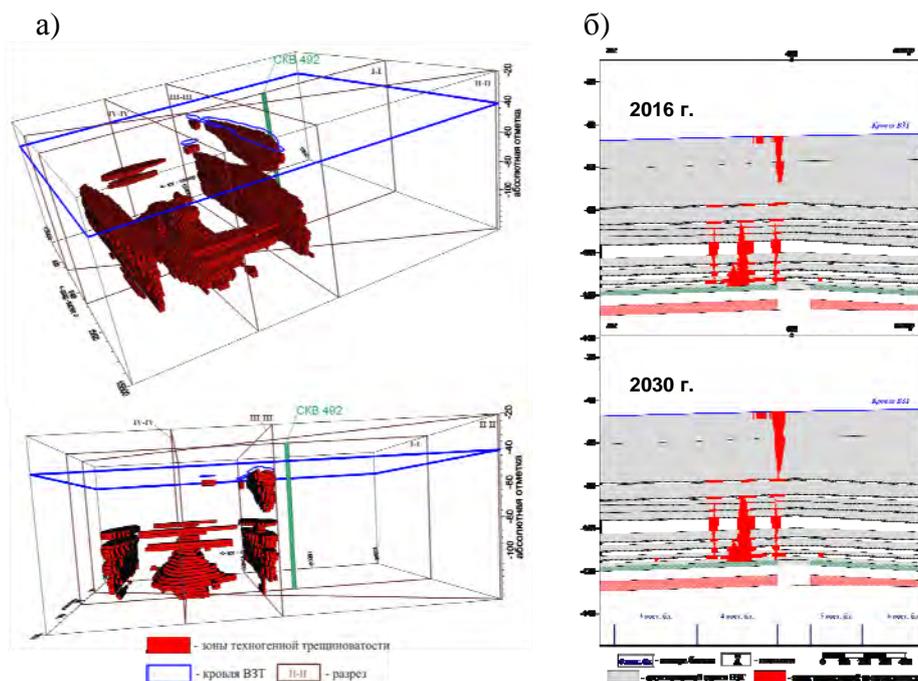


Рис. 1. Пространственное (а) и по разрезу (б) положение зон техногенной нарушенности ВЗТ

Целый комплекс практических задач связан с разработкой дополнительных мер охраны ВЗТ, позволяющих минимизировать риски нарушения ее сплошности. Здесь, в рамках математического моделирования решается задача выбора наиболее эффективного способа защиты ВЗТ. В качестве примера на рис.2 приводятся результаты анализа создания зоны смягчения у постоянной или длительно остановленной границы горных работ [10].

Вовлечение в разработку новых участков ВКМС характеризуется усложнением горно-геологических условий ведения горных работ, которое проявляется, в частности, в значимом повышении содержания глины в рабочих пластах. Наличие глинистых прослоев не только снижает несущую способность междукамерных целиков, но обуславливает ускоренное обрушение кровли, что оказывает негативное влияние на устойчивость камерной системы разработки в целом. Следует отметить, что зачастую реализация этих процессов не вписывается в инженерную схему расчета конструктивных элементов очистной выемки калийных пластов [11]. Необходимым здесь является включение в расчетную схему математического моделирования параметров деформирования и разрушения контактов [12] с последующим детальным анализом разрушения всех геологических элементов слагающих продуктивную толщу. На рис.3 иллюстрируется вариант совместной отработки сближенных пластов КрII и КрIII [13].

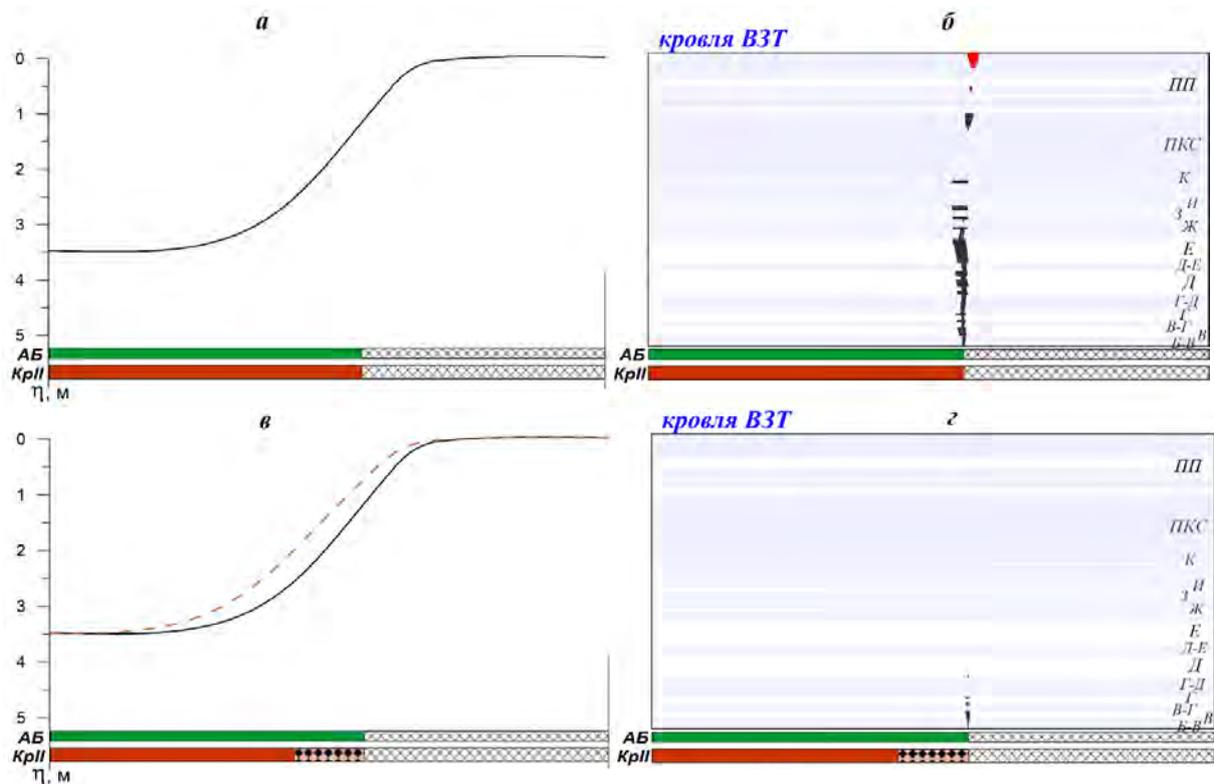


Рис. 2. Расчетные оседания земной поверхности и зоны техногенной нарушенности:  
а, б) – без создания зоны смягчения;  
в, г) – создание зоны смягчения путем закладки пласта КрII

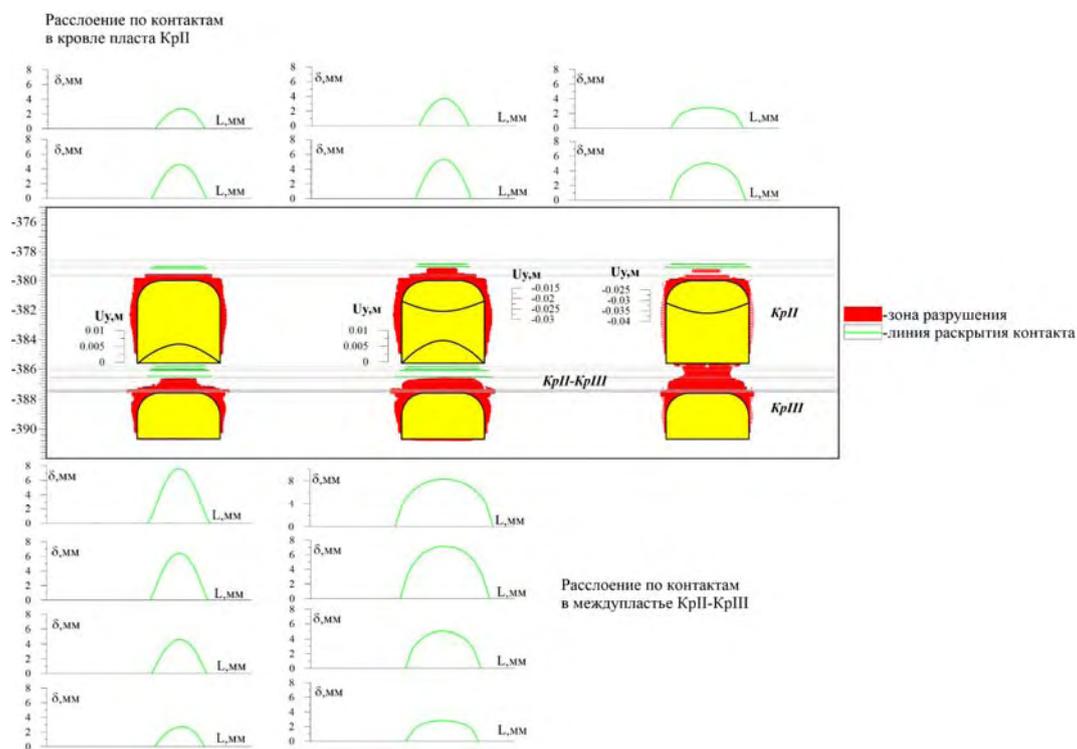


Рис. 3. Характер развития деформационных процессов и разрушения пород при совместной отработке пластов КрII и КрIII

В статье затронут лишь наиболее востребованный практикой разработки месторождения круг задач геомеханики. Вне рассмотрения остались актуальные проблемы, направленные на прогноз горно-геологических условий разработки, основанные на ретроспективном математическом моделировании геологических процессов. Это сложная, комплексная задача, решение которой должно базироваться на научной кооперации геологов, геофизиков и геомехаников. Не отмечены также геомеханические вопросы, связанные с анализом последствий аварийного затопления рудников ВКМС. Вместе с тем, хочется обратить внимание, что в относительно недалеком будущем многие действующие калийные рудники должны перейти в стадию ликвидации. Вне зависимости от способа ликвидации («сухой» или «мокрый») на повестку встанут задачи во много подобные аварийным проблемам. Это оценка степени растворения соляных пород (при «мокром» способе – плановая, при «сухом» - в случае нарушения водонепроницаемости ВЗТ после ликвидации), прогноз деформации земной поверхности, опасности образования провалов, заболачивания и подтопления территорий.

Таким образом, планомерное геомеханическое сопровождение горных работ на всех стадиях освоения ВКМС является залогом обеспечения его безопасной и эффективной разработки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00101).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиман М.И. Предотвращение затопления калийных рудников/ М. : Недра, 1992. - 160 с.
2. Красноштейн А. Е., Барях А. А., Санфиоров И. А. Горнотехнические аварии: затопление Первого Березниковского калийного рудника // Вестн. Перм. науч. центра. — 2009. — № 2. — С. 4–9.
3. Механика горных пород при разработке месторождений природных солей// Труды ВНИИГалургии, под ред. М. П. Нестерова, Вып. 67 Ленинград : ВНИИГ , 1974 .- 158 с.
1. Барях А.А., Шумихина А.Ю. Крупномасштабное математическое моделирование геомеханических процессов при разработке калийных месторождения// Горный журнал. 1993. № 4. С. 31.
2. Барях А.А. Геомеханические аспекты защиты калийных рудников от затопления// Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 1995. № 6. С. 185.
3. Барях А. А., Санфиоров И. А. Комплексное геомеханическое и геофизическое обеспечение безопасности подземных работ // Горн. журн. 2005. № 12. С. 79 – 83.
4. Барях А.А. Сейсмо-геомеханический прогноз состояния водозащитной толщи на калийных рудниках/ Барях А.А., Санфиоров И.А., Федосеев А.К., Бабкин А.И., Цаюков А.А.// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 6. С. 10-22.
5. Барях А.А., Самodelкина Н.А. Об одном критерии прочности горных пород// Чебышевский сборник. 2017, №18(3). С.72-87.
6. Жигалкин В.М. Деформирование квазипластичных соляных пород при различных условиях нагружения/ Жигалкин В.М., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А., Асанов В.А., Барях А.А., Паньков И.Л., Токсаров В.Н.//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2005. № 6. С. 14-25.
7. Телегина Е.А. Геомеханический анализ целесообразности и эффективности создания зон смягчения у постоянно или длительно остановленных границ горных работ// Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11, 2013. С. 69-72

8. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей// Пермь- Березники, 2014. – 130 с.

9. Барях А.А. Interaction of layers in salt massif. Part 1. Mechanical properties of contacts/ Baryakh A.A., Dudyrev I.N., Asanov V.A., Pan'kov I.L.//

Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1992. № 2. С. 48-52.

10. Лобанов С.Ю. Геомеханическое обоснование безопасных условий отработки сближенных сильвинитовых пластов// Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр.

УДК 622.834

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.21

Н.А. САМОДЕЛКИНА  
Горный институт УрО РАН  
**УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ  
СЛОИСТЫХ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ**

В данной работе представлена методика определения поведения многослойной двухкомпонентной среды, когда оба ее компонента описываются упругопластической моделью деформирования. В качестве слоистой среды может рассматриваться также и трещиноватая порода. Данная методика основана на использовании метода конечных элементов трехмерной задачи упругости и метода начальных напряжений [1-3]. Поведение слоистого породного массива характеризуется усредненными напряжениями и деформациями, которые находят из решения упругопластической задачи для каждого компонента массива. При постановке задачи предполагается, что в процессе деформирования массива не происходит расслоения.

Рассмотрим процесс деформирования двухкомпонентного слоистого массива, состоящего из системы чередующихся изотропных слоев (рис.1), плоскости которых ортогональны оси  $n$ . Исходными данными являются механические свойства слоев и их удельное объемное содержание.

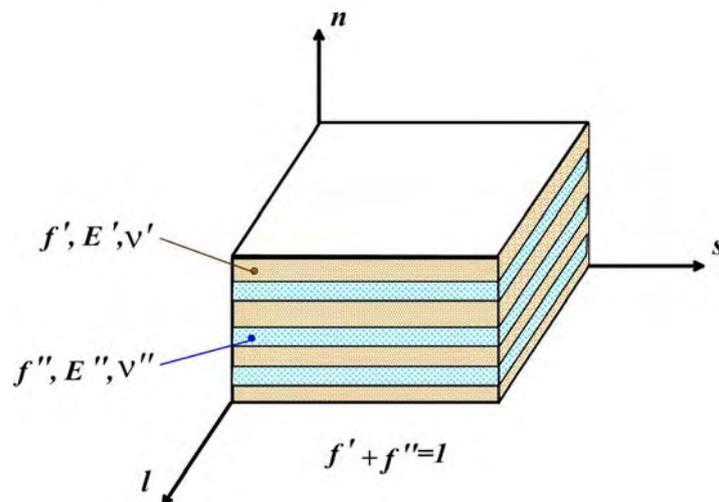


Рис. 1. Схема слоистого двухкомпонентного породного массива

Проведенные методом конечных элементов вычислительные эксперименты по определению напряженно-деформированного состояния неоднородной двухкомпонентной среды при одноосном растяжении (сжатии) и сдвиге, а также условия про-

странственной симметрии показали, что между макроскопическими (усредненными по объему) и структурными напряжениями (деформациями) имеет место следующая зависимость:

$$\begin{aligned} \varepsilon_l &= \varepsilon_l' = \varepsilon_l''; & \varepsilon_s &= \varepsilon_s' = \varepsilon_s''; & \varepsilon_n &= f' \varepsilon_n' + f'' \varepsilon_n''; \\ \gamma_{nl} &= f' \gamma_{nl}' + f'' \gamma_{nl}''; & \gamma_{ns} &= f' \gamma_{ns}' + f'' \gamma_{ns}''; & \gamma_{sl} &= \gamma_{sl}' = \gamma_{sl}''; \\ \sigma_l &= f' \sigma_l' + f'' \sigma_l''; & \sigma_s &= f' \sigma_s' + f'' \sigma_s''; & \sigma_n &= \sigma_n' = \sigma_n''; \\ \tau_{nl} &= \tau_{nl}' = \tau_{nl}''; & \tau_{ns} &= \tau_{ns}' = \tau_{ns}''; & \tau_{sl} &= f' \tau_{sl}' + f'' \tau_{sl}'' \end{aligned}$$

где индексы (') и (") относятся к первому и второму компоненту слоистой среды; компоненты без индекса соответствуют макроскопическим параметрам напряженно-деформированного состояния transversально однородной среды (слоистому породному массиву);  $f'$  и  $f''$  относительное объемное содержание первого и второго компонента слоистой среды.

Связь между напряжениями и деформациями каждого компонента слоистой среды подчиняется закону Гука и имеет следующий вид:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n^{('')} \\ \sigma_s^{('')} \\ \sigma_l^{('')} \\ \tau_{ns}^{('')} \\ \tau_{nl}^{('')} \\ \tau_{sl}^{('')} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{('')} & C_{12}^{('')} & C_{12}^{('')} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}^{('')} & C_{11}^{('')} & C_{12}^{('')} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}^{('')} & C_{12}^{('')} & C_{11}^{('')} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{12}^{('')} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12}^{('')} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12}^{('')} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n^{('')} \\ \varepsilon_s^{('')} \\ \varepsilon_l^{('')} \\ \gamma_{ns}^{('')} \\ \gamma_{nl}^{('')} \\ \gamma_{sl}^{('')} \end{Bmatrix},$$

где компоненты матрицы упругости определяются модулем упругости  $E'$ ,  $E''$  и коэффициентом Пуассона  $\nu'$ ,  $\nu''$ :

$$\begin{aligned} C_{11}^{('')} &= \frac{E''(1-\nu'')}{(1+\nu'')(1-2\nu'')} \\ C_{12}^{('')} &= \frac{E''\nu''}{(1+\nu'')(1-2\nu'')} \\ G_{12}^{('')} &= \frac{E''}{2(1+\nu'')} \end{aligned}$$

Связь между макроскопическими напряжениями и деформациями в системе координат  $ns$ l (рис.1) определяется следующим соотношением:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_l \\ \tau_{ns} \\ \tau_{nl} \\ \tau_{sl} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{nn} & C_{ns} & C_{nl} & 0 & 0 & 0 \\ C_{sn} & C_{ss} & C_{sl} & 0 & 0 & 0 \\ C_{ln} & C_{ls} & C_{ll} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{ns} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{nl} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{sl} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_l \\ \gamma_{ns} \\ \gamma_{nl} \\ \gamma_{sl} \end{Bmatrix},$$

где компоненты матрицы упругости, полученные на основе вышеприведенных выкладок, определяются следующим образом:

$$C_{ss} = C_{ll} = f' C_{11}' + f'' C_{11}'' - \frac{f' f'' (C_{12}' - C_{12}'')^2}{f' C_{11}'' + f'' C_{11}'}; \quad C_{nn} = \frac{C_{11}' C_{11}''}{f' C_{11}'' + f'' C_{11}'};$$

$$C_{ns} = C_{nl} = \frac{f' C_{11}'' C_{12}' + f'' C_{11}' C_{12}''}{f' C_{11}'' + f'' C_{11}'}; \quad C_{sl} = f' C_{12}' + f'' C_{12}'' - \frac{f' f'' (C_{12}' - C_{12}'')^2}{f' C_{11}'' + f'' C_{11}'};$$

$$G_{ns} = G_{nl} = \frac{G_{12}'' G_{12}'}{f' G_{12}'' + f'' G_{12}'}; \quad G_{sl} = f' G_{12}' + f'' G_{12}''.$$

В том случае, если плоскости слоев произвольно ориентированы в пространстве (рис. 2), то матрица упругости осредненной среды имеет следующий вид:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{xxxx} & C_{xxyy} & C_{xxzz} & C_{xxxy} & C_{xxxz} & C_{xxyz} \\ C_{xxyy} & C_{yyyy} & C_{yyzz} & C_{yyxy} & C_{yyxz} & C_{yyyz} \\ C_{xxzz} & C_{yyzz} & C_{zzzz} & C_{zzxy} & C_{zzxz} & C_{zzyz} \\ C_{xxxy} & C_{yyxz} & C_{zzxy} & C_{xyxy} & C_{xyxz} & C_{xyyz} \\ C_{xxxz} & C_{yyxz} & C_{zzxz} & C_{xyxz} & C_{xzxz} & C_{xzyz} \\ C_{xxyz} & C_{yyyz} & C_{zzyz} & C_{xyyz} & C_{xzyz} & C_{yzyz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix}.$$

Вид компонент матрицы упругости не приводится из-за их громоздкости.

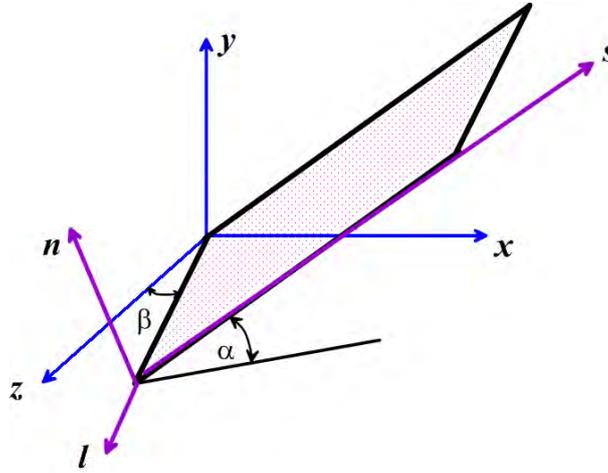


Рис. 2. Произвольная ориентация слоев в пространстве.

Решение упругопластической задачи при произвольной ориентации слоев проводится в следующей последовательности:

- 1) путем поэтапного поворота системы координат  $xuz$  переводим макроскопические (осредненные) напряжения и деформации в систему координат  $nsl$  (рис.2);
- 2) определяем структурные деформации каждого компонента слоистой среды:

$$\varepsilon_l^{(c)} = \varepsilon_l, \quad \varepsilon_s^{(c)} = \varepsilon_s, \quad \varepsilon_n^{(c)} = \frac{\sigma_{nn} - C_{12}^{(c)} (\varepsilon_{ll} + \varepsilon_{ss})}{C_{11}^{(c)}}, \quad \gamma_{nl}^{(c)} = \frac{\tau_{nl}}{G_{12}^{(c)}}, \quad \gamma_{ns}^{(c)} = \frac{\tau_{ns}}{G_{12}^{(c)}}, \quad \gamma_{sl}^{(c)} = \gamma_{sl}, \text{ а}$$

затем по закону Гука определяем структурные напряжения  $\sigma_{nn}^{(c)}$ ,  $\sigma_{ss}^{(c)}$ ,  $\sigma_{ll}^{(c)}$ ,  $\tau_{ns}^{(c)}$ ,  $\tau_{nl}^{(c)}$ ,  $\tau_{sl}^{(c)}$ ;

- 3) на основании критерия пластичности (прочности) определяем пластические деформации структурных элементов  $\Delta\varepsilon_{nn}^{(c)}$ ,  $\Delta\varepsilon_{ss}^{(c)}$ ,  $\Delta\varepsilon_{ll}^{(c)}$ ,  $\Delta\gamma_{ns}^{(c)}$ ,  $\Delta\gamma_{nl}^{(c)}$ ,  $\Delta\gamma_{sl}^{(c)}$ ;
- 4) в системе координат  $ns'l$  переходим от структурных пластических деформаций к макроскопическим пластическим деформациям, а затем путем поэтапного поворота системы координат получаем макроскопические пластические деформации в системе координат  $xuz$ .
- 5) дальнейшее решение проводится по стандартной схеме упругопластической задачи с использованием метода начальных напряжений для осредненной слоистой среды.

Данная методика была апробирована при решении тестовых задач в упругой и упругопластической постановке (погрешность решения в перемещениях не превышала соответственно 0.2% и 0.5%).

Таким образом, была разработана в трехмерной постановке методика определения осредненных механических свойств произвольно ориентированной в пространстве двухкомпонентной среды. На основе численных экспериментов получены соотношения перехода от макроскопических (осредненных) деформаций и напряжений к структурным и наоборот. Разработанная методика была апробирована при решении тестовых задач.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда  
(проект № 16-17-00101)*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
3. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.

УДК 622.831

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.22

С.Ю. ЛОБАНОВ

*Горный институт УрО РАН*

#### **ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ОТРАБОТКИ СБЛИЖЕННЫХ СИЛЬВИНитОВЫХ ПЛАСТОВ**

В работе представлены результаты геомеханического анализа устойчивости очистных выработок при различных технологических схемах и параметрах отработки сближенных сальвинитовых пластов КрII и КрIII<sup>a-b</sup>. Расчеты выполнялись применительно к горно-геологическим и горнотехническим условиям шахтного поля рудника Усольского калийного комбината. Рассматривались две принципиальные технологические схемы отработки. Первый вариант - совместная выемка запасов пластов КрII и КрIII. Второй вариант - первоначальная отработка

пласта КрII, закладка его очистных камер и выемка запасов пласта КрIII после завершения активной стадии сдвижения.

Геомеханические расчеты основывались на многовариантном математическом моделировании изменения напряженно-деформированного состояния массива, подработанного камерной системой разработки. При анализе учитывались характерные для Палашерского участка особенности слоистого строения продуктивной толщи, включая ее повышенную глинизацию. Численная реализация осуществлялась в двухмерной упруго-пластической постановке методом конечных элементов. В рамках принятого подхода производилась критериальная оценка устойчивости очистных камер при различных вариантах отработки запасов сильвинитовых пластов КрII-КрIII.

С учетом опыта работы на юго-восточном участке шахтного поля БКПРУ-2, определенных горно-геологических условий, с целью обеспечения безопасности производства горных работ при совместной отработке сильвинитовых пластов КрII и КрIII приняты следующие технические решения, касающиеся очистной выемки:

1. Ограниченные размеры выемочных единиц:

- длина панелей 1,5-3 км, ширина 1,0-1,5 км;
- длина блоков в основном 600 м;
- ширина блоков в основном 400 м;
- камеры одноходовые длиной не более 200 м

2. Восточное крыло шахтного поля с повышенным содержанием Н.О.(10,8% по пл.КрII и 7,29% по пл. КрIII) отрабатывается комбайнами Урал 61-А при ширине камеры 3,2 м и усредненной ширине междукамерного целика (МКЦ) – 13,8 м. Западное крыло (содержание Н.О. 6,6% по пл. КрII и 4,07% по пл. КрIII) отрабатывается комбайнами Урал 20Р при ширине камер 5,5 м и усредненной ширине МКЦ – 12,2 м.

3. Оба пласта и межпластовая потолочина отрабатываются с расчетом параметров системы разработки как для единого пласта КрII+КрII-КрIII+КрIIIа-б.

Данные технические решения легли в основу математического моделирования процессов деформирования и разрушения технологического междупластья (межпластовая каменная соль КрII-КрIII) при совместной отработке сближенных пластов КрII и КрIII.

Анализ устойчивости очистных камер основывался на математическом моделировании напряженно-деформированного состояния и критериальной оценке разрушения неоднородного слоистого породного массива, вмещающего систему горных выработок [1]. Решение проводилось в постановке плоского деформированного состояния.

Рассматривалась подработанная соляная толща (для базового варианта совместной отработаны сильвинитовые пласты КрII и КрIII), находящаяся под действием массовых сил интенсивностью  $\gamma_i$  ( $\gamma_i$  – плотность пород) (рис. 1). Технологическое междупластье КрII-КрIII и кровля пласта КрII моделировались слоистой средой, включающей глинистые контакты.

В геомеханических расчетах рассматривались два варианта параметров системы разработки продуктивной соляной толщи (табл.1)

Принципиальная схема задачи представлена на рис. 1.

Мощность междупластья принималась  $h = 2$  м для обоих вариантов. Глубина залегания отрабатываемых пластов определялась по данным скв.597 для западного крыла и для восточного по скв. 607.

Свойства соляных пород технологического междупластья КрII-КрIII и глинистых контактов принимались по данным лабораторных испытаний [2,3]. Выделенные прослойки глины в междупластье КрII-КрIII и кровле пласта КрII получены из описа-

ния керна скважины 107-г при участии специалистов лаборатории геологии месторождений полезных ископаемых ГИ УрО РАН.

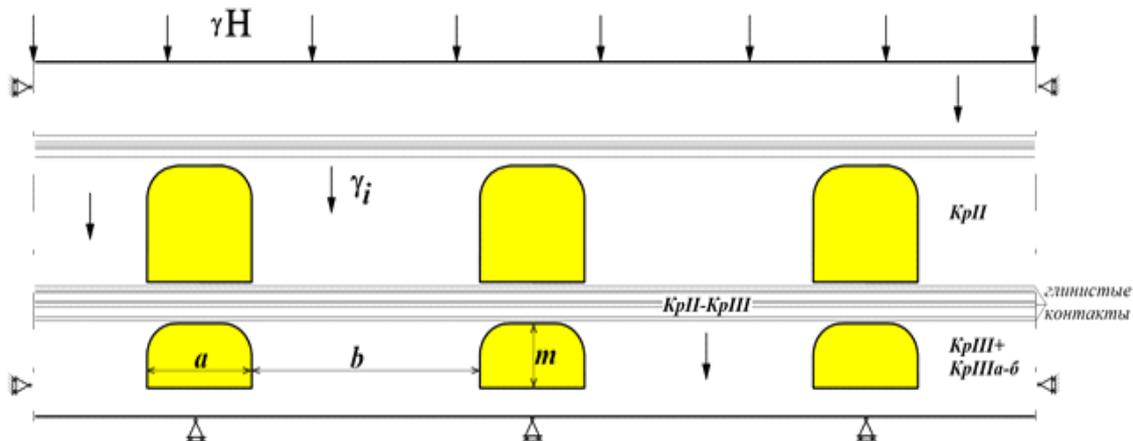


Рис. 1. Принципиальная расчетная схема

Таблица 1

Параметры системы разработки

Крыло	Пласт	Межосевое расстояние ( $l$ ), м	Ширина камеры ( $a$ ), м	Ширина целика ( $b$ ), м	Вынимаемая мощность ( $m$ ), м
Западное	КрII	17.7	5.5	12.2	5.6
	КрIII		5.5	12.2	3.1
Восточное	КрII	17	3.2	13.8	5.6
	КрIII		3.2	13.8	3.1

Состояние подработанной толщи описывалось идеальной упругопластической средой, для которой связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии определяется законом Гука. Предельные напряжения в области сжатия определялись линейной формой закона Кулона-Мора [4]:

$$\tau_{cr} = \tau_{max} = C_r + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

где коэффициент сцепления  $C_r$  и угол внутреннего трения  $\varphi$  характеризуются пределами длительной прочности горной породы на сжатие  $\sigma_s$  и растяжение  $\sigma_d$  [5]:

$$C_r = \frac{\sigma_d \sigma_s}{\sigma_d + \sigma_s}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{\sigma_s - \sigma_d}{\sigma_d + \sigma_s} \right)$$

В выражении (1)  $\tau_{max}$  и  $\sigma_n$  вычисляются через значения главных напряжений:

$$\tau_{max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2; \quad \sigma_n = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$$

где для условий плоской деформации главные напряжения определяются по формулам:

$$\sigma_1, \sigma_3 = \frac{1}{2} \left[ (\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \right]$$

В области растяжения предельное напряжение ограничивалось пределом прочности на растяжение:

$$\sigma_1 = \sigma_d$$

Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов в перемещениях [6] с дискретизацией рассматриваемой области на треугольные элементы первого порядка. Конечно-элементное решение упругопластической задачи основывалось на методе начальных напряжений [7].

Деформирование глинистых контактов между слоями в модели описывалось контактными элементами Гудмана [4]. Контакт являлся раскрытым если его деформация  $\delta_n > 0$ .

Прочность на растяжение горных пород значительно ниже их показателей при сжатии. В этой связи локализация растягивающих усилий является предпосылкой к разрушению пород. Очевидно, что разрушенные под действием растягивающих напряжений породы не будут обрушаться в выработанное пространство, если они окружены материалом, сохранившим свою несущую способность. Поэтому в качестве первого условия обрушения пород принимался выход зоны действия растягивающих напряжений на обнажение. Реализация этого критерия осуществлялась путем специальной организации вычислительного итерационного процесса: на каждой итерации из рассмотрения исключались (обнулялись) конечные элементы, примыкающие к границе кровли выработанного пространства [9].

В случае достижения областью сдвиговой трещиноватости «раскрытого» глинистого контакта происходит обрушение пород в выработанное пространство [2]. Учет данного критерия обрушения также реализован в расчетной процедуре, путем локализации и последующего исключения из расчетов областей, ограниченных «раскрытым» глинистым прослоем и зонами сдвиговой трещиноватости.

Как уже отмечалось, при совместной отработке пластов КрII и КрIII наиболее «слабым звеном», определяющим в целом устойчивость очистных камер, является технологическое междупластье КрII-КрIII. В этой связи при оценке безопасности горных работ основное внимание уделялось детальному анализу процессов его разрушения.

При совместной отработке пластов КрII и КрIII рассматривались два варианта: выемка в пределах блока (600 м) прямым порядком пласта КрII и последующая отработка обратным порядком пласта КрIII; одновременная выемка пластов КрII и КрIII с опережением (порядка 100 м) очистных работ по пласту КрII.

Последовательная отработка пластов КрII и КрIII предполагает первоначальную отработку пласта КрII, его закладку и выемку запасов пласта КрIII после завершения активной стадии сдвижения.

Оценка безопасности ведения горных работ для всех вариантов очистной выемки базировалась на количественном анализе интенсивности расслоения пород кровли и междупластья (число «раскрытых» контактов, протяженность этих участков, максимальная величина расслоения  $\delta_n$  в пределах каждого контакта). На основе этих расчетов и, исходя из принятых критериев разрушения, определялась потенциальная возможность обрушения кровли очистных камер пласта КрII и технологического междупластья КрII-КрIII.

Геомеханические исследования безопасности ведения горных работ при различных вариантах отработки сближенных сильвинитовых пластов КрII и КрIII в условиях рудника ООО «Еврохим – Усольский калийный комбинат» позволили получить следующие основные результаты [10].

1. При совместной отработке пластов КрII и КрIII (первоначальная выемка в пределах всего блока прямым порядком пласта КрII и последующая отработка обратным порядком пласта КрIII) очистными камерами, шириной 5,5 метра (Западное крыло шахтного поля, комбайн «Урал-20Р») безопасность ведения горных работ не обеспечивается. Последующая отработка пласта КрIII обуславливает резкую интенсификацию процессов разрушения технологического междупластья КрII-КрIII. По мере удаления очистных работ по пласту КрIII от границы блока расслоение по глинистым контактам охватывает всю мощность междупластья КрII-КрIII, которое проявляется в увеличении деформации кровли пласта КрIII и в пучении почвы пласта КрII. Реализация этих деформационных процессов обуславливает постепенное обрушение пород кровли пласта КрIII. При подвигании фронта очистных работ на расстояние порядка 100 м от границы блока при отработке пласта КрIII прогнозируется возможность полного разрушения технологического междупластья КрII-КрIII.

Не обеспечивается безопасность горных работ и при отработке сильвинитовых пластов камерами шириной 3,2 метра (Восточное крыло шахтного поля, комбайн «Урал 61-А»). В этом случае несколько снижается интенсивность деформационных процессов, тем не менее, при подвигании фронта очистных работ по пласту КрIII на расстояние порядка 150 метров от границы блока прогнозируется полное разрушение технологического междупластья КрII-КрIII.

2. Совместная одновременная отработка пластов КрII и КрIII камерами шириной 5,5 метра с опережением (порядка 100 м) очистных работ по пласту КрII (Западное крыло шахтного поля, комбайн «Урал-20Р») также не обеспечивает безопасность ведения горных работ по пласту КрIII. Несмотря на то, что при реализации этого варианта уменьшается расслоение пород по глинистым контактам и, как следствие, в 1,5 раза снижаются вертикальные смещения кровли пласта КрIII, полное разрушение технологического междупластья КрII-КрIII может наступить при подвигании фронта очистных работ примерно на 200 метров от границы блока. Уменьшение ширины камер до 3,2 метра (Восточное крыло шахтного поля, комбайн «Урал 61-А») оказывает определенное позитивное влияние на устойчивость очистных выработок. Тем не менее, полное разрушение технологического междупластья КрII-КрIII прогнозируется на стадии ведения очистных работ по пласту КрIII при подвигании фронта очистных работ на расстояние 240 метров от границы блока.

3. В соответствии с выполненным геомеханическим анализом безопасные условия отработки сближенных сильвинитовых пластов КрII и КрIII обеспечиваются при первоначальной очистной выемке пласта КрII со степенью нагружения междукамерных целиков  $C=0,4$ , его закладке с коэффициентом заполнения камер 0,75-0,8 и отработке запасов пласта КрIII после завершения активной стадии процесса сдвижения (согласно проведенным оценкам – через 35 лет). При такой схеме ведения очистных работ в интервале пласта КрII после завершения активной стадии процесса сдвижения формируется техногенный пласт с новыми эффективными механическими свойствами. В этом случае отработка пласта КрIII является независимой по отношению к выемке пласта КрII и позволяет планировать несоосное расположение очистных камер, которое согласно выполненным геомеханическим оценкам обеспечивает более безопасные условия отработки пласта КрIII.

4. Общая оценка устойчивости очистных камер в условиях повышенной глинизации продуктивной толщи, характерной для Палашерского участка ВКМКС, показала,

что предпочтительным является ведение очистных работ комбайнами «Урал 61-А» с шириной камер 3,2 метра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Критерии и особенности разрушения слоистой кровли камер при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей / А.А. Барях, А.Ю. Шумихина, В.Н. Токсаров, С.Ю. Лобанов, А.В. Евсеев // Горн. журн. – 2011. – № 11. – С. 15-19.
2. Interaction of layers in salt deposit. 1. Mechanical properties of joints / Baryakh A.A., Dudyrev I.N., Asanov V.A., Pankov I.L. // Journal of Mining Science. – 1992. – Vol. 28, № 2. – P. 145-149.
3. Барях А.А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие / А.А. Барях, В.А. Асанов, И.Л. Паньков. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 198 с.
4. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
5. Baryakh A.A. Analysis of Time-to-Time variation of load on interchamber pillars in mines of the Upper Kama Potash Salt Deposit / Baryakh A.A., Lobanov S.Yu., Lomakin I.S. // Journal of Mining Science. – 2015. – V. 51, № 4. – P. 696-706.
6. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
7. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
8. Goodman R.E. The mechanical properties of joins // Adv. Rock Mech. – 1974. – V.1, Pt A. – P. 127-140.
9. Baryakh A.A. Sinkhole formation mechanism / Baryakh A.A., Fedoseev A.K. // Journal of Mining Science. – 2011. – V. 47, № 4. – P. 404-412.
10. Обеспечение безопасности освоения балансовых запасов сильвинита на руднике ООО «ЕВРОХИМ – УСОЛЬСКИЙ КАЛИЙНЫЙ КОМБИНАТ»: Отчет о НИР. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018.

УДК 622.831

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.23

Е.А. ТЕЛЕГИНА

*Горный институт УрО РАН*

#### **ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ КАЛИЙНОЙ РУДЫ ИЗ НЕДР**

Сложность разработки месторождений калийных солей обусловлена тем, что природные минеральные соли обладают хорошей растворимостью в воде и невысокой несущей способностью. Поэтому основными проблемами эффективного освоения соленосных бассейнов являются сохранение сплошности водонепроницаемых пород над отрабатываемыми пластами и увеличение степени извлечения калийной руды из недр. Очистная выемка запасов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей ведется, в основном, на глубине до 450 м при мощности водозащитной толщи (ВЗТ) до 120 м. До затопления рудника БКПРУ-3 единственным критерием обеспечения безопасности, и, соответственно, уровня извлечения калийных солей, считалась достаточная мощность ВЗТ. По геомеханическим расчетам при однопластовой отработке ее мощность должна была составлять

более 60 м, при двухпластовой - 80 м, а при трехпластовой - 100 м. Затопление рудника БКПРУ-3 на участке, где мощность ВЗТ достигала наибольших для месторождения значений (порядка 120 м), показало несостоятельность использования данного критерия. Возникает много вопросов, если учесть, что глубина отработки Старобинского месторождения в Белоруссии составляет до 1000 м [1] при мощности ВЗТ в нескольких сотен метров. В Канаде использование новых технологий добычи [1] даже при мощности ВЗТ порядка 15 м дает возможность разрабатывать глубоко залегающие (до 2000 м) продуктивные пласты. Калийные горизонты в Германии также приходится на глубину порядка 1000-1500 м [1] при сравнительно небольшой мощности пачки водозащитных пород.

В настоящее время шахтные поля новых предприятий размещаются, как правило, на участках месторождений со все менее благоприятными горно-геологическими условиями. Сложное строение соляной залежи Верхнекамского бассейна, изменчивость такого основного геологического фактора, как глубина разработки, и предопределило цель данных исследований – оценить влияние глубины ведения очистных работ на уровень извлечения калийной руды из недр.

Расчетная схема математического моделирования напряженно-деформированного состояния подработанного массива представлена на рис. 1.

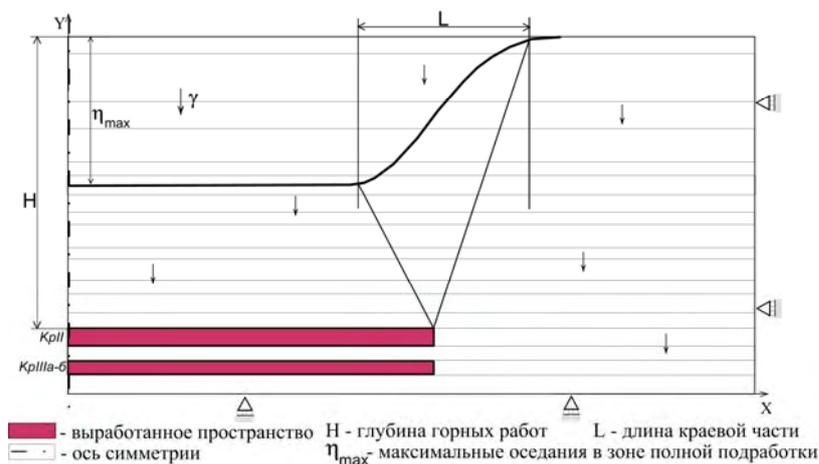


Рис. 1. Расчетная схема

Залегание пластов принималось субгоризонтальным с постоянной по латерали мощностью. Для формирования мульды сдвижения под воздействием горных работ использовался реологический подход, основанный на модификации известного метода переменных модулей [2]. Математическое моделирование процессов разрушения ВЗТ проводилось в упругопластической постановке для условий плоского деформированного состояния (ПДС). Для анализа нарушения сплошности слоев в области действия сжимающих напряжений использовался критерий Кулона-Мора [3]:

$$\tau_{\max} = \tau_{np} = C + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где  $C$  - коэффициент сцепления,  $\operatorname{tg} \varphi$  - коэффициент внутреннего трения,  $\sigma_n$  - нормальное напряжение в плоскости действия  $\tau_{\max}$ . Максимальное касательное ( $\tau_{\max}$ ) и нормальное ( $\sigma_n$ ) напряжения определялись на площадках, где отношение ( $\tau_{\max} / \tau_{np}$ ) достигает максимальных значений.

Критерий разрушения соляных пород в поле растягивающих напряжений реализовывался согласно соотношению:

$$\sigma_1 = \sigma_{расч} \quad (2)$$

Численная реализация математического моделирования осуществлялась методом конечных элементов, решение упругопластической задачи - методом начальных напряжений [4, 5]. Разрушение пород ВЗТ в области сжатия означало развитие трещин сдвига, в области растяжения - трещин отрыва.

Ввиду меньшей прочности карналлитовых пород по сравнению с каменной солью предполагалось [6], что устойчивость ВЗТ определяется суммарной мощностью слоев каменной соли, в которых не возникают трещины сдвига и отрыва при деформировании подработанного массива.

Для установления взаимосвязи между глубиной разработки и извлечением калийной руды из недр выполнялось многовариантное математическое моделирование процесса деформирования подработанного массива. Расчетные варианты определялись такими основными параметрами мульды сдвижения [7] как: длина ее краевой части ( $L$ ), максимальные оседания земной поверхности в зоне полной подработки ( $\eta_{max}$ ) и глубина горных работ ( $H$ ). Для Верхнекамского месторождения длина краевой части мульды сдвижения при полной подработке [6] составляет  $L = 1,54H$ . Геомеханические расчеты проводились при постоянном значении  $L$  в динамике нарастания оседаний земной поверхности  $\eta_{max}$  при вариации глубины горных работ  $H$  в диапазоне от 300 м до 450 м с интервалом 50 м. Мощность ВЗТ составляла порядка 100 м.

В процессе деформирования ВЗТ наибольшая опасность в связи с нарушением ее сплошности связана с образованием субвертикальных трещин. В случае, если зона такой трещиноватости охватывает всю мощность ВЗТ, формируется канал для проникновения надсолевых пресных вод в выработанное пространство рудника, что неминуемо ведет к его гибели. В связи с этим, в расчетных вариантах по мере нарастания оседаний земной поверхности от 0,5 м до некоторой величины  $\eta_k = 0,9m\omega$ , производилась оценка потенциальной возможности формирования в краевой части выработанного пространства трещин субвертикальной ориентации. Максимально достижимые оседания в зоне полной подработки ограничивались конечными вертикальными сдвигами [1]  $\eta_{max} = \eta_k = 0,9m\omega$ , соответствующими завершению процесса сдвижения и определяемыми конкретными параметрами камерной системы разработки, а, следовательно, и уровнем извлечения. Такой подход [13] позволяет непосредственно при расчетах накапливать пластические деформации в пластах ВЗТ и отражать динамику техногенного нарушения ее сплошности.

Характер изменения оседаний земной поверхности в зависимости от глубины горных работ при фиксированном максимальном оседании в зоне полной подработки иллюстрируется на рис.2.

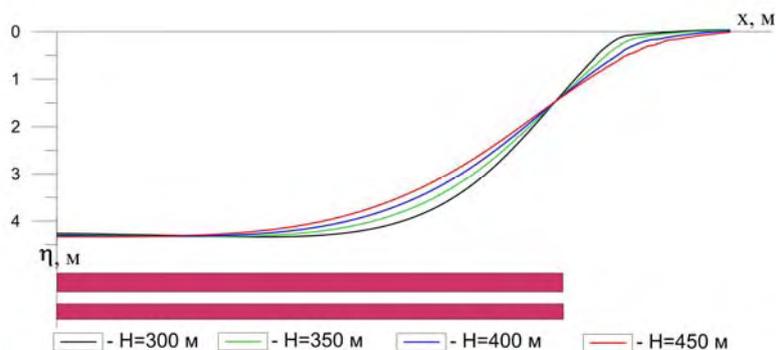


Рис. 2. Характер изменения оседаний земной поверхности в зависимости от глубины горных работ

Как видно, с увеличением глубины горных работ крутизна мульды сдвижения, и, соответственно, максимальный градиент оседаний земной поверхности в краевой части отработанного пространства уменьшаются, что свидетельствует о вероятном снижении величины техногенного воздействия на пласты ВЗТ и повышении их безопасности.

Динамика разрушения пластов, развитых в интервале ВЗТ, в зависимости от глубины горных работ при указанном выше характере изменения оседаний земной поверхности приведена на рис.3.

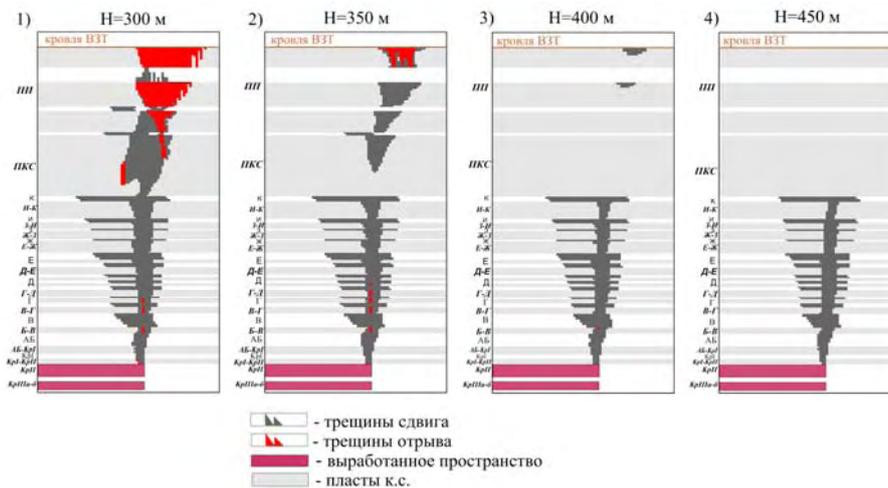


Рис. 3. Характер нарушения сплошности ВЗТ в зависимости от глубины отработки

С увеличением глубины отработки критическая величина оседания земной поверхности, при которой происходит полное разрушение пластов ВЗТ, а, следовательно, и соответствующий ей уровень извлечения, повышаются.

Для установления взаимосвязи между степенью нарушенности пластов ВЗТ и уровнем извлечения калийной руды в зависимости от глубины горных работ проводилась количественная оценка разрушения слоев межпластовой и внутрипластовой каменной соли, развитых по разрезу ВЗТ. Оценка выполнялась для деформаций ВЗТ, соответствующих концу процесса сдвижения ( $\eta_{\max} = \eta_k = 0,9m\omega$ ). На рис.4 иллюстрируется изменение относительной суммарной мощности нарушенных пластов каменной соли  $\bar{M}$  в зависимости от уровня извлечения руды из недр и глубины отработки. Критериальный параметр  $\bar{M}$  определялся согласно следующему соотношению:

$$\bar{M} = M_n / M_S, \quad (3)$$

где  $M_n$  - суммарная мощность нарушенных пластов каменной соли,  $M_S$  - общая суммарная мощность пластов каменной соли, развитых в интервале ВЗТ.

Выполненный анализ показал, что вне зависимости от глубины разработки при извлечении до 40-45% сохранность ВЗТ обеспечивается. При этом разрушению подвержено до 20-30% суммарной мощности пластов каменной соли. Дальнейшее повышение коэффициента извлечения обуславливает резкое увеличение суммарной мощности нарушенных слоев каменной соли при средних глубинах разработки 300-350 метров. Для глубин ведения горных работ в диапазоне 400-450 метров извлечение по критерию безопасных условий подработки ВЗТ может быть

повышено до 50%. Однако, в этом случае ограничительным барьером будет являться регламентированная допустимая степень нагружения междукамерных целиков для условий ВКМКС  $[C]=0,4$  [6].

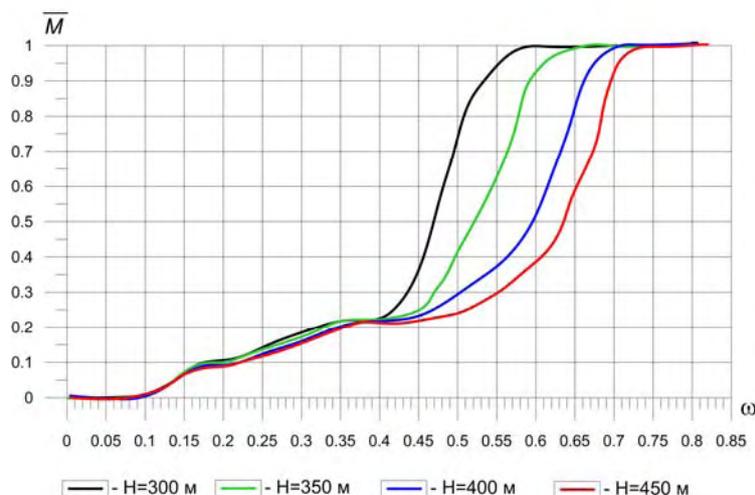


Рис. 4. Изменение относительной суммарной мощности нарушенных пластов каменной соли в зависимости от уровня извлечения калийной руды при различной глубине отработки

Оценка зависимости коэффициента извлечения руды из недр от глубины горных работ при регламентированной степени нагружения целиков может быть произведена по формуле:

$$\omega = \frac{\gamma H a}{b \sigma_n [C]}, \quad (4)$$

где  $a$  – ширина очистной камеры,  $b$  – ширина междукамерного целика,  $\gamma$  – объемный вес пород,  $\sigma_n$  – расчетная несущая способность целика,  $[C]$  – допустимая степень нагружения междукамерного целика.

Принимая в выражении (4) ширину камеры  $a=5,2$  и суммарную вынимаемую мощность пластов КрII и КрIII, равной  $m=6, 8, 10, 12$  м, с учетом фактических свойств пород для различных глубин легко определить уровень извлечения, соответствующий допустимой степени нагружения междукамерных целиков  $[C]=0,4$ . Данные графики (1,2,3,4) (рис.5) являются в определенной мере условными, могут несколько видоизменяться при вариации принятых параметров отработки, но с очевидностью отражают тенденцию снижения извлечения с ростом глубины горных работ по критерию допустимой степени нагружения целиков. Зависимость (А) (рис.5) получена по результатам многовариантного математического моделирования процесса разрушения ВЗТ. В качестве критерия безопасных условий подработки ВЗТ принято условие резкого нарастания техногенной нарушенности пластов (слоев) каменной соли, развитых в разрезе ВЗТ (перегиб кривых на рис. 4).

Результаты выполненного анализа показывают (рис. 5), что при глубинах разработки, не превышающих 300 метров вне зависимости от суммарной вынимаемой мощности, коэффициент извлечения ограничивается допустимой степенью нагружения междукамерных целиков. При суммарной вынимаемой мощности 8 метров в диапазоне глубин 300-450 коэффициент извлечения уменьшается от 35 до 28%. С увеличением суммарной вынимаемой мощности пластов КрII и КрIII извлечение руды из недр уменьшается до 25-30%.

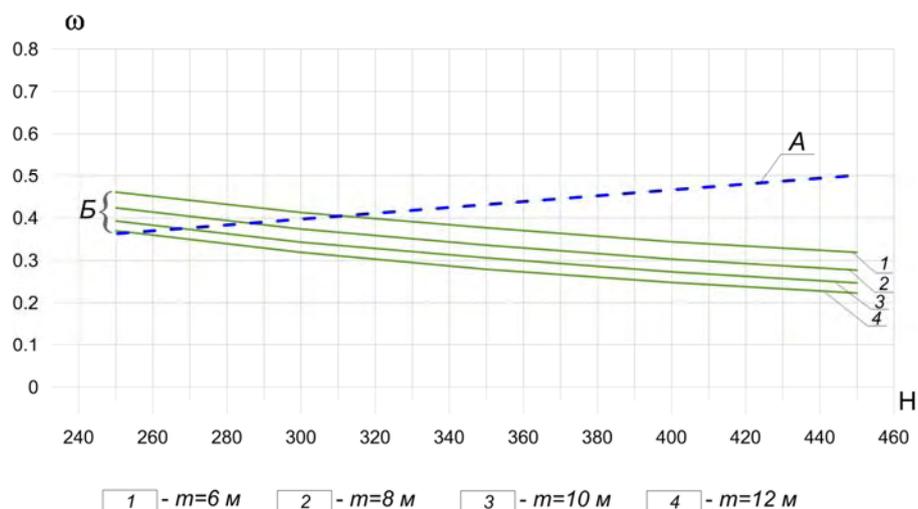


Рис. 5. Зависимость коэффициента извлечения от глубины горных работ по критерию безопасных условий подработки ВЗТ (А) и допустимой степени нагружения целиков (Б) при различной суммарной вынимаемой мощности пластов КрII и КрIII (1,2,3,4)

С учетом этих положений, для средних (нормальных) горно-геологических условий в зависимости от глубины ведения горных работ уровень извлечения, обеспечивающий безопасные условия подработки ВЗТ и допустимую степень нагружения междокамерных целиков, составляет 25-35%.

В случае наличия аномальных особенностей в строении ВЗТ величина коэффициента извлечения будет определяться степенью снижения механических свойств соляных пород в пределах выделенных аномальных зон и их пространственным положением относительно выработанного пространства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира / Батулин Е.Н., Меньшикова Е.А., Блинов С.М., Наумов Д.Ю., Белкин П.А. // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 613.
2. Барях А.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов / А.А. Барях, Н.А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – №6. – С. 32-41. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – С. 4.
3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
4. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
5. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: технолог. регламент / ВНИИГ. – СПб., 2008. – 88 с.
6. Турчанинов И.А. Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Недра, 1989. – 488 с.: ил.

А.К. ФЕДОСЕЕВ

*Горный институт УрО РАН*

**О ПОДХОДАХ К ГЕОМЕХАНИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ  
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ  
В СЛОИСТОМ ГАЗОНАСЫЩЕННОМ СОЛЯНОМ МАССИВЕ**

Условием реализации газодинамических явлений (ГДЯ) является наличие газовых скоплений в приконтурной части породного массива. В случае, когда эти газовые скопления приурочены к глинистым прослойкам и слоям в соляных породах, геомеханическими предпосылками к проявлению ГДЯ является раскрытие глинистых контактов [1,2], что приводит к образованию каналов миграции свободных газов, и формированию техногенных газонасыщенных зон под воздействием горных работ.

В работах [1, 2] было проведено исследование деформирования и разрушения приконтурной части выработанного пространства в процессе выемки продуктивных пластов при наличии в соляном массиве глинистых прослоев для различных способов отработки. Раскрытие глинистых контактов считалось достаточным критерием возможности формирования очага ГДЯ. На основе этого критерия определялись локализация и момент возможных внезапных выбросов соли и газа. В то же время исследования, проведенные в работе [3], показали, что величина давления вносит существенный вклад в характер разрушения приконтурной части соляного массива и, собственно, является определяющим фактором возможности ГДЯ.

Для предварительной оценки влияния давления газа в глинистых контактах на вероятность реализации ГДЯ в данной работе проводилось математическое моделирование напряженно-деформированного состояния пород почвы в условиях слоевой выемки Третьего пласта в рудниках Старобинского месторождения.

Постановка задачи в целом повторяет [1,2] – рассматривается продольное сечение столба при движении лавы для типового, для Старобинского месторождения, геологического разреза (рис. 1). Существенным отличием, по сравнению с предыдущими работами, является наличие постоянного давления в контакте.

Результаты математического моделирования деформирования и разрушения пород вокруг выработанного пространства при отходе от монтажного штрека при наличии двух глинистых прослоев в почве лавы представлены на рис. 2. Наличие давления в глинистом контакте влияет как на увеличение амплитуды его раскрытия, так и на общий характер разрушения окружающего массива. В процессе движения лавы происходит рост областей нарушенности в краевых частях раскрытого контакта (рис. 2 а, б). В момент, когда эти области становятся «сквозными» (рис. 2 в), может произойти динамический отрыв слоя каменной соли до раскрытого контакта. При этом, закрытый ранее глинистый контакт раскрывается (рис. 2 г), что может привести к отрыву и следующего слоя.

Таким образом, предложенные в работах [1,2] геомеханические модели позволяют решать задачи формирования очагов ГДЯ с учетом давления газа в глинистых прослоях. Результаты моделирования демонстрируют значительное вклад величины давления на возможность реализации ГДЯ. Показано, что при отходе лавы от монтажного штрека создаются условия для формирования многоярусного очага ГДЯ, образовавшегося при раскрытии газонасыщенных глинистых контактов. При этом в случае развития газодинамического явления в виде разрушения пород почвы, сопровождающегося газовойделением, разрушение будет происходить в виде последовательного отрыва слоев ПКС, разделяющих раскрытые контакты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований (проект № 18-05-00371А)*

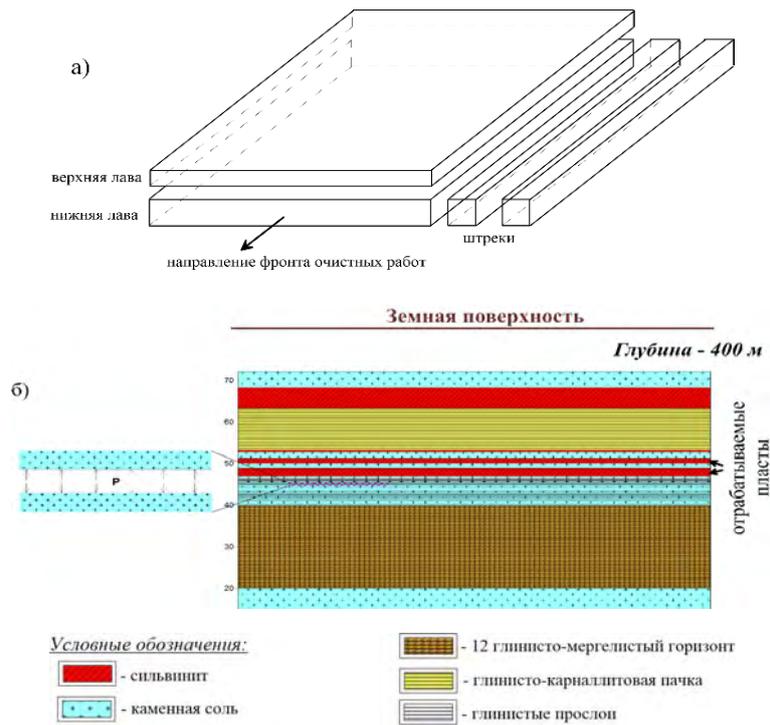


Рис. 1. Обобщенная схема отработки (а) и характерный геологический разрез (б) Старобинского месторождения

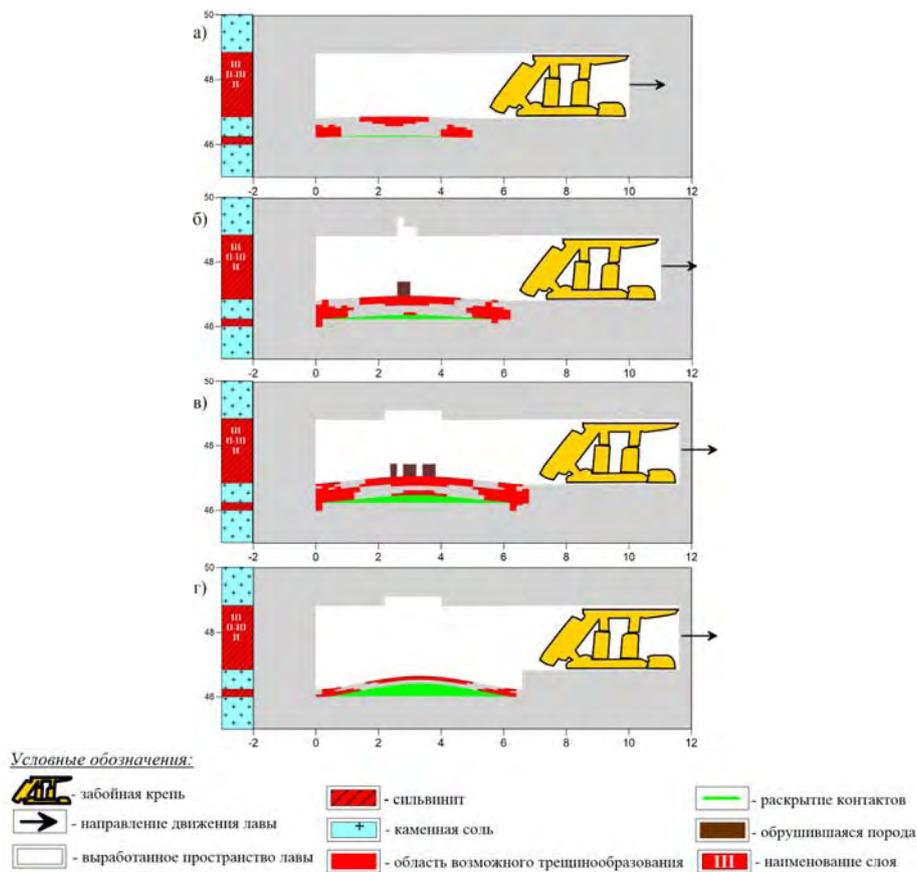


Рис. 2. Характер разрушения породного массива при отходе от монтажного штрека при наличии давления газа в глинистых прослоях в почве выработанного пространства

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geo mechanical Estimation of Danger of Gas-Dynamic Failure During Potash Deposits Mining / S. Andreiko, A. Baryakh, S. Lobanov, A. Fedoseev // ISRM European Rock Mechanics Symposium (EUROCK). – 2017. – V. 191. – P. 954-961. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.266
2. Барях А.Б. О механизме локализации очагов газодинамических явлений в почве сильвинитовых пластов / А.Б. Барях, С.С. Андрейко, А.К. Федосеев // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3.– С. 247-254.
3. Лобанов С.Ю. Возможные механизмы разрушения кровли выработки под воздействием газового фактора // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 79-83.

УДК 622.831

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.25

С.Ю. ДЕВЯТКОВ

*Горный институт УрО РАН*

### **ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АВАРИЙНЫХ ЗАТОПЛЕНИЯХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ**

Разработка месторождений водорастворимых руд возможна только при сохранении целостности водоупорного целика, отделяющего выработанное пространство рудника от водоносных горизонтов, называемого в практике горных работ водозащитной толщей (ВЗТ). Нарушение сплошности ВЗТ обуславливает прорыв пресных или слабоминерализованных вод в горные выработки. В связи с высокой растворимостью минеральных солей, это, зачастую, приводит к полному затоплению рудника и его гибели [1].

К одним из основным негативным последствий затопления калийных рудников относится интенсификация процесса деформирования подработанного породного массива [2, 3], вызванного растворением соляных пород. При этом возможно образование провала, который представляет собой переход статических деформаций массива, проявляющихся в виде оседаний земной поверхности, в динамическую форму – обрушение. Это представляет реальную угрозу безопасной жизнедеятельности территорий, приводит к значительным финансовым убыткам и негативным социально-экономическим и экологическим последствиям [4].

Провалы на земной поверхности, связанные с аварийным затоплением, можно разделить на две группы по механизму их формирования (рис. 1):

1. Провалы, образовавшиеся в результате растворения солей во время затопления рудников. Поступающие в рудник надсолевые воды формируют в месте прорыва техногенные карстовые полости, вызывающие деформации земной поверхности, которые при определённых условиях переходят в динамическую форму с образованием провала. Положение данного типа провалов на земной поверхности достаточно хорошо согласуется с местом прорыва надсолевых вод в выработанное пространство рудника.

2. Вторичные провалы, произошедшие уже после затопления рудника в результате растворения целиков, обрушения кровли выработок и выщелачивания вышележащих пластов. При наличии достаточного объёма ненасыщенного рассола этот процесс

будет происходить бесконечно длительное время с формированием полостей растворения значительных размеров.

Обычно, предшествующие образованию провала ускоренные оседания земной поверхности наблюдаются на относительно небольших площадях, что обуславливает формирование мульд сдвига с высокими градиентами оседаний. Выполненное многовариантное математическое моделирование показало [5], что обеспечение подобных градиентов оседаний невозможно без введения в расчётную схему областей в интервале надсоляной толщи, ослабленных по прочностным и деформационным свойствам пород. В физическом отношении их формирование означает, что в результате процесса деформирования массива происходит разрушение пород в верхней части геологического разреза.

При этом также может происходить нарушение сплошности ВЗТ вследствие образования в ней трещин различной ориентации, расслоения по контактам слоёв и прослоев. В случае образования сквозной зоны трещиноватости, простирающейся от водоносных горизонтов до отработанных пластов, в ВЗТ формируются каналы проникновения надсолевых вод в горные выработки. Растворение пород в верхней части соляной толщи и формирование в надсоляной толще ослабленной по прочностным и деформационным свойствам области, вследствие миграции пресных вод и сопутствующих им суффозионных и карстовых процессов, создают предпосылки для образования провала в месте прорыва пресных вод в рудник.

Согласно выполненным расчётам [6] можно прогнозировать образование провала при достижении каналом радиуса 5-10 метров со средней скоростью его увеличения в 2-5 см/сутки. С учётом этого было проведено математическое моделирование аварийного затопления рудника, на примере аварии 2006/07 годов на руднике БКПРУ-1, последовательно на моменты времени от начала поступления надсолевых вод в выработанное пространство (17 октября 2006 года) до образования провала на земной поверхности (28 июля 2007 года).

На момент прорыва надсолевых вод в ВЗТ фиксируется сквозная зона техногенной нарушенности, в пределах которой вероятно образование водопроводящего канала (рис. 2а). При этом для обеспечения наблюдаемых градиентов оседаний потребовалось введение в расчётную схему «ослабленных» областей в интервале ВЗТ и в верхней части геологического разреза. Значения прочностных и деформационных свойств в них были снижены в 1,5-2,5.

К июлю 2007 г. зона техногенной нарушенности простирается уже от выработанного пространства до земной поверхности (рис. 2б), что можно трактовать как потенциальную возможность образования провала. Радиус канала при этом превышает 5 м при скорости его увеличения в 2 см/сутки. Снижению механических свойств в надсоляной толще в «ослабленной» области составило 2,6 раза, при этом посредственно в районе максимальных оседаний достигло 6 раз. По всей видимости достижение данного уровня может служить количественным критерием перехода статических деформаций в динамическую форму с последующим образованием провала в случае наличия достаточной по объёму полости растворения в ВЗТ.

После затопления рудника образование полостей выщелачивания на участках отработки карналлитовых пород обуславливает неоднородный характер деформации подработанного массива с локальными участками активизации оседаний земной поверхности. Наблюдаемые при этом мульды сдвига обладают высокими градиентами оседаний, для обеспечения которых требуется введе-

ния в расчётную схему «ослабленных» областей в надсоляной толще. Объединение полости растворения и «ослабленной» области создаёт предпосылки к образованию вторичных провалов на земной поверхности над полностью затопленным рудником.

Верификация данных условий проводилась для участка «панели переходного периода» («ППП») затопленного рудника БКПРУ-1 [5].

В конце 2011 – начале 2012 гг. (через 3 года после полного затопления рудника) в северной части этой площади началась активизация процессов сдвижения. Предположения что ускорение деформаций подработанного массива происходит за счёт уменьшения интегральных механических свойств пород отработанного карналлитового пласта, обусловленного выщелачиванием хлорида магния, оказываются достаточными для описания процесса деформирования вплоть до конца 2012 г. Разрушение подработанного массива при этом не наблюдается (рис. 3а).

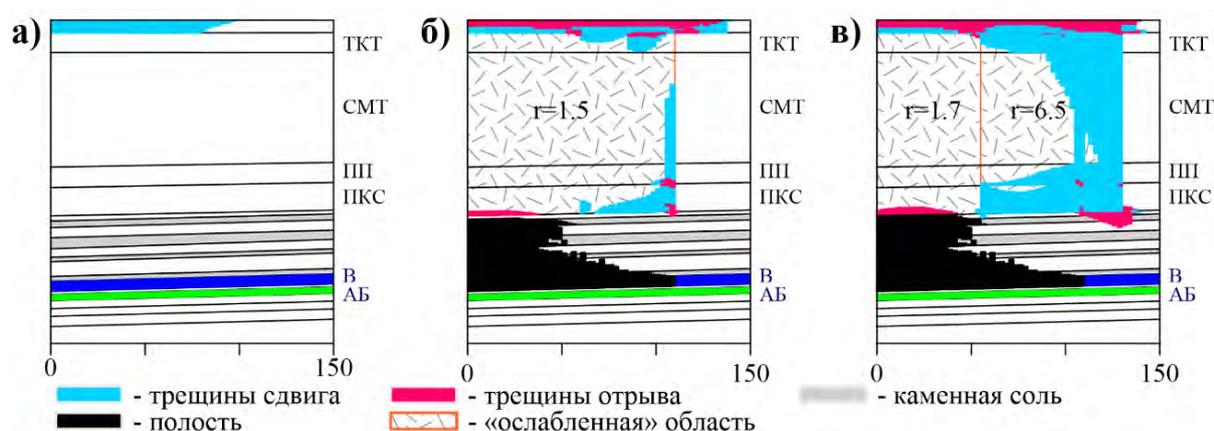


Рис. 3. Результаты математического моделирования процесса образования провала на конец 2012 (а), 2013 (б) и 2014 (в) годов

Дальнейшее описание процесса деформирования оказывается возможным только при включении в расчётную схему «ослабленной» области, развитой в верхней части геологического разреза, и обеспечении возможности формирования полости растворения в интервале соляной толщи. Согласно выполненным критериальным оценкам состояния массива, отмечается быстрое увеличение полости по вертикали и её выход к почве ПКС уже к концу 2013 года, степень снижения механических свойств пород в пределах «ослабленной» области по отношению к нормативным значениям составляет  $r = 1,5$ . Образование сквозной зоны техногенной нарушенности, способной инициировать образование провала на земной поверхности, на этот момент времени не наблюдается (рис. 3б).

Интенсивное нарастание оседаний земной поверхности, наблюдавшееся в течение 2014 года, в геомеханических расчётах отражалось постепенным снижением (до 1,7) механических свойств пород в пределах «ослабленной» области (рис. 3в). При этом потребовалось задать более высокую ( $r = 6,5$ ) степень снижения в её краевой части (рис. 3в). Согласно расчётам в этом случае становится возможным формирование сквозной нарушенной зоны, простирающейся от кровли полости растворения до земной поверхности (рис. 3в). Таким образом, на конец 2014 года создаются предпосылки к образованию провала на земной поверхности. Провал пород на данном уча-

стке шахтного поля произошёл 17 февраля 2015 года, что достаточно хорошо соответствует расчётам.

Таким образом, выполненные расчёты выявили, что формирование мульд сдвижения с высокими градиентами оседаний земной поверхности сопряжено с процессом разрушения надсоляной толщи и формированием локальных «ослабленных» областей. Сформулированы условия, создающие при этом предпосылки перехода статических деформаций в динамическую форму с образованием провала на земной поверхности. Показана принципиальная возможность прогноза положения и размера провала, а также диапазонной оценки времени его образования в процессе прорыва надсолевых вод в рудник и после его полного затопления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шиман М.И. Предотвращение затопления калийных рудников. – М.: Недра, 1992. – 160 с.: ил.
2. Prugger F.F. Water problems in Saskatchewan potash mining – what can be learned from them / F.F. Prugger, A.F. Prugger // CIM Bulletin. – 1991. – V. 84, № 945. – P. 58-66.
3. Барях А.А. Геомеханическая оценка интенсивности деформационных процессов над затопленным калийным рудником / А.А. Барях, Н.А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 4. – С. 33-46.
4. Ponomarenko T.V. Экологические, экономические и социальные последствия аварийных ситуаций на калийных рудниках = Ecological, economic and social consequences of emergencies on potash mines // Management Systems in Production Engineering. – 2012. – № 2 (6). – С 28-31.
5. Барях А.А. Теоретическое обоснование условий образования провалов на земной поверхности после аварийного затопления калийных рудников / А.А. Барях, С.Ю. Девятков, Н.А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С. 50-61.
6. Девятков С.Ю. Диапазонная оценка условий формирования провалов на земной поверхности при прорыве пресных вод // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 100-102.

УДК 622.834

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.26

И.С. ЛОМАКИН

*Горный институт УрО РАН*

### **ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭФФЕКТОВ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Анализ деформирования подработанного массива во времени основан на тематическом описании фактических и/или прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности [1]. Безусловно, наличие информации о развитии процесса сдвижения вдоль всего расчетного профиля позволяет более адекватно описать процессы деформирования подработанного массива во времени. Однако не всегда такие сведения имеются в полном объеме. Порой данные об оседаниях земной поверхности определены в одной или нескольких точках геомеханического профиля. В некоторых случаях наблюдается несоответствие данных инструментальных наблюдений и прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверх-

ности, определяемых по нормативному документу [2]. В такой ситуации, по возможности, проводится анализ развития процесса сдвижения на прилегающих участках с близкими параметрами камерной системы разработки. Порой это позволяет провести некоторую корректировку прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности.

При исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) ВЗТ в районе 15 западной панели (ЗП) рудника БКПРУ-2 (рис. 1) вдоль широтного геомеханического профиля *B2-17-01D2* информация об оседаниях земной поверхности была определена в трех точках пересечения с маркшейдерскими профильными линиями над выемочными зонами Z5 (Rp-30, проф. линия XXI), Z8 (Rp-79, проф. линия II), Z9 (Rp-30, проф. линия XXII).

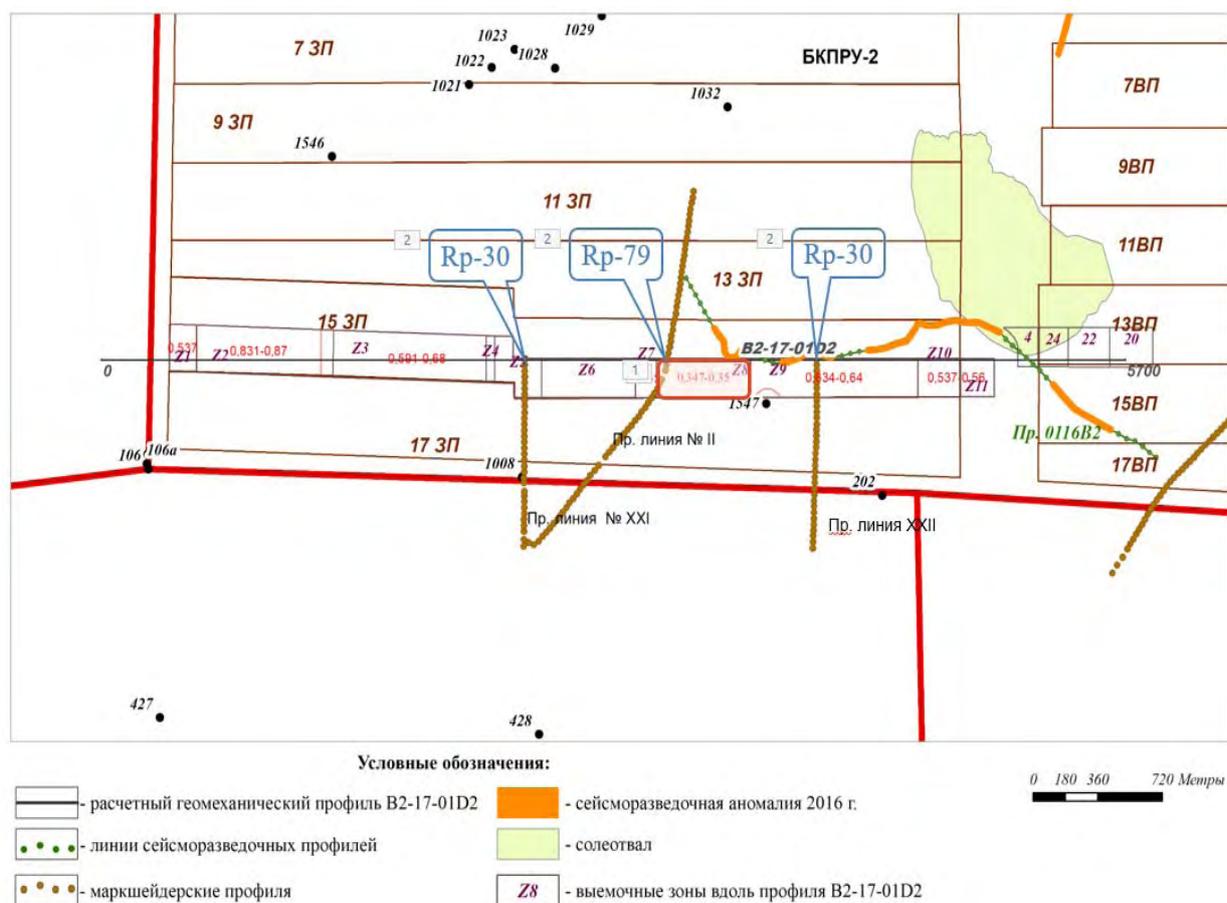


Рис. 1. Обзорная схема района исследования

При этом по реперам над выемочными зонами Z5 и Z9 полную историю нарастания оседаний земной поверхности (рис. 2, а, б) воссоздать не удалось, ввиду того, что эти профильные линии были заложены в 2011 году. Отработка же пластов АБ (со степенью нагружения  $C_{AB}$  не более 0.35) и КрII ( $C_{КрII}$  варьировалась от 0.54 до 0.8) на 15 ЗП велась с 1991 по 2005 год. Единственный участок, на котором расчетная степень нагружения  $C_{КрII}$  составила 0.35 – выемочная зона Z8. Для этого участка построена фактическая полная кривая нарастания оседаний земной поверхности по Rp-79, проф. линия II (рис. 2, в).

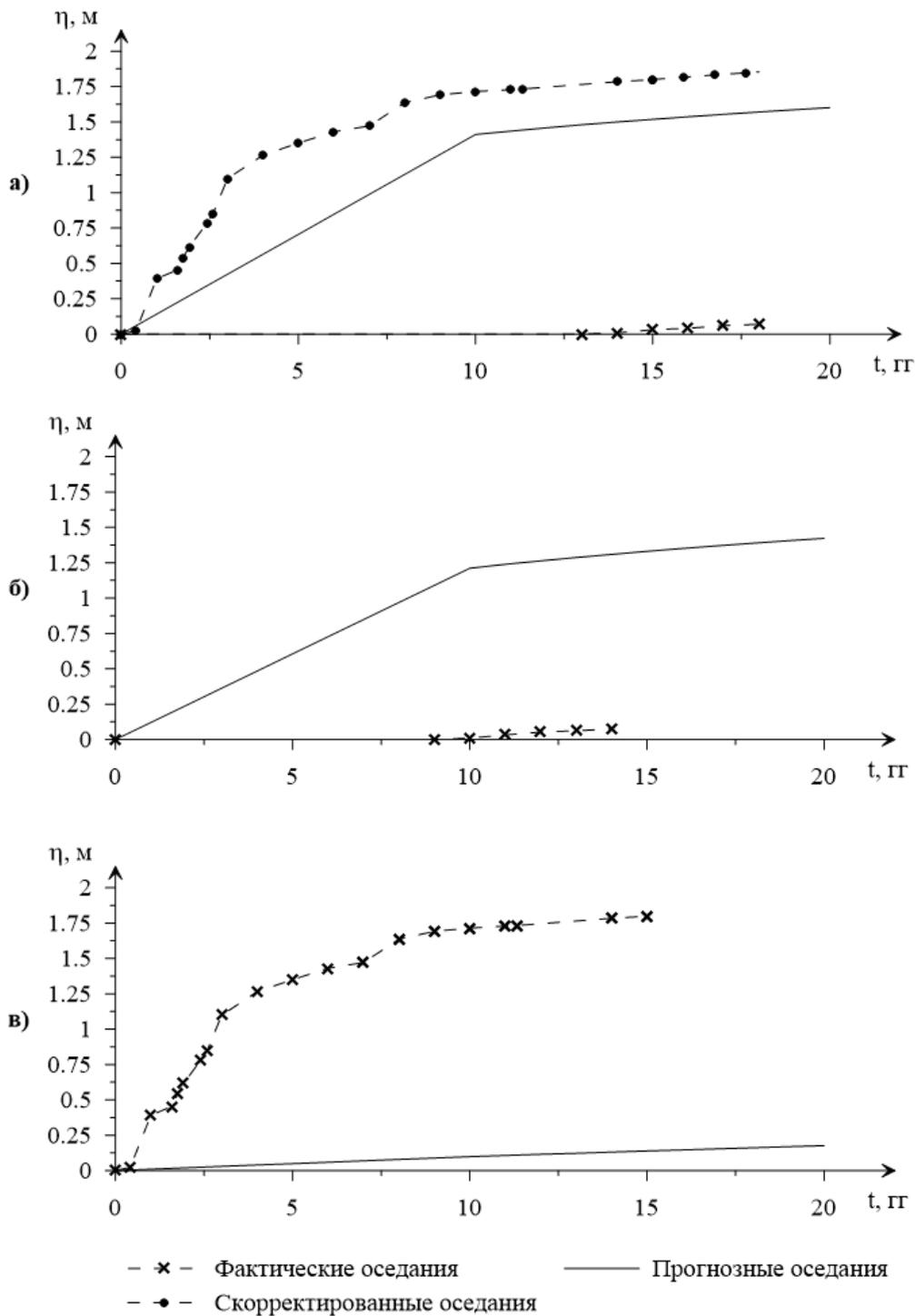


Рис. 2. Графики нарастания оседаний земной поверхности для выемочных зон: а) Z5 (Rp-30 PR-XXI), б) Z9 (Rp-30 PR-XXII), в) Z8 (Rp-79 PR-II)

Из представленных графиков видно, что для зон Z5 и Z9 прогнозная скорость нарастания оседаний в достаточной степени согласуется с регистрируемыми значениями. В тоже время, величина ожидаемых оседаний должна быть значительно больше, что не отражают инструментальные наблюдения ввиду позднего заложения реперов. Обратная ситуация в выемочной зоне Z8. Здесь регистрируемые оседания значительно превышают прогнозные значения (более 1.5 м).



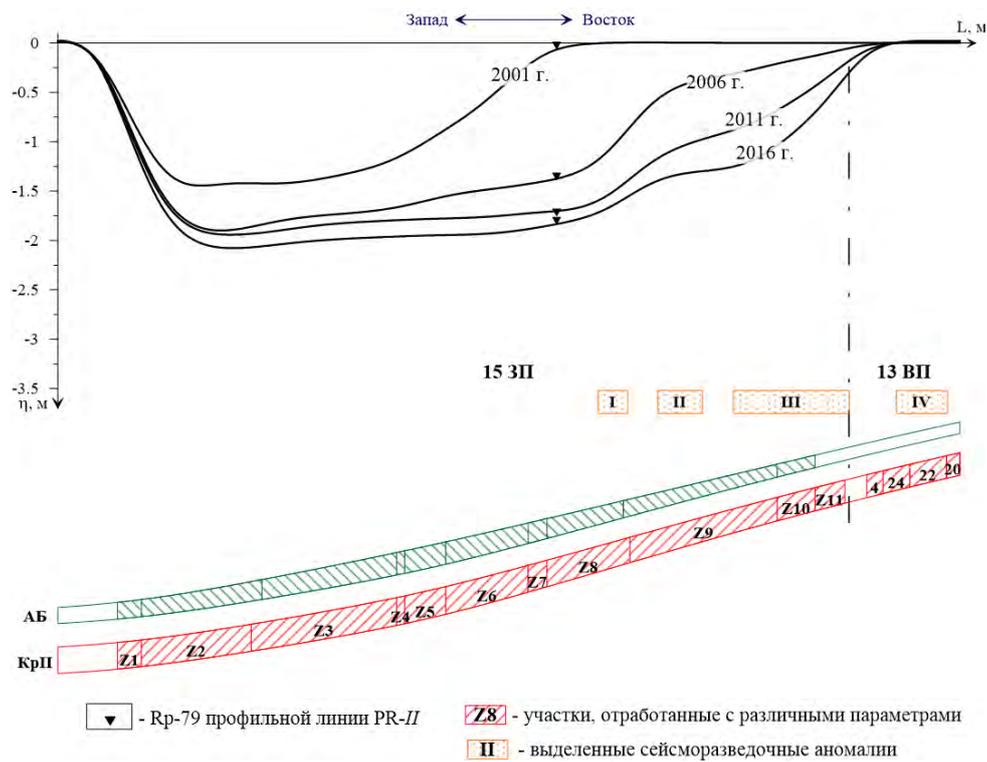


Рис. 4. Ретроспективные расчетные оседания земной поверхности вдоль геомеханического профиля.

Прогноз развития процесса сдвижения во времени по результатам математического моделирования представлен на рис. 5.

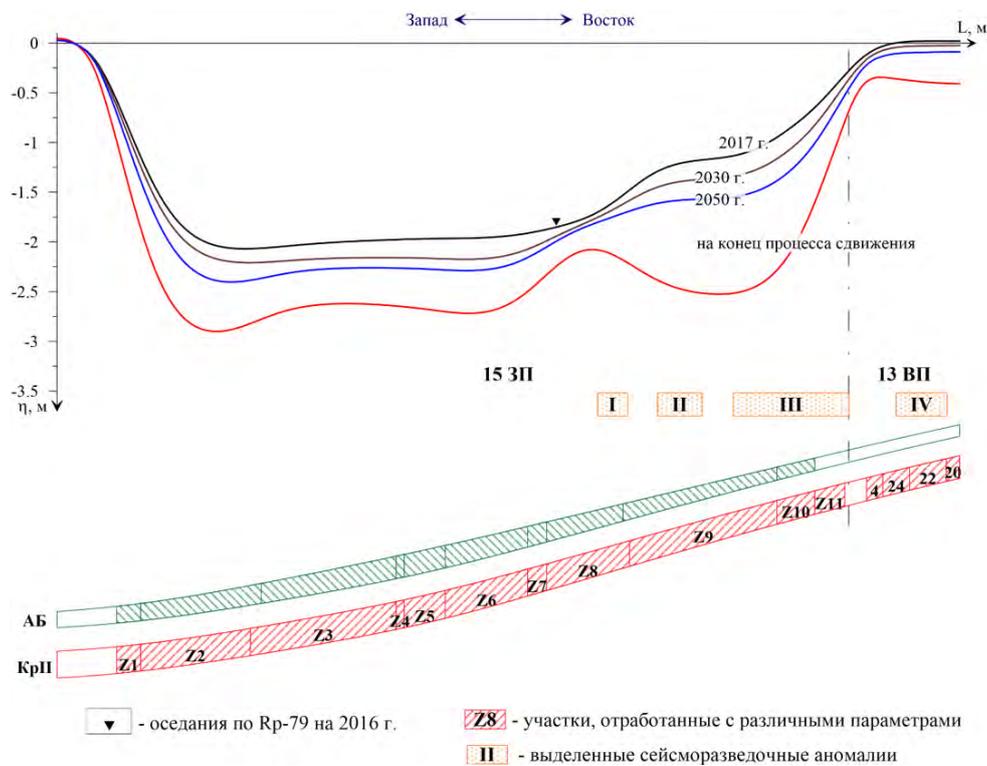


Рис. 5. Прогнозные расчетные оседания земной поверхности вдоль геомеханического профиля

Таким образом, в ряде случаев, анализ развития процесса сдвижения на прилегающих участках с близкими параметрами камерной системы разработки и общий анализ района исследования позволяет провести корректировку графиков нарастания оседаний земной поверхности и добиться приемлемого согласования расчетных и наблюдаемых значений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барях А.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов / А.А. Барях, Н.А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 6. – С. 32-41.

2. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.

УДК 622.834

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.27

А.А. ЦАЮКОВ, И.С. ЛОМАКИН

*Горный Институт УрО РАН*

### **О ДЕФОРМАЦИОННОМ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ**

В пределах Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) сильвинитовые пласты АБ и КрII разрабатываются камерной системой. Степень устойчивости междукамерных целиков (МКЦ) определяется физико-механическими свойствами горных пород, горнотехническими и горно-геологическими условиями добычи полезного ископаемого. Существенное влияние на несущую способность МКЦ оказывает состояние кровли очистных камер и особенно технологического междупластья АБ–КрII. Наличие глинистых прослоев снижает устойчивость пород кровли очистных камер, обуславливая её интенсивное расслоение [1,2] вплоть до обрушения междупластья АБ–КрII. Определение степени их нагружения базируется на методике Турнера–Шевякова [3,4], модифицированной с учётом результатов экспериментальных исследований, выполненных на ВКМС. Эта методика обеспечивает вполне приемлемую для практики точность оценок только для простых горно-геологических и горнотехнических условий разработки. Современные подходы, основанные на методах математического моделирования, позволяют проводить анализ предельных состояний несущих элементов камерной системы разработки, более детально описывая слоистую структуру соляного массива, учитывая взаимосвязанные процессы разрушения краевых частей выработок и вводя фактор времени, соответствующий временному масштабу реальных геомеханических процессов.

В работе предложен критерий устойчивости МКЦ, основанный на оценке критических значений скорости поперечного деформирования целиков, полученных по результатам анализа изменения степени их нагружения во времени.

Анализ изменения степени нагружения МКЦ во времени базировался на математическом моделировании напряжённо-деформированного (НДС) состояния двухпластового камерного блока с учётом взаимосвязанных процессов разрушения технологи-

ческого междупластья и краевых частей целиков. Принципиальная расчётная схема изображена на рис. 1.

Рассматривался камерный блок, находящийся под действием массовых сил интенсивностью  $\gamma_i$ . На верхней горизонтальной границе задавалась распределённая нагрузка  $\gamma H$ . На боковых границах отсутствовали горизонтальные, а на нижней — вертикальные смещения. В интервале междупластья рабочих пластов выделялись прослой глины и глинистые коржи.

Математическое моделирование процесса разрушения междупластья проводилось в постановке плоской деформации. Напряжённое состояние камерного блока описывалось идеальной упруго-пластической средой, для которой связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии определялась законом Гука. Предельные напряжения в области сжатия вычислялись по линейной огибающей кругов Мора. В области растяжения предельное напряжение ограничивалось пределом прочности на растяжение.

Численная реализация осуществлялась методом конечных элементов в перемещениях [5]. В качестве подобластей дискретизации рассматриваемой области использовались двумерные симплекс-элементы.

При численном моделировании деформирования глинистых контактов между слоями использовались контактные элементы Гудмана [6]. Здесь связь нормального напряжения ( $\sigma_n$ ) с соответствующей деформацией ( $\delta_n$ ) описывалась линейным уравнением

$$\sigma_n = k_n \delta_n, \quad (2)$$

а для касательных напряжений ( $\tau_s$ ), действующих по линии глинистого контакта, связь с деформацией сдвига ( $\delta_s$ ) определялась трёхзвенной кусочно-линейной аппроксимацией [7]

$$\tau_s = \begin{cases} k_s \delta_s & \text{при } 0 < \delta_s \leq \delta_p, \\ \tau_p - k_m (\delta_s - \delta_p) & \text{при } \delta_p < \delta_s \leq \delta^*, \\ \tau^* & \text{при } \delta_s > \delta^*. \end{cases} \quad (3)$$

В уравнении (2)  $k_n$  — нормальная жёсткость контакта. При  $\delta_n > 0$  контакт считался раскрытым и принималось  $k_n = 0$ . В выражении (3)  $k_s$  — сдвиговая жёсткость контакта;  $k_m$  — сдвиговая жёсткость контакта на участке разупрочнения;  $\tau_p$  — пиковая прочность контакта;  $\tau^*$  — остаточная прочность.

В качестве критерия обрушения пород междупластья принимались условия [8,9]: выход зоны действия растягивающих напряжений на обнажение (граница “массив–камера”) и достижение областью сдвиговой трещиноватости зоны расслоения по глинистым контактам.

При численной оценке степени нагружения МКЦ использовался энергетический критерий

$$K = \sigma_i / \sigma_m \leq 1, \quad (4)$$

где  $\sigma_m$  — агрегатная прочность пород в массиве,  $\sigma_i$  — интенсивность касательных напряжений. Связь степени нагружения МКЦ с величиной (4) определялась выражением

$$C \approx K^*, \quad (5)$$

где  $K^*$  соответствует максимальному значению величины  $K$ , достигаемому в каждом вертикальном сечении целика [10].

Натурные наблюдения показывают, что деформирование МКЦ во времени реализуется, в основном, в режиме ползучести с постепенной потерей их несущей способности [11]. Это позволяет для анализа влияния временного фактора на степень нагружения целиков использовать в расчётах процедуру переменных модулей деформации

[12], а математическое описание изменения прочностных характеристик выполнять в соответствии с кривой длительной прочности, построенной на основе прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности [13] (рис. 2).

Геомеханические расчёты представляли собой четыре (по числу вариантов набора параметров отработки, табл. 1) серии численных экспериментов в виде шаговой процедуры. На каждом шаге решалась задача определения временного отрезка, в течение которого исходная степень нагружения ( $C_0$ ) междукамерных целиков на пласте КрII вследствие разрушения технологического междупластья и краевых частей целиков, а также снижения прочностных свойств увеличивалась на 0.1. Серия вычислений продолжалась до достижения значения  $C_{крII} = 1.0$ , что характеризует полную потерю несущей способности целика на пласте КрII. На верхнем обрабатываемом пласте АБ степень нагружения оставалась постоянной и составляла примерно 0.2. Мощность технологического междупластья при математическом моделировании принималась равной 8 м.

Таблица 1

Параметры системы разработки

Вариант расчета	Пласт	Межосевое расстояние ( $l$ ), м	Ширина камеры ( $a$ ), м	Ширина целика ( $b$ ), м	Высота целика ( $m$ ), м	Степень нагружения, $C_0$
1	АБ КрII	12.0	3.2	8.8	3.2	0.20
			6.0	6.0	7.0	0.40
2	АБ КрII	12.0	3.2	8.8	3.2	0.20
			7.0	5.0	7.5	0.50
3	АБ КрII	12.0	3.2	8.8	3.2	0.20
			7.5	4.5	8.0	0.60
4	АБ КрII	12.0	3.2	8.8	3.2	0.20
			7.8	4.2	8.5	0.70

Результаты расчёта изменения степени нагружения междукамерных целиков пласта КрII во времени в процессе разрушения его краевых частей и технологического междупластья для варианта  $C_0 = 0.4$  приведены на рис. 3. Как видно (рис. 3а), увеличение степени их нагружения с 0.4 до 0.52 реализуется в течение времени  $t_1 = 12$  лет. За этот период ширина целика уменьшается на 1 м, а его высота увеличивается на 0.5 м.

Изменённые параметры несущих элементов камерной системы отработки пласта КрII принимались в качестве начальной конфигурации для следующего этапа математического моделирования (рис. 3б). Время изменения степени нагружения целика с 0.52 до 0.63 составляет  $t_2 = 7$  лет (рис. 3б), а с 0.63 до 0.72 —  $t_2 = 3$  года (рис. 3в). С этого момента полная потеря его несущей способности ( $C_{крII} = 1.0$ ) оценивается в 1 год (рис. 3г). Таким образом, общее время разрушения МКЦ на пласте КрII с начальной степенью нагружения  $C_0 = 0.4$  при принятых в расчётной схеме горно-геологических условиях составляет 23 года.

По результатам многовариантного математического моделирования определены усреднённые оценки относительных скоростей поперечного деформирования целиков при различной начальной степени их нагружения (рис. 4). Анализ данных показывает, что по достижении относительной скорости поперечного деформирования целиков 50-100 мм/м в год в дальнейшем происходит стремительное её увеличение. Превышение этих значений может свидетельствовать о потере несущей способности целиков и переходе их в стадию прогрессирующей ползучести. Таким образом, интервал значений скорости поперечного деформирования целиков 50-100 мм/м в год, вероятно, можно использовать как индикатор, характеризующий достижение предела устойчивого состояния несущих элементов камерной системы разработки. Данные оценки носят лишь предварительный характер и могут быть уточнены.

В заключении следует отметить, что предложенный подход, основанный на методах математического моделирования, позволяет оценить изменение степени нагружения МКЦ во времени. При этом учитывается длительная прочность пород и взаимосвязанные процессы разрушения несущих элементов камерной системы разработки. Также оценено время, за которое целики теряют свою несущую способность при различной исходной степени их нагружения. Определены критические скорости поперечного деформирования целиков, сигнализирующие о предельном состоянии несущих элементов камерной системы разработки.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-45-590681 p\_a)*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Токсаров В.Н. Натурные исследования деформирования кровли очистных камер в условиях повышенной глинизации // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2008 г. – Пермь, 2009. – С. 72-75.
2. Specific roof behavior in the southern wing of the Upper Kama potash salt deposit / Asanov V.A., Toksarov V.N., Evseev A.V., Bel'tyukov N.L. // Journal of mining science. – 2012. – V. 48. – № 1. – P. 71-75.
3. Tournaire M. Des dimensions a donner aux pilliers des carriers et des Pressions auxquelles les terrains sont soumis dans les profondeurs // Annales des mines. – Paris, 1884. – V. 5. – P. 415-429.
4. Шевяков Л.Д. О расчете прочных размеров и деформаций целиков // Изв. АН СССР, Отд. техн. наук. – 1941. – № 7-9. –
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
6. Goodman R.E. The mechanical properties of joins // Adv. Rock Mech. – 1974. – V.1, Pt A. – P. 127-140.
7. Взаимодействие слоев в соляном массиве: сообщ. I. Механические свойства контактов / В.А. Асанов, А.А. Барях, И.Н. Дудырев, И.Л. Паньков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1992. – № 2. – С. 48-52.
8. Критерии и особенности разрушения слоистой кровли камер при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей / А.А. Барях, А.Ю. Шумихина, В.Н. Токсаров, С.Ю. Лобанов, А.В. Евсеев // Горн. журн. – 2011. – № 11. – С. 15-19.
9. Барях А.А. О механизме формирования карстовых провалов на земной поверхности / А.А. Барях, А.К. Федосеев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4. – С. 12-22.
10. Барях А.А. К расчету устойчивости целиков при камерной системе разработки / А.А. Барях, Н.А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 1. – С. 11-20.
11. К оценке остаточного срока службы соляных междукамерных целиков / А.А. Барях, В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, М.В. Гилев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1998. – № 1. – С. 18-25.
12. Барях А.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов / А.А. Барях, Н.А. Самоделкина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – №6. – С. 32-41.
13. Baryakh A.A. Estimation of salt rocks' long-term strength in natural conditions / Baryakh A.A., Lobanov S.Y., Lomakin I.S. // Solid State Phenomena. – 2016. – V. 243. – P. 11-16.

В.А. АСАНОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ  
НА ШАХТНЫХ ПОЛЯХ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

В пределах Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) сильвинитовые пласты АБ и КрII обрабатываются камерной системой разработки с поддержанием вышележащей толщи целиками различных размеров. Как показывает опыт, характер деформирования и разрушения междукамерных целиков зависит от множества факторов: особенностей строения массива и свойств пород, геометрических размеров, формы и сроков службы очистных выработок, вида напряженного состояния массива, поведения пород под нагрузкой и т.д. В этом случае обеспечение безопасных условий ведения горных работ во многом обусловлено достоверностью определения механических свойств вмещающих горных пород и корректностью их трансформации в соответствующие параметры конструктивных элементов камерной системы разработки.

Согласно нормативным документам [1], несущая способность целиков определяются исходя из агрегатной прочности соляных пород. Величина данного показателя зависит от эквивалентной прочности, определяемой по средневзвешенным значениям прочности отдельных слоев пород слагающих целик по высоте, и корректируется рядом поправочных коэффициентов, учитывающих различные влияющие факторы (форму целика, слоистость и др.).

Несмотря на то, что соляные породы ВКМКС сложены однотипными минералами (галит, сильвин) их механические свойства варьируются в широких пределах, что обусловлено структурно-текстурными особенностями их строения. Продуктивная толща пород характеризуется чередованием слоев каменной соли, сильвинита (карналлита) и тонких прослоев глинисто-ангидритового материала. Подобные прослои зачастую являются наиболее слабым звеном в подрабатываемом массиве и определяют как степень устойчивости, так и характер разрушения приконтурных пород. Обследованием очистных камер установлено, что наибольшее содержание глинистых пород приурочено к кровле обрабатываемых пластов. Мощность таких прослоев может изменяться от 1 - 3 мм до 20 см и более. Степень глинизации возрастает в юго-восточном направлении ВКМКС, достигая на шахтных полях рудников БПКРУ-3, БПКРУ-2 ПАО «Уралкалий» 12 - 15 %. С возрастанием содержания глинистых включений резко снижаются прочностные показатели соляного массива. Наличие глинистых прослоев снижает устойчивость пород кровли очистных камер, обуславливая ее интенсивное расслоение и обрушение соляных пород технологического междупластья АБ – КрII (рис.1). Это, в свою очередь, приводит к увеличению высоты междукамерных целиков и, как следствие, к снижению их несущей способности.

Горным институтом УрО РАН накоплен большой объем информации по физико-механическим свойствам соляных пород (каменная соль, сильвиниты, карналлит) ВКМКС. Статистическая обработка результатов исследования механических свойств соляных пород на шахтных полях рудников ПАО «Уралкалий» (более 10000 проб по 500 подземным разведочным скважинам) показала, что предел прочности соляных пород при одноосном сжатии изменяется от 2 до 48 МПа (табл. 1).

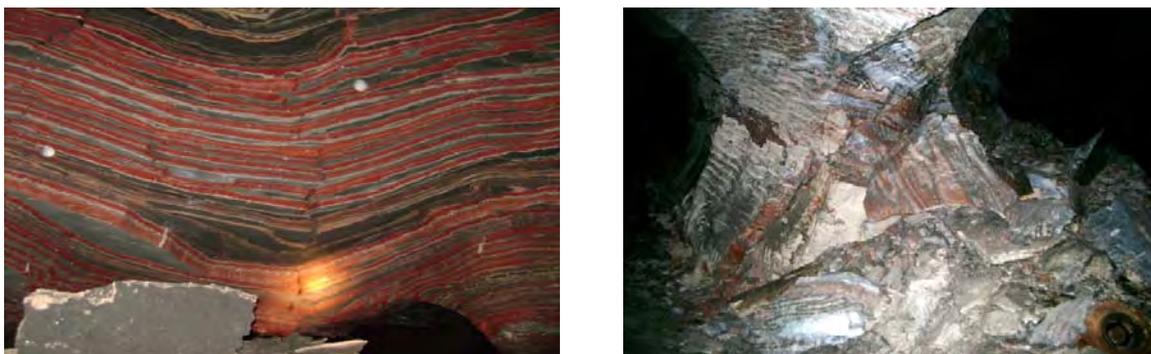


Рис. 1. Характерные виды разрушения кровли и междукамерных целиков

Таблица 1

Изменчивость механических свойств соляных пород ВКМКС

Порода, пласт	Экспериментальные показатели					
	Кол-во испытанных проб	Ср. знач., МПа	Макс. знач., МПа	Мин. знач., МПа	Ср. кв. откл., МПа	Коэф. вар., %
Сильвинит красный, пласт КрII	491	26,06	36,69	16,38	3,65	14,0
Сильвинит пестрый, пласт АБ	234	23,22	37,72	9,04	5,05	22,37
Карналлит, пласт В	97	7,76	26,64	2,52	4,82	70,10
Каменная соль междупластья	762	26,14	48,50	9,24	4,92	18,80

Анализ распределения прочности для красного сильвинита пласта КрII показывает, что регламентированным значениям прочности, равной  $23,0 \text{ МПа} \pm 10 \%$ , соответствует только 36 % от общего числа экспериментальных данных. В тоже время в 34 % измерений показали, что сильвинит может иметь прочность менее 20 МПа. Оценочные расчеты показывают, что уменьшение прочности пород, слагающих целик, на 10 % приводит к увеличению степени нагружения целиков в среднем на 15 %. В этом случае деформирование междукамерных целиков будет происходить в «податливом» режиме с ограниченным сроком их службы. Следствием этого является повышение техногенной нагрузки на водозащитную толщу (ВЗТ) и реализация ускоренных деформаций земной поверхности.

В последние годы наметилось повышение спроса на минеральные удобрения. Увеличение добычи калийно-магниевых руд достигается как за счет увеличения производительности действующих рудников, так и строительства новых предприятий (освоение Усть-Яйвинского, Половодовского, Талицкого участков на ВКМКС, Гремячинского месторождения, рудников в Белоруссии, Казахстане, Узбекистане и Таджикистане). Осваиваемые участки, как правило, характеризуются сложными горно-геологическими, гидрогеологическими и горнотехническими условиями (большой глубиной, наличием весьма сближенных пластов, высокой обводненностью вмещающих пород, повышенной степенью глинизации продуктивных пластов, слабой устойчивостью пород непосредственной кровли), что обуславливает увеличение риска техногенных аварий. В этой связи особое значение приобретает вопрос достоверной экспери-

ментальной и теоретической оценки устойчивости элементов камерной системы разработки, зависящих от свойств вмещающих пород.

Для уточнения моделей деформирования соляного массива, используемых при обосновании безопасных условий ведения горных работ, выполняются эксперименты по одноосному и объемному нагружению образцов различного масштабного уровня, исследуются прочностные и деформационные свойства контактов, наиболее слабого звена, определяющего устойчивость обнажений, определяются реологические характеристики соляных пород при длительном нагружении. Для оценки начальной степени нарушенности исходного материала все образцы до испытаний подвергаются ультразвуковой дефектоскопии. При необходимости для каждой пробы определяются плотностные свойства, пористость, влажность и остаточная газонасыщенность.

При исследовании механических свойств соляных пород используется компьютерный измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий регистрировать в реальном масштабе времени различные параметры (усилия нагружения, деформации образца, акустическую эмиссию и т.д.) в процессе эксперимента. Обработка результатов измерений ведется с помощью пакета специальных программ «Пресс», позволяющих рассчитывать прочностные и деформационные параметры в соответствии с ГОСТ [2, 3, 4].

Для идентификации и правильной интерпретации результатов испытаний производится документирование всех образцов, заключающееся в описании структурно-петрографических особенностей строения образцов с выделением их индивидуальных особенностей и фото регистрацией внешнего вида до испытаний и после.

На каждую пробу оформляется адресная карточка, включающая описание места отбора пробы (название рудника, номера скважины, пробы, образца), характеристику породы (название пласта, слоя, тип породы, состав, особенности текстуры, структуры), геометрические размеры образца и другую информацию, позволяющую производить идентификацию и анализ результатов.

В настоящее время накоплен большой объем данных, позволяющих выявить основные закономерности изменения механических свойств соляных пород в зависимости от их состава и условий залегания. Для действующих рудников построены прогнозные карты распределения прочностных и деформационных свойств по площади рабочих пластов шахтных полей ВКМКС, где прослеживается изменчивость механических свойств пород, как по разрезу соляной толщи, так и по площади месторождения. Так как точки отбора проб имеют пространственную привязку, то расчет параметров очистных работ выполняется на основе достоверной информации о свойствах соляных пород конкретных участков, что обеспечивает более надежное обоснование параметров отработки сильвинитовых пластов.

В настоящее время готовится к вводу в эксплуатацию подземный рудник «ЕвроХим–УКК» на базе запасов Палашерского и Белопашинского участков ВКМКС. Прогнозные оценки горно-геологических условий показывали, что они будут соответствовать условиям имеющим место в юго-восточной части рудника БПКРУ-2, где отмечается низкая устойчивость междупластья КрII–АБ, связанная с повышенной глинизацией массива. Однако первый опыт ведения горных работ на этом руднике показал, что горно-геологические условия существенно сложнее. Содержание глинистого материала в продуктивных пластах юго-восточной части шахтного поля возрастает до 17 - 25 %, а мощность глинистых коржей составляет 0,5–0,7 м. Как показали исследования физико-механических свойств пород, выполненные на образцах, отобранных при проходке горных выработок, что прочность пород пласта КрII в 1,5 - 2,0 раза ниже средних значений по месторождению. Так, нормативное значение прочности красного сильвинита составляет 23,0 МПа [1]. Наиболее низкие прочностные свойства и наибольшее содержание глинистого материала соответствуют первому (наиболее богатому) слою пласта КрII (табл. 2).

Результаты исследования свойств соляных пород продуктивных пластов  
I ЮВП рудника «ЕвроХим – УКК»

Пласт, слой	Порода	Предел прочности на сжатие	Предел прочности на растяжение	Модуль деформации	Модуль упругости	Коэф. сцепления	Тангенс угла внутреннего трения
		МПа	МПа	ГПа	ГПа	МПа	
КрII, сл.1	сильвинит красный	13,73	1,44	0,49	5,29	3,28	0,67
КрII, сл. 2	каменная соль	15,48	1,39	0,55	6,50	3,04	0,64
КрII, сл. 3	сильвинит красный	15,00	1,72	0,56	6,04	3,81	0,65
КрII, сл. 4	сильвинит красный	19,00	1,83	0,83	6,77	4,35	0,68
КрII, сл. 5	сильвинит красный	19,02	1,34	0,64	7,08	3,87	0,75
КрII сл. 6	каменная соль	23,00	1,78	0,76	8,03	4,85	0,73
КрII, сл. 7	сильвинит красный	22,12	1,52	0,72	7,31	4,48	0,76
КрII-КрIII	каменная соль	23,62	1,76	0,95	9,06	4,92	0,74

Таким образом, анализ результатов и опыт отработки юго-восточной части шахтного поля рудника БПКРУ-2 [5] показывает, что для обеспечения безопасных условий отработки сближенных сильвинитовых пластов КрII и КрIII необходимо пересматривать основные проектные решения по технологии ведения горных работ на руднике «ЕвроХим – УКК».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – Введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.
2. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – Введ. в действие 01.07.86. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 10 с.
3. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – Введ. в действие 24.04.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 10 с.
4. ГОСТ 21153.3-85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении. – Введ. в действие 01.01.87. – М., 1986. – 14 с.
5. Особенности поведения кровли выработок на южном фланге Верхнекамского месторождения калийных солей / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, А.В. Евсеев, Н.Л. Бельтюков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 1. – С. 84-88.

И.Л. ПАНЬКОВ

*Горный институт УрО РАН*

## **О МЕТОДЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ БОКОВОГО РАСПОРА ПРИ ДЕЙСТВИИ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СИЛ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

Оценка естественного напряженного состояния массива (т.н. исходного поля напряжений) до проведения в нем горных выработок является крайне важной задачей, оказывающей существенное влияние на все этапы ведения горных работ. Традиционно принято различать два типа естественного поля напряжений: гравитационное и тектоническое. Для гравитационного напряженного состояния горизонтальные реактивные боковые напряжения обусловлены вертикальными активными напряжениями, численно равными весу налегающих горных пород. При этом, горизонтальная составляющая (напряжение бокового распора) традиционно определяется либо в соответствии с гидростатической гипотезой [1], либо с гипотезой, вытекающей из уравнений теории упругости [2]. Для тектонического напряженного состояния характерно наложение на гравитационное поле добавочных горизонтальных активных напряжений, обусловленных региональными тектоническими процессами в земной коре. Вертикальная составляющая тектонического поля напряжений, как и в случае с гравитационным полем, определяется давлением налегающих пород [3, 4].

В работах [5, 6] приведены результаты физического моделирования и теоретической оценки бокового распора горных пород под действием силы тяжести. Показано, что механизм формирования напряжения бокового распора связан с возможностью деформирования горных пород в поровое пространство. При всестороннем сжатии, вызывающем закрытие пор, эта возможность исчезает, что способствует увеличению передачи вертикального напряжения в боковых направлениях. На основе данного положения в работах [6, 7] предложен метод теоретической оценки напряжений бокового распора в уплотненных горных породах нетронутого массива, находящегося в условиях действия гравитационного поля напряжений. Выведем аналогичную зависимость для изотропных уплотняющихся твердофазных пористых пород нетронутого массива, находящегося в условиях действия тектонических сил.

Считая, что вертикальное, горизонтальное максимальное и горизонтальное минимальное напряжения совпадают по величине и направлению с главными напряжениями, действующими в нетронутом массиве, используя обобщенный закон Гука, запишем выражение для объемной деформации горной породы:

$$\varepsilon_{Vol} = \frac{1}{E}(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min})(1 - 2\nu), \quad (1)$$

где  $\sigma_{H \max}$  – горизонтальное максимальное напряжение;  $\sigma_{H \min}$  – горизонтальное минимальное напряжение;  $\sigma_V = \gamma H$  – вертикальное напряжение, равное давлению налегающих пород;  $\gamma$  – плотность пород;  $H$  – глубина;  $\varepsilon_{Vol} = \varepsilon_V + \varepsilon_{H \max} + \varepsilon_{H \min}$  – объемная деформация, представляющая собой сумму относительных деформаций, соответствующих главным напряжениям;  $E$  – модуль деформации породы одноосного сжатия, определяемый на начальном участке диаграммы деформирования;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

В условиях всестороннего сжатия уплотняющейся породы, при сумме главных напряжений, стремящихся к бесконечности ( $\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} \rightarrow \infty$ ), величина объемной деформации стремиться к общей пористости ( $P$ ) горной породы ( $\varepsilon_{Vol} \rightarrow P$ ), а выражение (1) запишется в виде:

$$EP = (\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min})(1 - 2\nu). \quad (2)$$

Из формулы (2) следует

$$2\nu = \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} - EP}{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}. \quad (3)$$

Для описания состояния уплотнения горных пород при высоких значениях суммы сжимающих напряжений, действующих в массиве ( $\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} \gg EP$ ), правую часть уравнения (3) необходимо преобразовать с помощью следующего приближительного равенства:

$$\frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} - EP}{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}} \approx \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + EP}. \quad (4)$$

В этом случае выражение для коэффициента Пуассона пород массива запишется в виде

$$\nu = \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{2(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + EP)}. \quad (5)$$

В работе [6] показано, что формула для определения теоретического напряжения бокового распора в породах, находящихся в поле силы тяжести, при выводе которой использовалось выражение вида (5), можно использовать во всем интервале действующих в массиве уплотняющих, не приводящих к разрушению горных пород напряжений.

В соответствии с полученным выражением (5) для условий всестороннего сжатия тектонического поля напряжений в нетронутым массиве уплотненных не разрушенных пород соотношения, определяющие связь главных напряжений и соответствующих деформаций, описываются системой физических уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon_V = \frac{1}{E} \left( \sigma_V - \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{2(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + PE)} (\sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}) \right) \\ \varepsilon_{H \max} = \frac{1}{E} \left( \sigma_{H \max} - \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{2(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + PE)} (\sigma_V + \sigma_{H \min}) \right) \\ \varepsilon_{H \min} = \frac{1}{E} \left( \sigma_{H \min} - \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{2(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + PE)} (\sigma_V + \sigma_{H \max}) \right) \end{cases}. \quad (6)$$

Очевидно, что тектоническое воздействие на массив проявляется наличием в породе горизонтальных деформаций, обусловленных смещением плит и блоков земной коры. В этой связи, отсутствие горизонтальных деформаций ( $\varepsilon_{H \max} = \varepsilon_{H \min} = 0$ ), имеющее место при гравитационном поле напряжений, можно характеризовать как состоя-

ние массива в условиях нулевого тектонического воздействия. Наличие одной и равенство нулю другой горизонтальных компонент деформации ( $\varepsilon_{H \max} > 0$ ,  $\varepsilon_{H \min} = 0$ ) характеризует состояние массива в условиях линейно-направленного тектонического воздействия. Неравенство нулю обеих компонент горизонтальной деформации ( $\varepsilon_{H \max} \geq \varepsilon_{H \min} > 0$ ) характеризует состояние массива в условиях плоско-направленного тектонического воздействия. Необходимо отметить, что принятая классификация условий тектонического воздействия в массивах, основана на действующих в горных породах горизонтальных деформациях, что согласуется с выводами работы [8]. В дальнейшем, при выводе определяющих соотношений, в качестве наиболее общего, будем рассматривать вариант состояния массива, находящегося в условиях плоско-направленного тектонического воздействия.

Анализ изменения горизонтальных напряжений  $\sigma_{H \max}$  и  $\sigma_{H \min}$  от различных факторов проводился с помощью системы рекуррентных соотношений:

$$\begin{cases} (\sigma_{H \max})_n = E\varepsilon_{H \max} + \frac{\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1} + (\sigma_{H \min})_{n-1}}{2(\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1} + (\sigma_{H \min})_{n-1} + PE)} (\sigma_V + (\sigma_{H \min})_{n-1}) \\ (\sigma_{H \min})_n = E\varepsilon_{H \min} + \frac{\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1} + (\sigma_{H \min})_{n-1}}{2(\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1} + (\sigma_{H \min})_{n-1} + PE)} (\sigma_V + (\sigma_{H \max})_{n-1}) \end{cases}, \quad (7)$$

где  $n$  – номер итерации.

На рис. 1 показана взаимосвязь между максимальными и минимальными горизонтальными напряжениями ( $\sigma_{H \max}$  и  $\sigma_{H \min}$ ), полученная с помощью рекуррентных соотношений (7). Расчет проводился для массива горных пород, находящегося в условиях линейно-направленного тектонического воздействия ( $\varepsilon_{H \max} = 0,0025$ ;  $\varepsilon_{H \min} = 0$ ) с общей пористостью породы  $P = 0,005$ . Модуль деформации составлял  $E = 1; 5; 10$  ГПа. По результатам анализа установлено, что зависимость  $\sigma_{H \min} = f(\sigma_{H \max})$  в интервале глубин от 0 до 1000÷1500 м с высокой степенью точности приближается к линейному виду (см. рис. 1).

Для вывода зависимости  $\sigma_{H \min} = f(\sigma_{H \max})$  находим разность соответствующих горизонтальных деформаций ( $\varepsilon_{H \max} - \varepsilon_{H \min}$ ) системы уравнений (6). В итоге получаем:

$$\sigma_{H \max} - \sigma_{H \min} = \frac{E(\varepsilon_{H \max} - \varepsilon_{H \min})}{1 + \frac{\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min}}{2(\sigma_V + \sigma_{H \max} + \sigma_{H \min} + PE)}}. \quad (8)$$

Примем для правой части формулы (8) следующие приближения:

$$\sigma_{H \max} \approx E\varepsilon_{H \max}, \quad \sigma_{H \min} \approx E\varepsilon_{H \min}. \quad (9)$$

В соответствии с условием (9) формула (8) переписывается в виде приблизительного равенства:

$$\sigma_{H \min} \approx \sigma_{H \max} - A, \quad (10)$$

где  $A$  – свободный член, определяемый равенством:

$$A = \frac{E(\varepsilon_{H \max} - \varepsilon_{H \min})}{1 + \frac{\sigma_V + E\varepsilon_{H \max} + E\varepsilon_{H \min}}{2(\sigma_V + E\varepsilon_{H \max} + E\varepsilon_{H \min} + PE)}}. \quad (11)$$

Подстановка (10) в выражение для  $\varepsilon_{H \max}$  системы уравнений (6) приводит к оценочной формуле определения максимального горизонтального напряжения нетронутого массива, находящегося в условиях плоско-направленного тектонического воздействия:

$$\sigma_{H \max} \approx \frac{\sigma_V - 2PE - A + 4B + \sqrt{(\sigma_V - 2PE - A + 4B)^2 + 16(\sigma_V + PE - A)B + 8(\sigma_V - A)^2}}{4}, \quad (12)$$

где  $B = E\varepsilon_{H \max}$ .

Получаемое по формуле (12) горизонтальное напряжение зависит от величины вертикального давления, условий тектонического воздействия (максимальной и минимальной горизонтальных деформаций нетронутого массива), а также физико-механических показателей параметров горной породы (модуля деформации и пористости). Переход к горизонтальным напряжениям массива, находящегося в условиях нулевого или линейно-направленного тектонического воздействия, достигается обнулением входящих в формулы (10) и (12) соответствующих горизонтальных деформаций. Для оценки применимости формулы (12) выполнен анализ результатов сопоставительных расчетов по формулам (10) – (12) и с использованием рекуррентных соотношений (7). Проведенный анализ показал, что относительная погрешность определения горизонтальных напряжений по формулам (10) – (12) не превышает 1÷2 процента.

Использование формул (7) и (10) – (12) позволило установить два типа распределений горизонтальных напряжений в зависимости от вертикального давления (рис. 2).

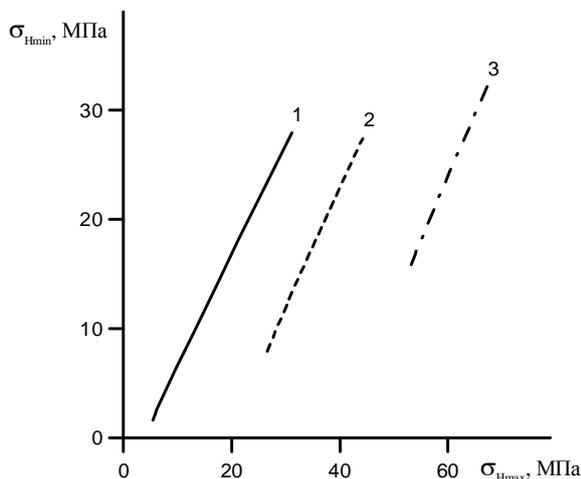


Рис. 1. Характер взаимосвязи максимального и минимального горизонтальных напряжений для тектонически-напряженных горных пород с различным модулем деформации: 1 –  $E = 1$  ГПа; 2 –  $E = 5$  ГПа; 3 –  $E = 10$  ГПа

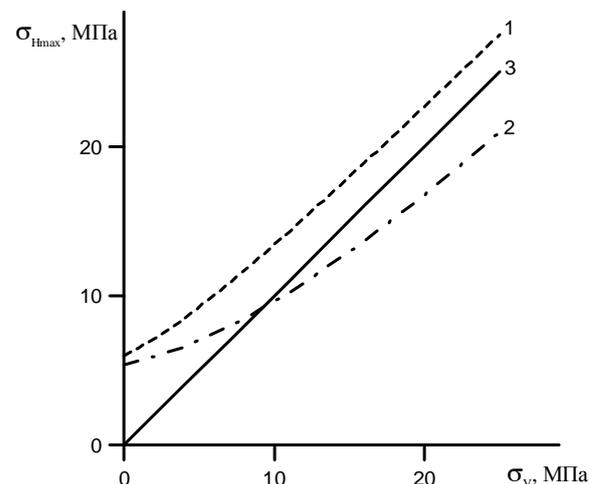


Рис. 2. Характер распределения горизонтального максимального напряжения от вертикального давления: 1 – распределение первого типа; 2 – распределение второго типа; 3 – гидростатическое распределение

Распределение первого типа характеризует зависимость, для которой горизонтальные напряжения, возрастая с глубиной, остаются больше вертикального давления с коэффициентом бокового распора ( $\sigma_H / \sigma_V$ ) стремящимся к единице (рис. 2, кривая 1). Распределение второго типа характеризует зависимость, для которой горизонтальные напряжения изначально больше вертикального давления возрастая с глубиной, сначала сравниваются, а затем становятся меньше вертикальной компоненты с коэффициентом бокового распора, стремящимся к единице (рис. 2, кривая 2). В качестве примера, рассматривалось напряженное состояние массива горных пород с модулем деформации  $E = 5$  ГПа, находящегося в условиях плоско-направленного тектонического воздействия ( $\varepsilon_{H \max} = 0,001$ ;  $\varepsilon_{H \min} = 0,0005$ ). Для пород с пористостью  $P = 0,002$ , получаем

распределение первого типа (рис. 2, кривая 1). Увеличение пористости пород до величины  $P = 0,005$  приводит к распределению второго типа (рис. 2, кривая 2).

Анализ результатов расчета (см. рис. 2) показал, что для больших глубин коэффициент бокового распора стремится к единице, приближаясь к гидростатическому распределению.

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

– На основе предложенной системы физических уравнений, определяющих связь напряжений и деформаций в уплотняющихся пористых породах нетронутого массива, находящегося в условиях всестороннего сжатия получены оценочные формулы определения максимального и минимального горизонтальных напряжений нетронутого массива, находящегося в условиях действия тектонических сил.

– Анализ полученных соотношений показывает, что тектоническое воздействие на массив проявляется исключительно наличием в породе горизонтальных деформаций, обусловленных смещением плит и блоков земной коры. Соответственно, гравитационное поле напряжений можно характеризовать как состояние массива, находящегося в условиях нулевого тектонического воздействия, а тектоническое поле напряжений – как состояние массива, находящегося в условиях линейно-направленного или плоско-направленного тектонического воздействия.

– Установлено два типа распределений горизонтальных напряжений в зависимости от вертикального давления. Распределение первого типа характеризует зависимость, для которой горизонтальные напряжения, возрастая с глубиной, остаются больше вертикального давления с коэффициентом бокового распора, стремящимся к единице. Распределение второго типа характеризует зависимость, для которой горизонтальные напряжения изначально больше вертикального давления возрастая с глубиной, сначала сравниваются, а затем становятся меньше вертикальной компоненты с коэффициентом бокового распора, стремящимся к единице.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heim A. Untersuchungen uber den mechanismus der gebirgsbildung, Bd 1-2: Atlas. – Basel, 1878.
2. Динник А.Н. О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты // Инженерный работник. – 1925. – № 7. – С.1-12.
3. Геомеханика: учеб. пособие / [Э.В. Каспарьян и др.]. – М.: Высш. шк., 2006. – 502 с.: ил.
4. Борщ-Компониец В.И. Практическая механика горных пород. – М.: Горная книга, 2013. – 321 с.: ил.
5. Паньков И.Л. Изучение механизма бокового распора гравитационного поля напряжений в горных породах // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 110-112.
6. Паньков И.Л. Физическое моделирование и теоретическая оценка бокового распора в горных породах под действием силы тяжести // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 5. – С. 68-75.
7. Паньков И.Л. Метод теоретической оценки бокового распора горных пород в нетронутом массиве при действии гравитационного поля напряжений // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 116-119.
8. Оловянный А.Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений. – СПб.: КОСТА, 2012. – 278 с.: ил.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОРИЕНТИРОВКИ ОСЕЙ ГЛАВНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ САРБАЙСКОГО КАРЬЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ

Для уточнения геомеханической модели Сарбайского карьера были выполнены исследования по оценке трещиноватости горных пород с целью восстановления ориентировки осей главных напряжений в нетронутом массиве.

Изучение тектонической трещиноватости проводилось на 9 замерных станциях. Измерение параметров залегания отдельных трещин производилось горным компасом ГК-2. На замерных станциях, находящихся вблизи массива железной руды, в результате замеров азимута простирания трещин вводилась поправка. Поправка определялась по результатам сопоставительных определений одного и того направления с использованием горного компаса и GPS-навигатора.

Результаты измерения параметров трещиноватости пород в бортах Сарбайского карьера приведены на рис. 1. Всего было произведено 793 замера. Положение точки на диаграмме определяется азимутом и углом падения трещины.

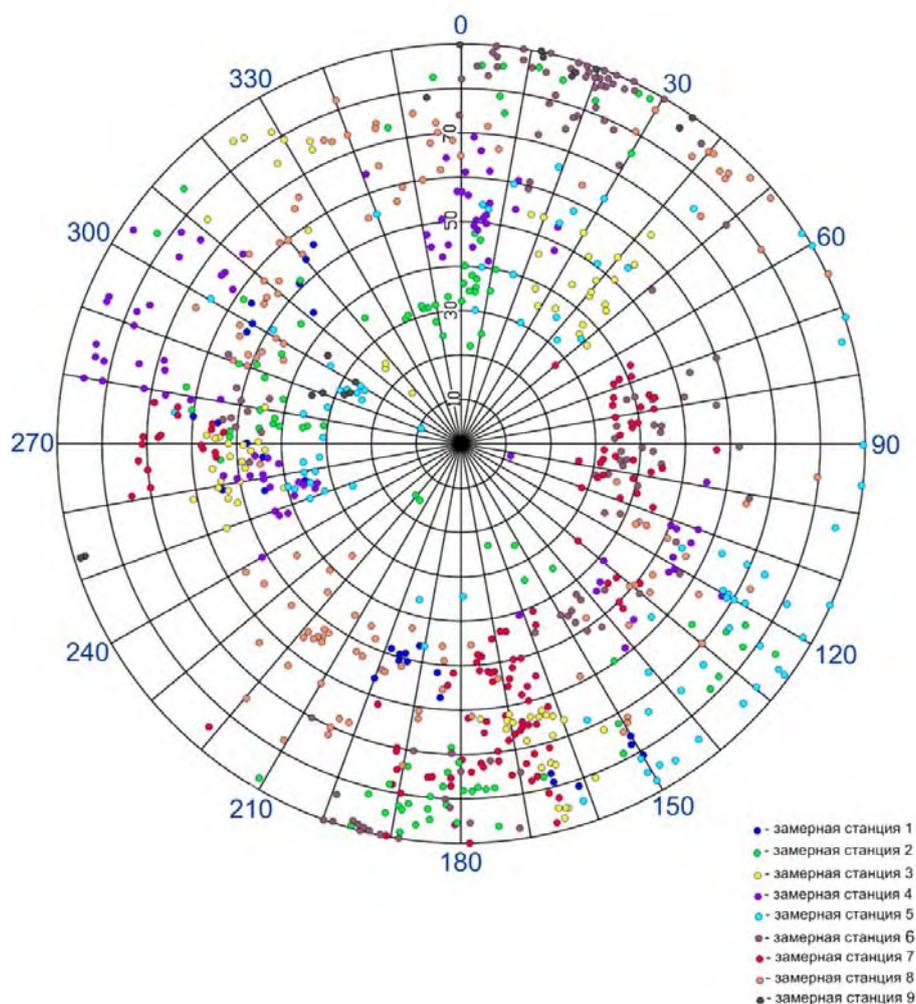


Рис. 1. Точечная диаграмма трещиноватости породного массива Сарбайского карьера

По результатам измерений выявлено 5 основных систем открытых тектонических трещин (табл. 1).

Таблица 1

Параметры залегания основных тектонических систем трещин в массиве Сарбайского карьера

№	Азимут простирания, град.	Азимут падения, град.	Угол падения, град.	Расстояние между трещинами, см	Ширина раскрытия трещин, мм
1	340/40(10)	250/310(282)	40/65(52)	15/50(25)	0,5/5(2,5)
2	90/120; 270/290	0/30; 180/200	85	40	3
3	250/290(265)	160/200(175)	50/80(65)	10/500(45)	3
4	80/100(90)	350/10(0)	30/70(52)	5/450(40)	2,5
5	160/200(180)	70/110(90)	30/50(42)	10/300(25)	0,5/10(5)

Для оценки вида напряженного состояния массива горных пород Сарбайского месторождения использовался метод М.В. Гзовского, называемый иногда методом сопряженных пар сколов [1]. Согласно этого метода, при постоянной ориентировке главных нормальных напряжений и постоянном соотношении их величин, в породном массиве может образоваться две системы трещин скола и одна трещина отрыва (рис. 2). Трещины скола симметрично отклоняются от оси алгебраически максимальных главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  на угол  $\varphi$ , а линия их пересечения параллельна оси средних главных нормальных напряжений  $\sigma_2$ . В случае образования трещин отрыва, они всегда перпендикулярны оси алгебраически наименьших главных нормальных напряжений  $\sigma_3$ .

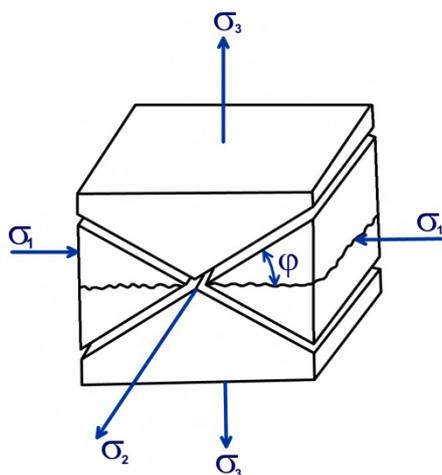


Рис. 2. Расположение трещин скола и отрыва относительно осей главных нормальных напряжений

По результатам обработки установлено, что сопряженными системами трещинами скола являются системы 3 и 4 (табл. 1). Система субвертикальной трещиноватости 2, фактически располагается посередине между системами 3 и 4 (рис. 3), на месте возможного размещения системы трещин отрыва (рис. 2). При этом трещины системы 2 по своему внешнему виду относятся к трещинам скола. Возможно ли такое, что в процессе формирования породного массива трещины скола заместили трещины отрыва? В работе [2] геологи положительно отвечают на этот вопрос. В частности отмечается, что «массив горных пород в процессе своего существования в течение длительного време-

ни, порой в сотни миллионов лет, неоднократно подвергался разносторонним сжимающим усилиям. При смене плана деформаций, заложенные ранее трещины могли подновляться, при этом мог измениться их генетический тип. Так, заложенная ранее трещина скалывания при новом плане деформаций может занять положение, отвечающее ориентировке трещин отрыва. При этом она начинает выполнять функции отрыва, то есть раскрываться без существенных перемещений блоков. При этом закладываются и новые системы трещин. Практически в таких массивах насчитывают до 12 систем трещин».

На наш взгляд, цитата полностью подходит под описание структуры массива горных пород Сарбайского карьера. Действительно, в породном массиве карьера существует очень много систем трещин различного размера и ориентации.

Предположим, что ориентация систем тектонических трещин 2, 3 и 4 в наибольшей степени соотносится с текущим полем напряжений в нетронутом массиве карьера. В этом случае, согласно методике М.В. Гзовского, главные напряжения в нетронутом массиве будут ориентированы следующим образом (рис. 3).

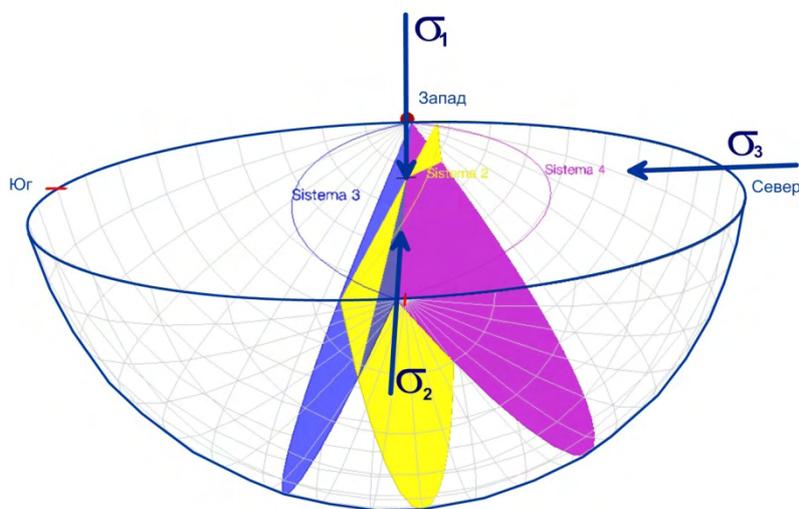


Рис. 3. Восстановление ориентировки осей главных напряжений в нетронутом массиве горных пород Сарбайского карьера

Ось наибольшего главного напряжения  $\sigma_1$  ориентирована в вертикальном направлении. Промежуточное главное напряжение  $\sigma_2$  ориентировано субширотно, вдоль линии пересечения сопряженных систем тектонической трещиноватости 3 и 4. Ось минимального главного напряжения  $\sigma_3$  ориентирована в субмеридианальном направлении.

Результаты проведенных исследований планируется использовать при трехмерном геомеханическом моделировании массива Сарбайского карьера с целью оценки устойчивости его бортов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975.
2. Ольховатенко В.Е., Трофимова Г.И., Ожогина Т.В. Методы изучения трещиноватости горных пород. Томск: изд-во ГАСУ, 2015.

В.В. АНИКИН

*Горный институт УрО РАН*

**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ  
СТРОИТЕЛЬСТВА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБЪЕКТА (ГАЗОПРОВОДА),  
РАСПОЛОЖЕННОГО В ЗОНЕ ПОДРАБОТКИ В ПРЕДЕЛАХ  
6 ЗП И БЛОКОВ 4, 5, 6 ШАХТНОГО ПОЛЯ РУДНИКА БКПРУ-1**

Отработка запасов месторождений полезных ископаемых подземным способом сопровождается сдвижением земной поверхности, что может привести к повреждению зданий и сооружений на участках подработки. Поэтому при проектировании строительства или реконструкции поверхностных сооружений требуется геомеханическое обоснование безопасности эксплуатации данных объектов. Особенно это относится к объектам, расположенным над выработанным пространством рудника БКПРУ-1 Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС), который был аварийно затоплен в 2006 – 2009 годах.

На основании «Программы развития газоснабжения газификации Пермского края на период с 2016 по 2020 годы» было принято решение о строительстве распределительного газопровода в п. Чкалово городского округа «Город Березники».

Анализ горнотехнической ситуации показывает, что площадка, на которой планируется строительство распределительного газопровода, расположена в юго-западной части шахтного поля рудника БКПРУ-1 в пределах 6 ЗП и 4-6 блоков.

В районе расположения газопровода был отработан только один пласт КрII. Глубина отработки пласта составляет 270 – 360 м, мощность пласта лежит в диапазоне 5,11 – 6,11 м, ширина камер изменяется от 11,3 м до 17,3 м, ширина МКЦ – от 8,7 м до 14,2 м.

Пласт был отработан в период 1981 – 1997 гг., т.е. еще до аварийного затопления рудника. При отработке применялась камерная система разработки с поддержанием кровли на жестких междукамерных целиках.

Осложняющими факторами являются:

- 1) большой временной разрыв отработки различных участков шахтного поля в районе расположения строительной площадкой (до 16 лет);
- 2) большая мощность обрабатываемого пласта (5 – 6 м) при частичной закладке выработанного пространства (заложены отдельные камеры);
- 3) различные параметры отработки смежных панелей;
- 4) заполнение горных выработок под рабочей площадкой рассолами из-за аварийного затопления рудника.

Оседание и деформирование земной поверхности на участке шахтного поля обусловлено образованием мульды сдвижения над границами между зонами с различными параметрами и временем отработки силвинитового пласта КрII, сформировавшимися как до начала затопления рудника, так и с учетом влияния аварийного затопления горных выработок.

Подземный распределительный газопровод (глубина заложения – от 1,39 м до 1,93 м) имеет длину около 6 км и монтируется из стальных электросварных труб (ГОСТ 10704-91/В-10 ГОСТ 10705-80). Диаметры труб и толщина стенок составляют: 219х6,0; 159х4,5; 108х4,0; 89х3,5; 57х3,5. Избыточное давление 0,003 МПа. Нормативный срок службы газопровода – 40 лет.

С целью получения количественной оценки влияния проведенных горных работ на строительную площадку с учетом аварийного затопления необходимо определить

максимальные прогнозируемые ожидаемые и расчетные значения деформаций земной поверхности за нормативное время эксплуатации объекта.

Согласно требованиям п. 5.5. «Указаний...» [1] расчеты по определению прогнозируемых (ожидаемых) деформаций земной поверхности необходимо выполнять в соответствии с разделом 4 и Приложением 7 «Указаний...» [1]. Вместе с тем, в указанных методиках не предусмотрены методы расчета показателей деформаций земной поверхности в условиях затопления подземных выработок. В связи с этим, прогнозируемые показатели деформаций земной поверхности были определены в работе [2] с учетом требований раздела 4 и Приложения 7 «Указаний...» [1].

Расчет количественных показателей деформации земной поверхности (оседаний, максимальных горизонтальных деформаций, угла их ориентации, наклонов и кривизны) проводился на основе трехмерного математического моделирования изменения во времени напряженно-деформированного состояния подработанного массива. Одновременно выполнялась оценка потенциальной опасности нарушения сплошности водозащитной толщи (ВЗТ) вследствие продолжающихся процессов ее деформирования и возможности образования провалов на земной поверхности.

Расчетная схема отражала весь комплекс горно-геологических (слоистость, гипсометрия пластов, свойства пород) и горнотехнических (глубина горных работ, параметры системы разработки, степень заполнения камер закладочным материалом) условий отработки, а также группу факторов, связанных с прорывом пресных вод в горные выработки (уменьшение ширины междукламерных целиков и увеличение высоты очистных камер вследствие растворения соляных пород. Кроме того, учитывалась дополнительная закладка, образующаяся за счет процесса выщелачивания, и гидростатическое давление рассолов после полного заполнения выработанного пространства рассолами

Численная реализация обобщенной математической модели проводилась по полуаналитической схеме метода конечных элементов.

По результатам математического моделирования определялись векторы перемещения, тензоры напряжений и деформаций в любой произвольной точке среды, на основе которых выполнялся расчет количественных показателей деформации земной поверхности: оседаний, максимальных горизонтальных деформаций, угла их ориентации, наклонов и кривизны.

Полученные результаты являются исходной информацией для разработки мер охраны гражданских и промышленных объектов, расположенных на шахтном поле рудника БКПРУ-1, и организации мониторинговых наблюдений [2].

Установлено, что максимальные значения деформаций земной поверхности в пределах строительной площадки, рассчитанные на срок службы объекта, составят:

- ожидаемая относительная горизонтальная деформация: – 0,39 мм/м;
- расчетная относительная горизонтальная деформация: – 0,59 мм/м;
- наклон: –1,27 мм/м;
- радиус кривизны: – 2645,5 км.

Значения допустимых и предельных показателей горизонтальных деформаций приведены в табл. 1 [3].

Допустимые и предельные показатели  
относительных горизонтальных деформаций земной поверхности  
для подземных трубопроводов

	Деформации	
	Допустимые $[\varepsilon_d] \cdot 10^{-3}$	Предельные $[\varepsilon_n] \cdot 10^{-3}$
При укладке в песок	<b>3,5</b>	<b>6,0</b>
При укладке в суглинок и глину	<b>2,5</b>	<b>4,0</b>

**Выводы:**

1. Максимальные прогнозируемые расчетные деформации земной поверхности в пределах строительной площадки, рассчитанные на срок их службы распределительного газопровода, не превысят допустимых показателей, поэтому дополнительных мер охраны для газопровода не требуется.

2. Строительная площадка по величинам деформаций земной поверхности относится к IV группе подрабатываемых территорий [4, 5].

3. При проектировании распределительного газопровода необходимо соблюдение требований СП 21.1330.2012. [5], как для сооружений, расположенных на подрабатанных территориях.

4. Так как указанные величины деформаций являются прогнозными, то необходимо организовать контроль деформаций земной поверхности в пределах строительной площадки в течение всего срока службы объекта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.

2. Выполнение корректирующих геомеханических расчетов по оценке негативных последствий аварии на руднике БКПРУ-1: отчет о НИР / ГИ УрО РАН; рук. Барях А.А.; отв. исполн. Самоделкина Н.А. – Пермь, 2017. –

3. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях: ПБ 07-269-98: утв. Госгортехнадзором России 16.03.1998 г. –

4. ТСН 22-301-98 Пермской области. Здания на подрабатываемых территориях Верхнекамского месторождения калийных солей. Назначение строительных мер защиты. – Пермь, 1998. – 50 с.

5. СП 21.13330.2012. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах: утв. 29.12.2011. – М., 2012. – 78 с.

А.В. ЕВСЕЕВ  
Горный институт УрО РАН  
**ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ ОТРАБОТКИ  
СИЛЬВИНИТОВЫХ ПЛАСТОВ  
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО СОДЕРЖАНИЯ ГЛИНЫ**

Одна из основных проблем отработки сильвинитовых пластов в условиях высокого содержания глины связана с устойчивостью кровли подготовительных и очистных выработок. Впервые с решением этого вопроса столкнулись при ведении горных работ на руднике БКПРУ-3, в дальнейшем возникли сложности с извлечением запасов юго-восточной части рудника БКПРУ-2. Нередко возникали ситуации, когда из-за опасности зажатия добычного оборудования работы в камере прекращались, а комбайн экстренно отводился на выемочный штрек. Применение стандартных для верхней Камы клинораспорных анкеров не приносило ожидаемого результата – слои «обыгрывали» гайки. Кровля теряла устойчивость в течение 2-4 недель после отработки камеры, в ряде случаев наблюдалось полное разрушение междупластья АБ-КрII.

Анализ геологической информации показал, что глинистый материал по месторождению распределен неравномерно, его содержание в отрабатываемых пластах увеличивается в юго-восточном направлении. В связи с этим ожидаются проблемы с обеспечением устойчивости выработок при отработке пласта КрII Талицкого и Палашерского участков месторождения. На рис. 1 показано содержание нерастворимого остатка в пласте КрII на рудниках БКПРУ-2, БКПРУ-4 и Усольском Калийном Комбинате (Палашерский участок). Наибольшее содержание наблюдается в кровле пласта КрII.

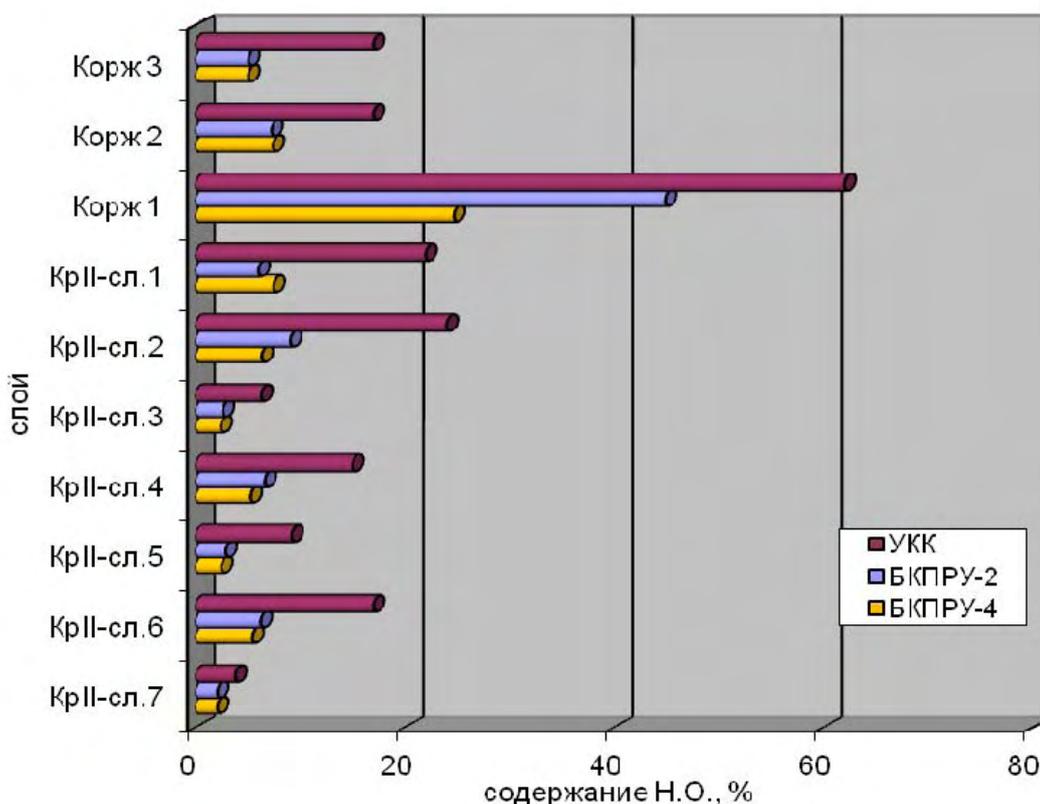


Рис. 1. Содержание Н.О. в пласте КрII

Для предотвращения обрушения слабой коржевой части отработка ведется либо с подрубкой коржей, либо с оставлением защитной пачки. В результате экспериментальных исследований, проводимых в юго-восточной части шахтного поля рудника БКПРУ-2 на участке отработки запасов камерами шириной 5,5 метров [1] установлено, что вне зависимости от подрезки двух коржей или оставления защитной пачки мощностью 0,6 м, при проходке очистных выработок на пласте КрII со временем происходит интенсивное расслоение пород кровли с последующим их обрушением. Различие заключается лишь в том, что обрушение пород междупластья при оставлении защитной пачки происходит несколько позже, чем при подрезке двух коржей. По результатам работы, проведенной совместно с лабораторией МГП, была выдана рекомендация уменьшения ширины камеры. После перехода на комбайн Урал 61 шириной 3,2 м ситуация в подготовительных и очистных выработках существенно улучшилась. Стало возможным проведения очистных работ без крепления кровли камер.

Учитывая проведенные исследования, при обосновании параметров системы разработки на Палашерском участке месторождения в первую очередь следует рассматривать схемы отработки с использованием комбайнов Урал 61 с подрезкой коржей или оставлением защитной пачки (рис. 2.). Расчеты параметров системы разработки показали, что за счёт изменения высоты очистных камер и, следовательно, целиков, коэффициент извлечения для этих вариантов практически не изменяется. Таким образом, с точки зрения извлечения варианты являются равнозначными.

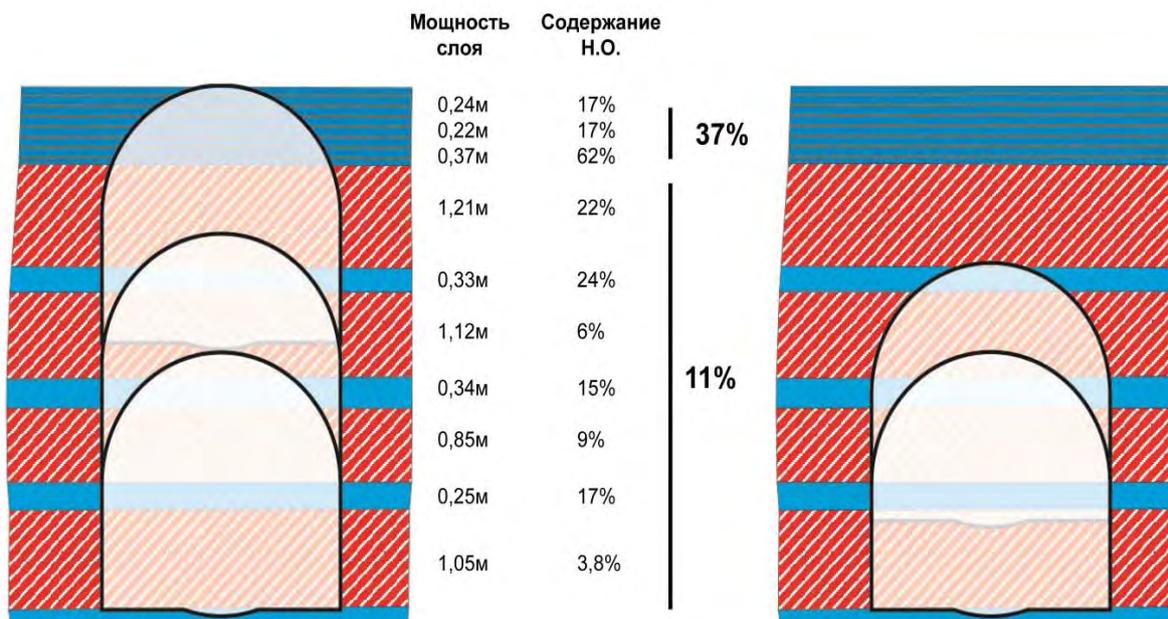


Рис. 2. Возможные варианты отработки камер на Палашерском участке ВКМКС

С другой стороны, при обосновании параметров системы разработки для южных участков месторождения наряду с извлечением, необходимо учитывать и содержание Н.О. в добываемой руде. На рис.3 приведен график экономической эффективности применения различных способов обогащения сильвинита в зависимости от состава руды. Приведенная зависимость свидетельствует о том, что с точки зрения содержания Н.О. в руде более предпочтительным является вариант отработки с оставлением защитной пачки.

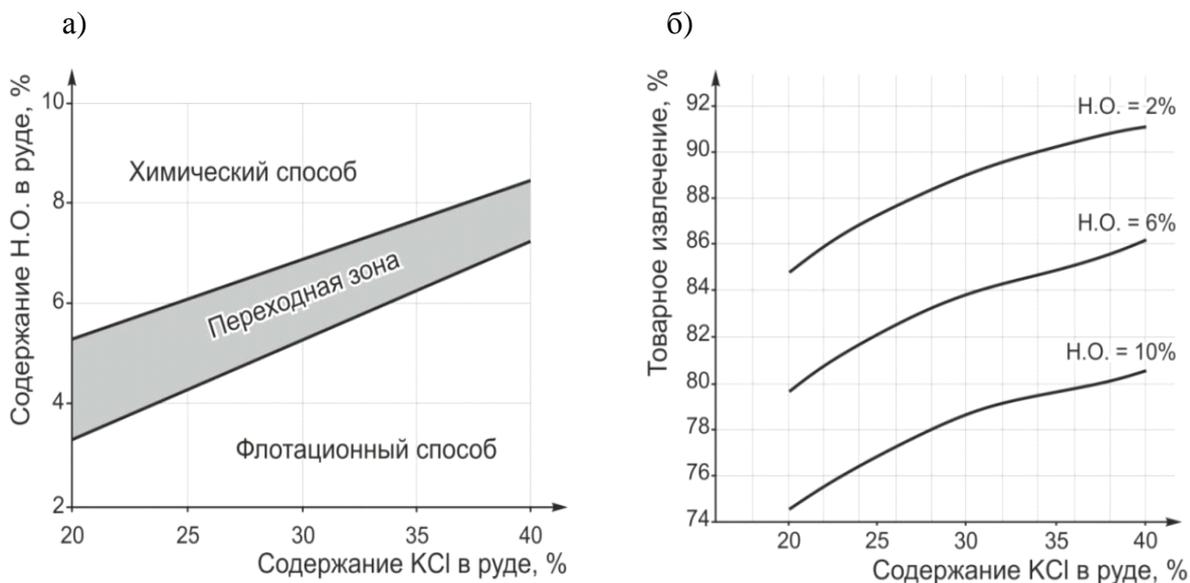


Рис.3. Области экономического применения способов обогащения и товарное извлечение КСl от состава руды (Тетериной Н.Н. и др, 1975)

Вместе с этим, в случае оставления защитной пачки при отработке пласта КрII возникают сложности с применением клинораспорных анкеров для крепления кровли, так как во время установки их замок будет располагаться в слабой слое с высоким содержанием глинистого материала и возводимая крепь не будет выполнять свои функции. В таком случае, возможно потребуется замена типа крепи и модернизация шахтного оборудования.

Важно также отметить, что выбор способа управления кровлей в очистных камерах напрямую влияет на проходу подготовительных выработок. В случае различия вариантов появляются переходные зоны с изменяющейся мощностью несущего слоя защитной пачки и мощными глинистыми слоями в непосредственной кровле.

Таким образом, при выборе вариантов отработки запасов в условиях высокого содержания глины в кровле обрабатываемых пластов должна выполняться комплексная оценка, учитывающая кроме коэффициента извлечения экономическую эффективность предлагаемых вариантов. Экономическая оценка должна учитывать стадию обогащения, необходимо учитывать возможности фабрики по переработке руды с высоким содержанием глины. Важно также выбрать оптимальные варианты крепления подготовительных и очистных выработок и возможности модернизации шахтного оборудования для повышения технологичности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разрушение кровли очистных камер в условиях повышенной глинизации / А.Ю. Шумихина, С.Ю. Лобанов, А.В. Евсеев, В.Н. Токсаров // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2010. – № 11. – С. 37-41.

**А.А. УДАРЦЕВ***Горный институт УрО РАН***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ VIC-3D  
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ  
ПРИ ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

Знание закономерностей деформационных процессов, сопровождающих подземную разработку полезных ископаемых, играет немаловажную роль в обеспечении безопасных условий ведения горных работ и долговременного сохранения устойчивости подземных горнотехнических объектов. Как правило, изучение деформационных процессов протекающих в породах проводится в лабораторных условиях путем определения деформационных показателей при различных режимах и схемах нагружения образцов горных пород. К стандартным методам регистрации деформаций образца в ходе экспериментального нагружения относят: измерение деформаций по траверсе пресса, использование навесных высокоточных экстензометров или тензодатчиков и наблюдение за развитием деформаций с помощью бесконтактных видеоэкстензометров. Применение стандартных средств измерения в области экспериментальной механики горных пород не позволяют получать информацию по всей исследуемой поверхности, а лишь общее представление о характере деформирования. Так же в ряде случаев необходимо учитывать жесткость испытательной установки, для повышения точности измерения, а при использовании навесного оборудования риск его повреждения в ходе динамических испытаний.

В настоящее время широкое применение получили оптические методы и средства неразрушающего контроля, которые позволяют проводить измерения деформаций по всей поверхности образца. В частности, одним из высокоэффективных оптических методов анализа полей деформаций является метод корреляции цифровых изображений. Метод позволяет восстанавливать поле векторов перемещений на поверхности исследуемых образцов путем сопоставления опорного изображения (фотографии объекта в исходном состоянии) с изображениями, снятыми в процессе нагружения. Изображение образца разбивается на сектора и анализируется перемещение рисунка поверхности (нанесенного с помощью красителя) в пределах каждого такого элементарного окна. Алгоритм построения векторов смещения основывается на установке соответствия между двумя элементарными участками, путем вычисления коэффициента корреляции и поиске его максимума [1].

Изучение полей деформации на образцах горных пород осуществлялось на основе использования бесконтактной трехмерной оптической системы Vic-3D фирмы «Correlated Solutions». Портативность системы позволяет проводить работу в лабораторных условиях и исследовать локализацию деформаций в образцах, нагружаемых на испытательной установке. Механическое нагружение осуществлялось с помощью электромеханического пресса Zwick/Z250 при стандартной скорости деформирования – 1 мм/мин в соответствии с требованиями ГОСТа [2]. В состав оптической видеосистемы входят: две цифровые черно-белые камеры с разрешением до 5,0 Мп и соответствующей ему максимальной скоростью съемки 20 кадров в секунду; комплект сменных объективов к камерам с различным фокусным расстоянием; специализированное программное обеспечение, с помощью которого осуществляется управление процессом съемки (Vic-Snap) и постобработка зарегистрированных фотографий (Vic-3D); система подсветки поверхности образца; блок синхронизации видеосистемы с испытательной машиной; набор калибровочных

таблиц; набор трафаретов для нанесения специального изображения и штатив с трехкоординатной регулируемой головкой (рис. 1).

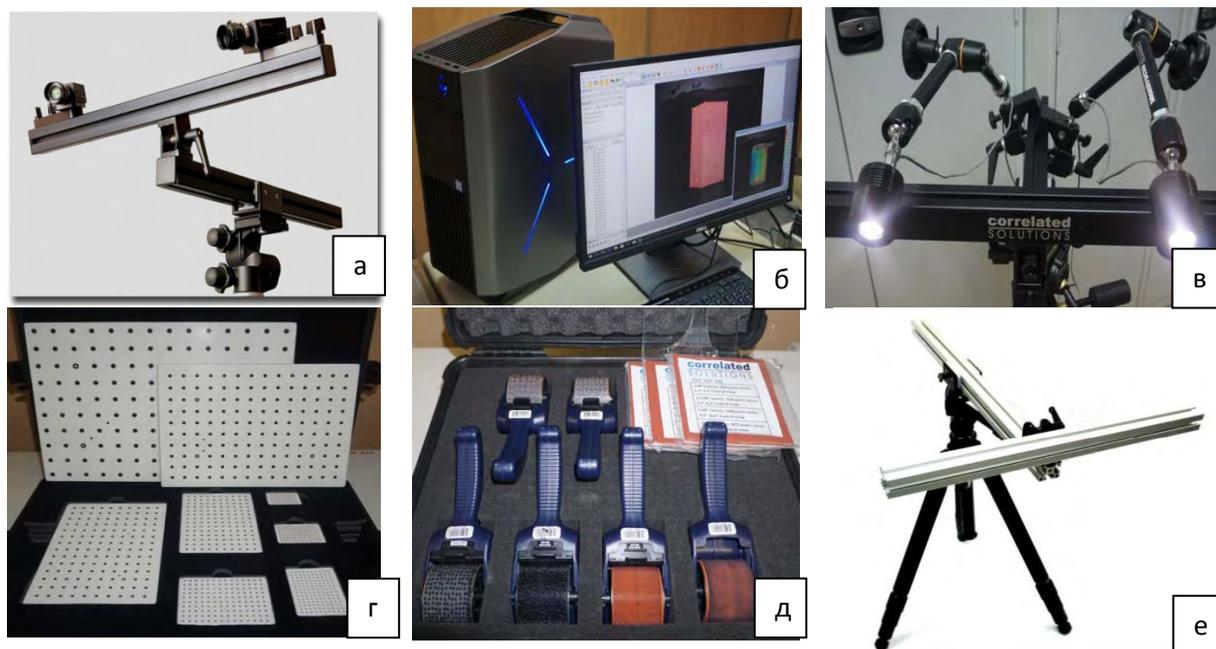


Рис. 1. Состав бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D: комплект камер (а), специализированное ПО (б), система подсветки образца (в), калибровочные таблицы (г), набор трафаретов (д), штатив с трехкоординатной головкой (е)

Методика проведения испытаний с использованием видеосистемы включает в себя несколько этапов. Подготовительный этап состоит в предварительном нанесении на поверхность исследуемого образца контрастного мелкодисперсного напыления, представляющего совокупность хаотично расположенных черных точек на белой матовой основе (т.н. спекл-структура). Для нанесения спекл-структуры наиболее часто используется обычная матовая краска, либо специальные трафареты, которые путем накатывания на образец образуют подходящую картину. Далее производится установка и настройка резкости камер и калибровка стереосистемы. Процесс калибровки заключается в сборе серии снимков калибровочной таблицы в различных положениях – повороты вокруг трех осей. Калибровочная таблица это эталонная матрица черных точек и маркеров фиксированного радиуса, расположенных на заданном расстоянии друг относительно друга (рис. 1, г). После завершения подготовительного этапа проводится испытание с последующей обработкой полученных результатов методом корреляции цифровых изображений.

На этапе постобработки выбирается область исследования и оптимальные параметры корреляционного анализа для определения перемещений локальных участков на поверхности образца. В параметры корреляционного анализа для построения векторов смещений входят размер локальной области (подмножества)  $X \times X$  в пикселях и шаг процедуры поиска ( $\Delta X$ ). Для подбора оптимальных параметров проводилась серия вычислений полей перемещений и деформаций для одного кадра при испытании соляного образца с основанием  $35 \times 35$  мм и высотой 70 мм. В программном обеспечении цифровой оптической системы Vic-3D при установлении соответствия изображений для каждого подмножества вычисляется доверительный интервал соответствия ( $\theta$ ) в данной точке изображения (в пикселях).

Размер подмножества является допустимым, если среднее значение доверительного интервала не превышает  $\theta \leq 0,01$ . Результаты исследования при фиксированном значении шага ( $\Delta X = 5$ ) и интервале подмножества  $X = 9-65$ , а также фиксированном значении подмножества ( $X = 29 \times 29$  пикселей) и интервале шага  $\Delta X = 1-29$  представлены в виде графиков (рис. 2). Проанализировав полученные данные можно сделать вывод, что подмножество размером  $21 \times 21$  пикселей является минимальным допустимым из исследуемой области. С целью уменьшения величины шума и повышения точности корреляционного анализа оптимальным размером локальных областей является размер  $29 \times 29$  пикселей. Следует отметить, что параметр  $\Delta X$  практически не влияет на точность корреляционной обработки цифровых изображений, выбор шага определяет лишь степень детализации построения полей перемещений.

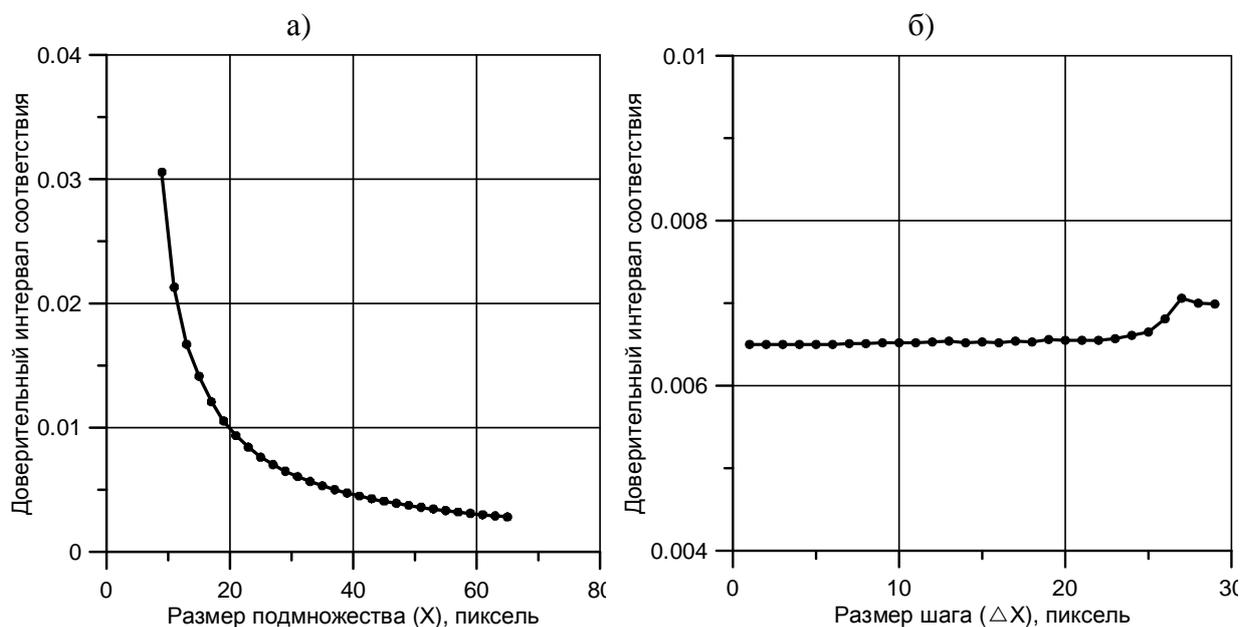


Рис. 2. Результаты определения оптимальных параметров корреляционной обработки:  
 а) исследования при фиксированном значении шага  $\Delta X = 5$ ;  
 б) исследования при фиксированном значении подмножества  $X=29 \times 29$

После обработки результатов вычисляются геометрические параметры поверхности образца и перемещение в каждой точке. Вместе с перемещениями производится построение полей продольной ( $\epsilon_{yy}$ ), поперечной ( $\epsilon_{xx}$ ) и сдвиговой деформации ( $\epsilon_{xy}$ ), а также первой и второй главной деформации ( $\epsilon_1, \epsilon_2$ ). Данные могут быть представлены в виде трехмерного графика или в виде двухмерного контурного графика накладываемого на спекл-изображение. В процессе интерпретации результатов полученных в ходе обработки можно наблюдать за развитием неоднородности и локализации полей деформаций, эволюции образования и дальнейшего роста трещин при накоплении дефектов (рис. 3).

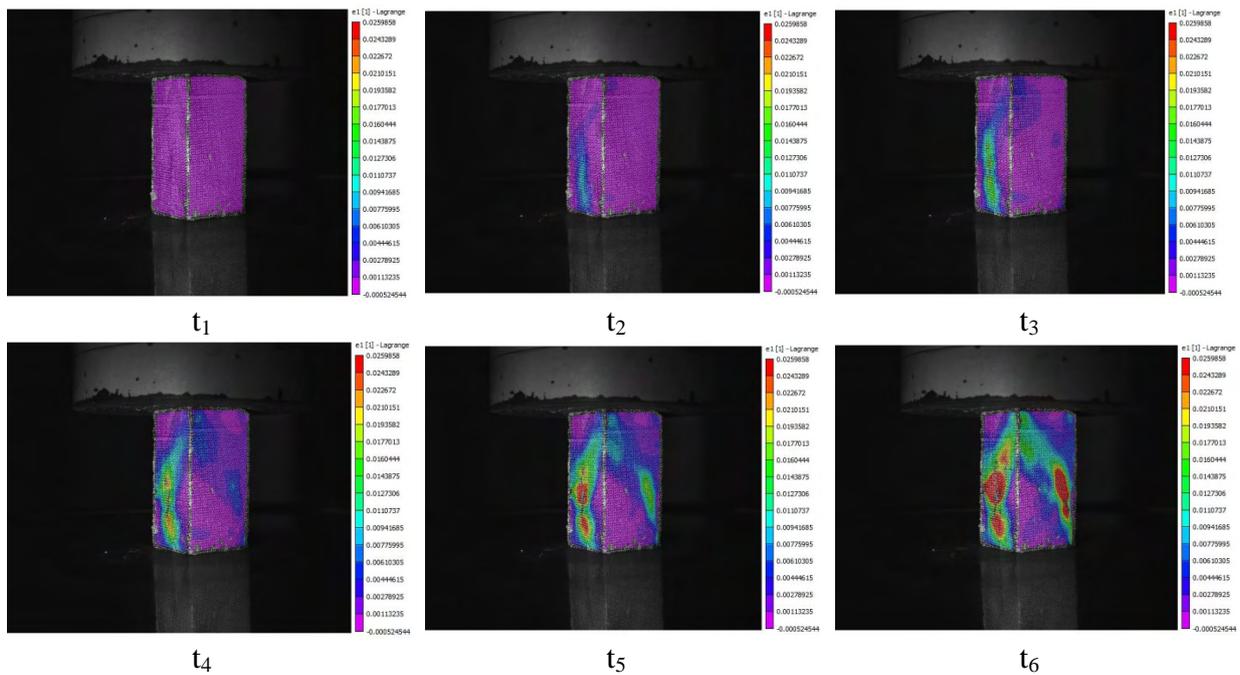


Рис. 3. Эволюция полей главных деформаций ( $\epsilon_1$ ) на поверхности образца для моментов времени ( $t_1 - t_6$ )

Двухмерные графики позволяют извлекать данные в выбранной точке или области на каждом изображении из последовательности файлов или же получать сечения вдоль линии. Также предусмотрено измерение деформаций образца с помощью дополнительного модуля программного обеспечения системы «виртуальный экстензометр». С помощью данного инструмента имитируется использование экстензометра на поверхности образца между двумя точками (рис. 4). Чтобы оценить достоверность данных, получаемых трехмерной цифровой оптической системой Vic-3D, проведены тестовые испытания с использованием навесного динамического датчика осевых деформаций и последующим сравнением результатов с «виртуальным экстензометром». Анализ эксперимента показал практически полное совпадение результатов по двум датчикам, что соответствует высокой измерительной точности оптической системы.

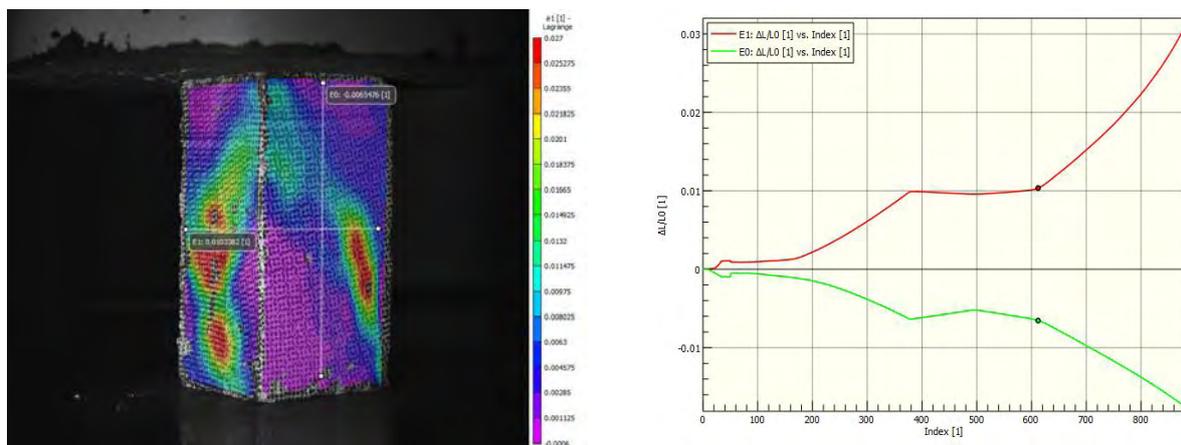


Рис. 4. Пример использование виртуального экстензометра

Достоинствами бесконтактной трехмерной оптической системы Vic-3D являются: способность проводить измерения полей перемещений и деформаций на поверхности

образцов различной формы и размеров, проводить измерения полей деформаций в зонах влияния дефектов и способность поддерживать формирование новых переменных, то есть применять функции к данным. Так же одним из преимуществ метода корреляции цифровых изображений является возможность проведения измерений как при малых так и при больших значениях деформаций, что позволяет исследовать широкий класс материалов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-45-590681 p\_a)*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. Пространственно-временная неоднородность процессов неупругого деформирования металлов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 120 с.
2. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 10 с.

УДК 622.023.23

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.34

В.С.КУЗЬМИНЫХ

*Горный институт УрО РАН*

### **ПОСТРОЕНИЕ ПАСПОРТОВ ПРОЧНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГУСТУПЕНЧАТЫХ ИСПЫТАНИЙ НА СДВИГ СО СЖАТИЕМ ОБРАЗЦОВ ЯКШИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

При геомеханическом обосновании безопасных условий ведения горных работ на месторождениях полезных ископаемых необходима информация о прочностных и деформационных свойствах основных типов пород, соответствующих условиям нахождения их в массиве [1, 2]. Одной из схем испытания при изучении свойств горных пород в лабораторных условиях являются схема, реализующая сдвиговые усилия [3]. Как показывает анализ литературных источников, испытания на прямой сдвиг горных пород немногочисленны ввиду их высокой трудоемкости и ограниченности объёма породного геоматериала. С целью совершенствования методики исследования механических свойств горных пород, проведена серия многоступенчатых экспериментов, позволяющих получать паспортные зависимости при испытании одного образца.

Исследования проводилось по схеме «сдвиг со сжатием» (рис. 1) на сервогидравлическом испытательном комплексе «MTS-816», особенностью которого является возможность проводить эксперимент на достаточно представительных образцах горных пород с линейными размерами до 200 мм.

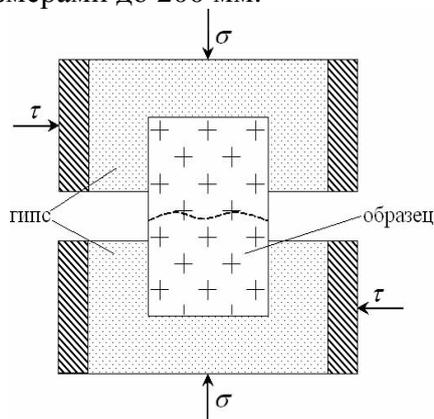


Рис. 1. Схема испытания образцов горной породы в режиме - «сдвиг со сжатием»

Для испытаний использовались полноразмерные образцы керна диаметром 100 мм и длиной не менее 200 мм отобранные на площадях Якшинского месторождения. Фиксация образцов в матрицах производилась таким образом, чтобы сдвиг происходил по контакту различных типов пород (поверхности ослабления) (рис. 2).

Для оценки коэффициента сцепления и угла внутреннего трения при проведении испытаний на сдвиг по поверхности ослабления проводился по многоступенчатой схеме при уровнях вертикального поджатия – 1,0, 3,0 и 5,0 МПа и при скорости сдвиговых смещений 1 мм/мин. Каждый уровень вертикального поджатия поддерживался до достижения сдвиговыми усилиями пиковых значений. После этого производилось увеличение нормального усилия до следующего уровня с выводом сдвигового напряжения до пикового значения.

Характерный вид диаграмм деформирования и изменения нормального напряжения приведен на (рис. 3).



Рис. 2. Подготовка образца к проведению сдвиговых испытаний

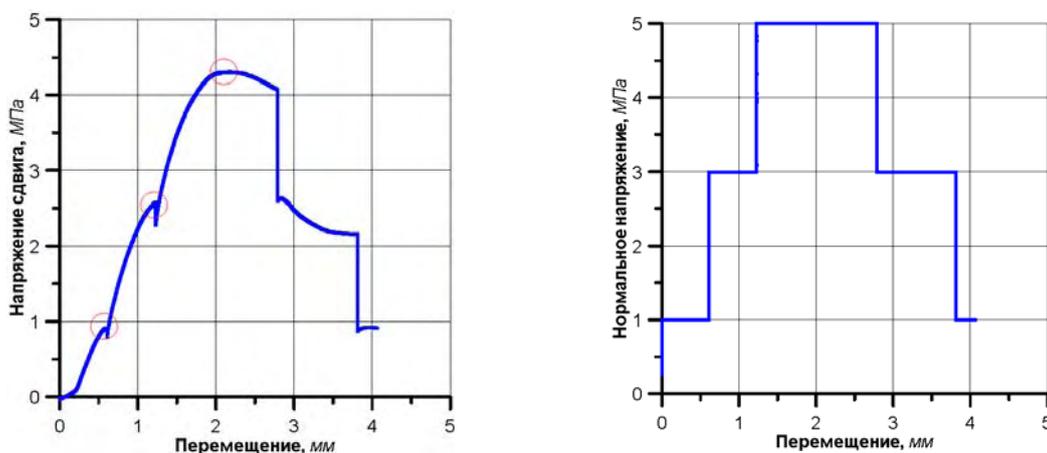


Рис. 3. Характерный вид результатов испытаний при многоступенчатом сдвиге со сжатием: а – сдвиговая диаграмма деформирования; б – диаграмма изменения нормального напряжения

Результаты влияния нормального напряжения на пиковую прочность при сдвиге по каждому образцу приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ пробы	Порода	Пиковая прочность на сдвиг при различных нормальных напряжениях, МПа			Параметры паспорта прочности	
		1,0	3,0	5,0	C, МПа	tgφ
1	Мергель с гипсом	1,86	4,8	6,66	0,84	1,2
2	Каменная соль (покровная)	0,91	2,59	4,33	0,05	0,85
3	Мергель	1,58	3,16	4,73	0,79	0,79
4	Каменная соль (покровная)	1,92	3,82	6,12	0,81	1,05
5	Каменная соль (подстиляющая)	2,67	4,27	6,38	1,66	0,93
6	Каменная соль (покровная)	0,68	3,22	4,32	0,01	0,91

Полученные результаты исследований использовались для построения линейного паспорта прочности на сдвиг по поверхностям ослабления (рис. 4). Установлено, что для различных типов ослабления тангенс угла внутреннего трения изменяется от 0,79 до 1,20, а сцепление от 0,01 до 1,66 МПа.

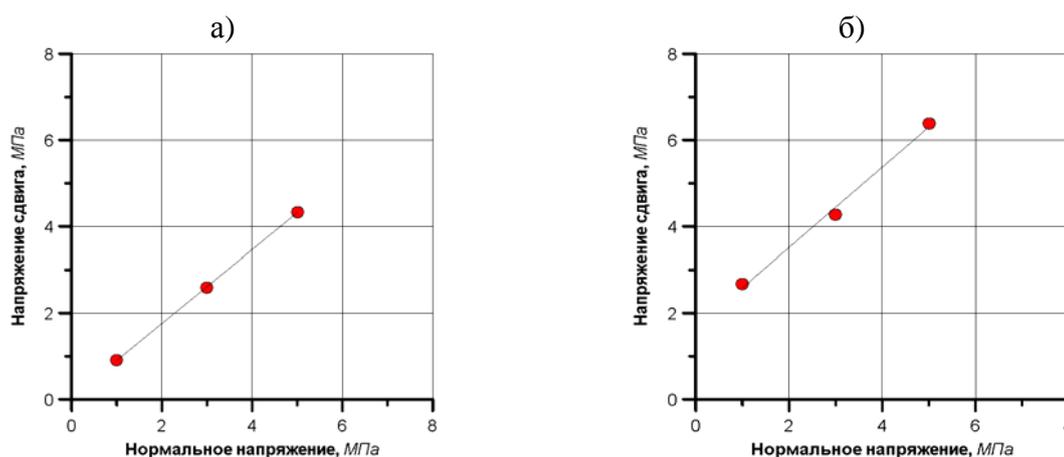


Рис. 4. Сдвиговые паспорта прочности:  
а – покровная каменная соль; б – подстиляющая каменная соль

Таким образом, выполненный комплекс исследований позволил заключить, что многоступенчатые сдвиговые испытания дают возможность получать информацию о прочностных свойствах пород при ограниченном объеме породного материала. Результаты испытаний на данном этапе являются предварительными.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №18-05-00371 А).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карташов Ю.М. и др. Прочность и деформируемость горных пород – М.: Недра, 1979. – 269 с.
2. Введение в механику скальных пород: Пер. с англ./Под ред. Х.Бока. – М.: Мир, 1983.
3. Ильницкая Е.И. и др. Свойства горных пород и методы их определения. – М.: Недра, 1969. – 392 с.

И.А. МОРОЗОВ  
Горный институт УрО РАН  
**МЕТОД ОБЪЕМНОГО МНОГОСТУПЕНЧАТОГО НАГРУЖЕНИЯ  
КАК ИНСТРУМЕНТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛЯНЫХ ПОРОД**

Комплекс лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород включает в себя эксперименты по одноосному сжатию и растяжению, объемному нагружению и сдвигу, изгибу и т.д. При исследовании керна скважин постоянно приходится работать с ограниченным объемом породного материала. Изготовление необходимого количества образцов зачастую просто невозможно. Задача о разработке эффективных методов лабораторных исследований, позволяющих извлекать максимум информации из минимального количества породного материала, особенно актуальна для Верхнекамского калийного месторождения (ВКМКС), что связано с использованием разряженной сетки бурения геологоразведочных скважин. Данное исследование посвящено экспериментально-теоретическому обоснованию возможности применения метода объемного многоступенчатого нагружения для определения прочностных характеристик соляных пород ВКМКС.

Анализ литературных источников [1-3], а также проведенные предварительные исследования соляных пород показали, что объемное многоступенчатое нагружение дает заниженные значения предела прочности, что объясняется закономерным увеличением предварительной поврежденности образцов на последующих ступенях многоступенчатого нагружения. Для снижения степени недооцененности прочностных характеристик методом объемного многоступенчатого нагружения, переключение на следующую ступень деформирования необходимо выполнять не доводя образец до предела прочности. Значение прочности ступени нагружения предлагается оценивать путем экстраполяции соответствующей части диаграммы деформирования. Для проверки данных предположений на руднике БКРУ-4 был отобран блок полосчатого сильвинита, из которого была изготовлена партия образцов. Часть образцов была испытана по «стандартной» одноступенчатой схеме при боковых давлениях 2 МПа, 4 МПа, 8 МПа, оставшиеся образцы испытывались по «модифицированной» многоступенчатой схеме (рис. 1).

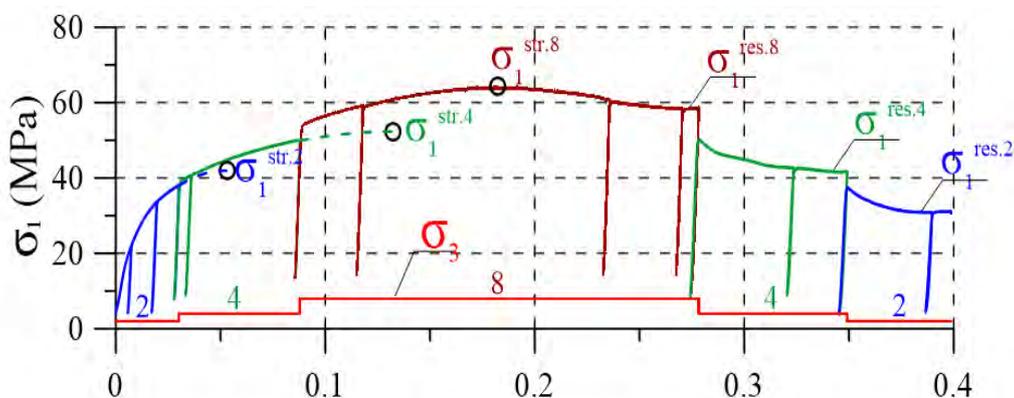


Рис. 1. Характерная диаграмма деформирования образца при нагружении по «модифицированной» многоступенчатой схеме

Объемное многоступенчатое нагружение каждого образца выполнялось в пять этапов (рис. 1):

- При постоянном боковом давлении ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 2$  МПа) с постоянной скоростью продольного деформирования образец доводился до точки, соответствующей 0,9 предела прочности первой ступени. После чего выполнялось переключение на следующую ступень нагружения ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 4$  МПа). Предел прочности первой ступени ( $\sigma_{1str.2}$ ) определялся методом графической экстраполяции соответствующей части диаграммы деформирования.

- При  $\sigma_2 = \sigma_3 = 4$  МПа с постоянной скоростью продольного деформирования образец доводился до точки, соответствующей 0,9 предела прочности второй ступени. После чего выполнялось переключение на следующую ступень многоступенчатого нагружения ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 8$  МПа). Предел прочности второй ступени ( $\sigma_{1str.4}$ ) определялся методом графической экстраполяции соответствующей части диаграммы деформирования.

- При  $\sigma_2 = \sigma_3 = 8$  МПа с постоянной скоростью продольного деформирования образец доводился до остаточной прочности ( $\sigma_{1res.8}$ ). После чего выполнялось переключение на следующую ступень многоступенчатого нагружения ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 4$  МПа).

- При  $\sigma_2 = \sigma_3 = 4$  МПа с постоянной скоростью деформирования образец доводился до остаточной прочности ( $\sigma_{1res.4}$ ). После чего выполнялось переключение на следующую ступень многоступенчатого нагружения ( $\sigma_2 = \sigma_3 = 2$  МПа).

- При  $\sigma_2 = \sigma_3 = 2$  МПа с постоянной скоростью продольного деформирования образец доводился до остаточной прочности ( $\sigma_{1res.2}$ ).

Одноступенчатое и многоступенчатое объемные нагружения сопровождалось серией разгрузок с последующим нагружением для определения изменения величины модуля упругости в процессе деформирования. Модуль упругости определялся как тангенс угла наклона линейной части разгрузочной ветви диаграммы деформирования. Вид образцов после испытания представлен на рис. 2.

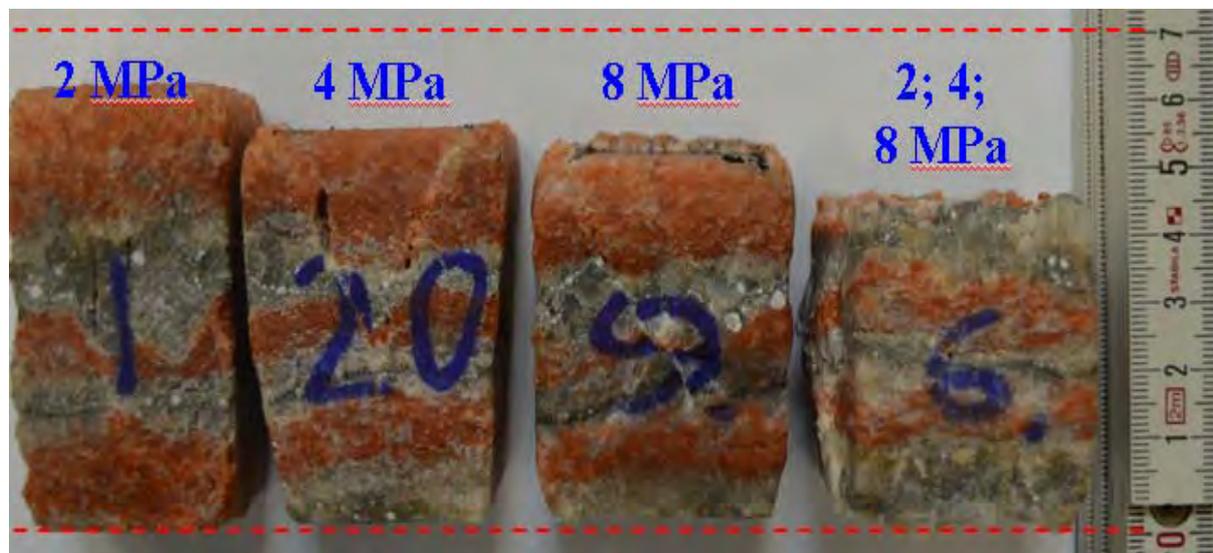


Рис. 2. Вид образцов после испытаний (слева-направо):  
– образцы, испытанные по одноступенчатой схеме при боковых давлениях 2 МПа, 4 МПа, 8 МПа;  
– образец, испытанный по многоступенчатой схеме при давлениях 2 МПа, 4 МПа, 8 МПа

Ниже представлен анализ результатов проведенного исследования. Рис. 3 отражает влияние бокового давления на величину предела прочности ненарушенного образца, величину остаточной прочности полосчатого сильвинита. На рис. 4 представлены паспорта прочности Кулона-Мора ненарушенной породы и остаточной прочности полосчатого сильвинита. На рис. 5 представлена диаграмма, отражающая изменение модуля упругости в процессе деформирования в зависимости от уровня бокового давления и типа испытания.

Метод многоступенчатого объемного нагружения полосчатого сильвинита дает значения предела прочности ненарушенных породных образцов сопоставимые на уровне разброса экспериментальных данных с результатами «стандартных» одноступенчатых испытаний (рис. 3, а). Остаточная прочность сильвинита при боковом давлении 2 МПа (рис. 3, б) по результатам многоступенчатого нагружения несколько выше значения, полученного по данным одноступенчатых испытаний, что объясняется сильным вдавливанием нагружающих пуансонов в торцы образцов в процессе многоступенчатого испытания (см. рис. 2). Эта проблема может быть решена путем использования пуансонов несколько больших размеров: ребро пуансона должно быть больше соответствующего ребра образца на 1-2 мм.

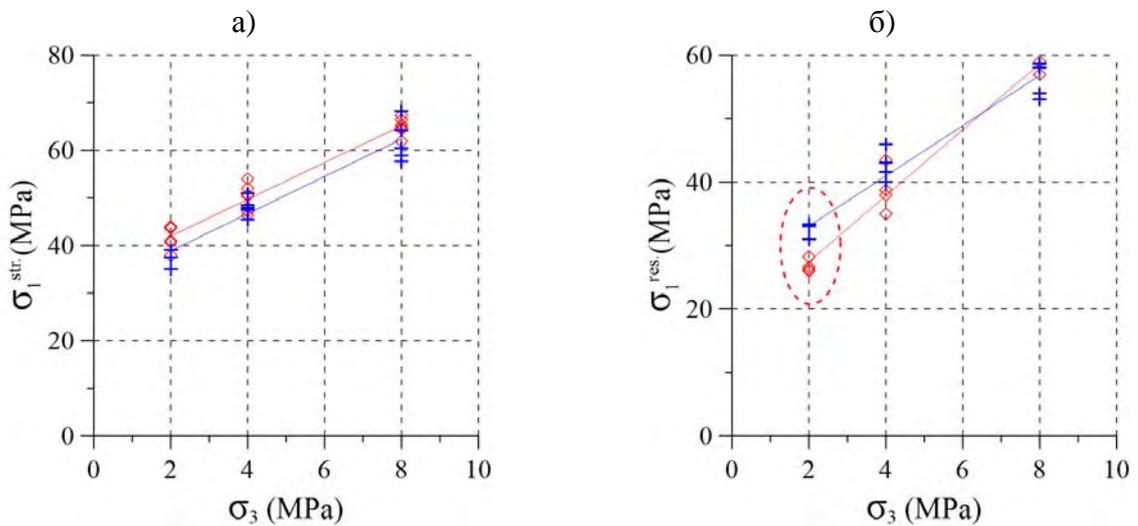


Рис. 3. Влияние бокового давления на величину предела прочности ненарушенного породного образца полосчатого сильвинита (а), величину остаточной прочности (б)

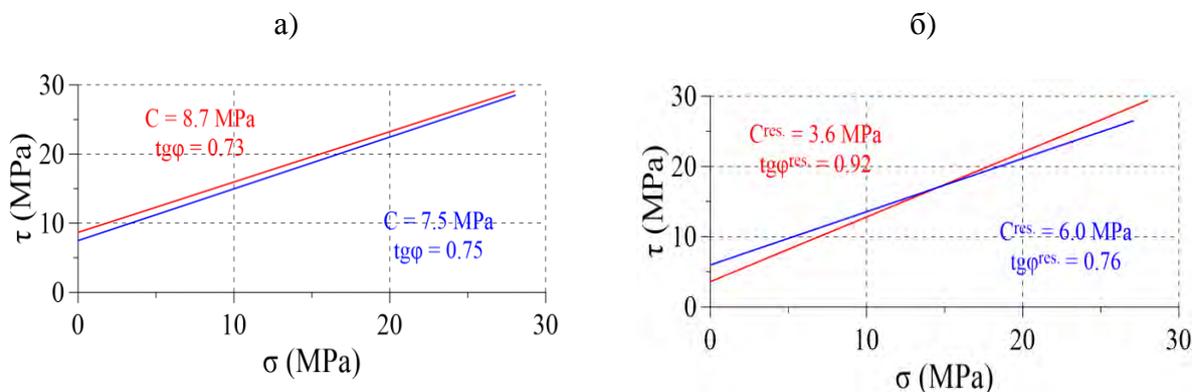


Рис. 4. Паспорт прочности Кулона-Мора ненарушенной породы (а) и остаточной прочности (б) полосчатого сильвинита.

Результаты одноступенчатых испытаний показаны красным цветом, многоступенчатых – синим

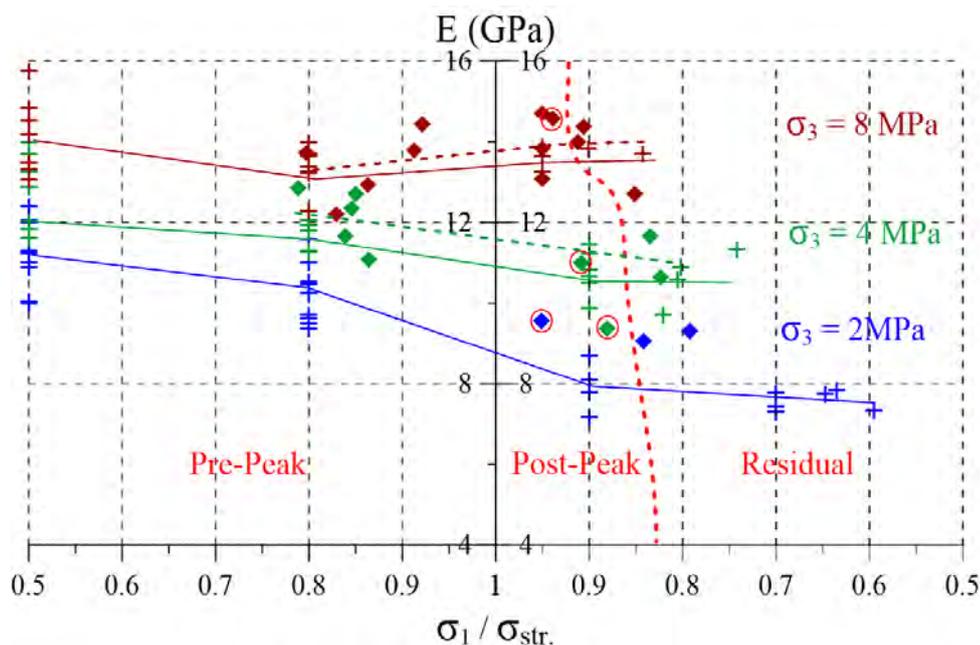


Рис. 5. Изменение модуля упругости в зависимости от уровня бокового давления и типа испытания: сплошные линии – результаты одноступенчатых испытаний при соответствующих уровнях бокового давления; пунктирные: зеленая, коричневая линии – результаты многоступенчатых испытаний при соответствующих уровнях бокового давления; субвертикальная красная пунктирная линия – условная граница между запредельным разупрочнением и остаточной прочностью образца

Паспорта прочности Кулона-Мора характеризуются двумя параметрами: коэффициентом сцепления, тангенсом угла внутреннего трения. По результатам анализа паспорта прочности ненарушенной породы (рис. 4, а) можно сделать вывод о удовлетворительном соответствии данных многоступенчатых и одноступенчатых испытаний. Некоторое несоответствие в оценке параметров остаточной прочности указанными методами можно наблюдать на рис. 4, б. Данный результат объясняется переоцененным значением остаточной прочности методом объемного многоступенчатого нагружения при боковом давлении 2 МПа (рис. 3, б).

Рис. 5 отражает изменение модуля упругости в процессе деформирования в зависимости от уровня бокового давления и типа испытания. Видно, что с увеличением бокового давления, по данным одноступенчатых испытаний, на всех стадиях деформирования модуль упругости увеличивается. С ростом бокового давления тенденция к увеличению модуля упругости снижается. При боковых давлениях 2 МПа, 4 МПа в процессе деформирования наблюдается явное снижение модуля упругости, что объясняется разрушением упругих связей горной породы. Наиболее интенсивное снижение модуля упругости фиксируется в районе предела прочности. При выходе образца на остаточную прочность, модуль упругости сохраняется постоянным. При боковых давлениях 8 МПа отмечено лишь незначительное снижение модуля упругости на стадии допредельного деформирования, а при выходе образцов на запредельное деформирование тенденция к снижению прекращалась. Результаты исследования изменения модуля упругости в процессе объемного многоступенчатого нагружения (рис. 5, пунктирные зеленая и коричневая линии) показывают, что мно-

гоступенчатый метод дает не только близкие значения модуля упругости но и отражает тенденции его изменения в хорошем соответствии с результатами одноступенчатых испытаний.

Результаты определения механических характеристик полосчатого сильвинита ВКМКС как одноступенчатым, так и многоступенчатым методами удовлетворительно сходятся с данными [4, 5]. Результаты анализа изменения модуля упругости в процессе нагружения обоими методами позволяют сделать вывод о том, что многоступенчатый метод объемного нагружения, в предложенной интерпретации, является эффективным инструментом для исследования процессов деформирования и разрушения соляных пород ВКМКС в лабораторных условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Youn H. Multi-stage triaxial test on brittle rock / Heejung Youn, Fulvio Tonon // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2010. – Vol. 47, № 4. – P. 678-684. – doi: 10.1016/j.ijrmms.2009.12.017.
2. Yang S.Q. Strength and deformation behavior of red sandstone under multi-stage triaxial compression // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2012. – V. 49, № 6. – P. 694-709. – DOI: 10.1139/t2012-035.
3. Vergara M.R. Large Scale Tests on Jointed and Bedded Rocks Under Multi-Stage Triaxial Compression and Direct Shear / Vergara M.R., Kudella P., Triantafyllidis T. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2014. – Vol. 48, № 1. – P. 75-92. – DOI: 10.1007/s00603-013-0541-1.
4. Зильбершмидт В.Г. Разрушение соляных пород: [науч. изд.] / В.Г. Зильбершмидт, В.В. Зильбершмидт, О.Б. Наймарк; ГИ УрО РАН, [отв. ред. И.В. Баклашов]. – М.: Наука, 1992. – 144 с.
5. Барях А.А. Деформирование соляных пород / А.А. Барях, С.А. Константинова, В.А. Асанов; ГИ УрО РАН; [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.831

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.36

С.Г. БЫЧКОВ

*Горный институт УрО РАН*

## **АНОМАЛЬНЫЕ ВРЕМЕННЫЕ РЯДЫ ЗАПИСИ ГРАВИМЕТРОВ**

Измерение поля силы тяжести гравиметром серии Autograv CG (Scintrex) производится путем постоянного усреднения замеров датчика, снимаемых с периодичностью 6 Гц [7]. Выходной сигнал прибора помимо усредненного значения поля за определенный оператором период содержит дисперсию отсчета и ряд поправок (за лунно-солнечные притяжения, наклоны прибора, температуру и др.). Поскольку система Autograv может быть переведена в режим циклических измерений, то имеется возможность непрерывной записи вариаций гравитационного поля.

Многими исследователями [2, 3, 5, 6, 8] выполнялись наблюдения вариаций гравитационного поля и отмечены незакономерные резкие возрастания амплитуды колебаний датчика гравиметра, названные Ю.В. Антоновым [2] пульсациями, имеющими знакопеременный характер, и всплесками преимущественно положительного знака силы тяжести. Они имеют непериодический характер и продолжаются от нескольких часов до нескольких суток. Пульсации фиксируются синхронно гравиметрами, удаленными друг от друга на тысячи километров, т.е. не связаны с конструктивными особенностями различных приборов, метеорологическими, гидрогеологическими или другими локальными факторами.

Попытки объяснить аномальные записи регистрацией гравиметром сейсмических волн от землетрясений, постоянно происходящих в различных районах Земного шара, не увенчались успехом. Тем не менее, И.Н. Михайлов [5] выявил связь повышенных дисперсий отсчетов гравиметра с предстоящими через 7-14 дней землетрясениями магнитудой более 6, т.е., по его мнению, пульсации являются краткосрочными предвестниками катастрофических землетрясений. Каких либо физических или геологических обоснований своего утверждения И.Н. Михайлов не приводит, кроме того, судя по многочисленным опубликованным графикам, эта связь не очевидна. Более того, всегда можно найти землетрясение, которое произошло за одну-две недели, как до всплеска, так и после него.

По результатам многолетних наблюдений Ю.В. Антонов [2] установил сезонность проявления пульсаций и предположил их связь с метеоритными потоками или с процессами, происходящими на Солнце, и с состоянием магнитосферы Земли, в частности с вариациями магнитотеллурического поля. Сезонность изменения гравитационного поля установил также А.С. Бебнев [3]. Ранее Г.Т. Собакарь [6] установил зависимость вариаций силы тяжести от солнечной активности.

Таким образом, гипотез происхождения всплесков или пульсаций гравитационного поля много, причем непонятно, имеем ли мы дело действительно с резкими изменениями гравитационного поля или повышенной дисперсией отсчетов гравиметра, обусловленных, например, низкочастотными микросейсмами.

Нами совместно с сотрудниками Института Физики Земли РАН [1] в течение полугода месяцев (февраль-апрель 2017 г.) осуществлена синхронная запись показаний гравиметров, установленных в Перми и в Обнинске. Дискретность записи составляла 1

мин, фильтр сейсмических помех был выключен и включена запись лунно-солнечного притяжения. В Перми гравиметр был установлен в пригороде вдали от техногенных помех на бетонном полу в неотапливаемом помещении, в Обнинске – в обсерватории Единой геофизической службы РАН.

Обработка первичных данных заключалась в устранении линейного тренда записи, обусловленного смещением нуля-пункта прибора, путем осреднения скользящим окном 20 мин. Для анализа использовались локальная (остаточная) составляющая записи гравиметра, а также величина дисперсии отсчета (параметр SD).

По результатам эксперимента можно сделать выводы: гравиметры, разнесенные между собой почти на 1500 км, зарегистрировали один и тот же сигнал или процесс (коэффициент корреляции между показаниями гравиметров 0.97); сами отсчеты и их дисперсия изменяются синхронно; повышенная дисперсия отсчетов 0.1-0.2 мГал наблюдается длительность от 2 дней до 2 недель (рис. 1).

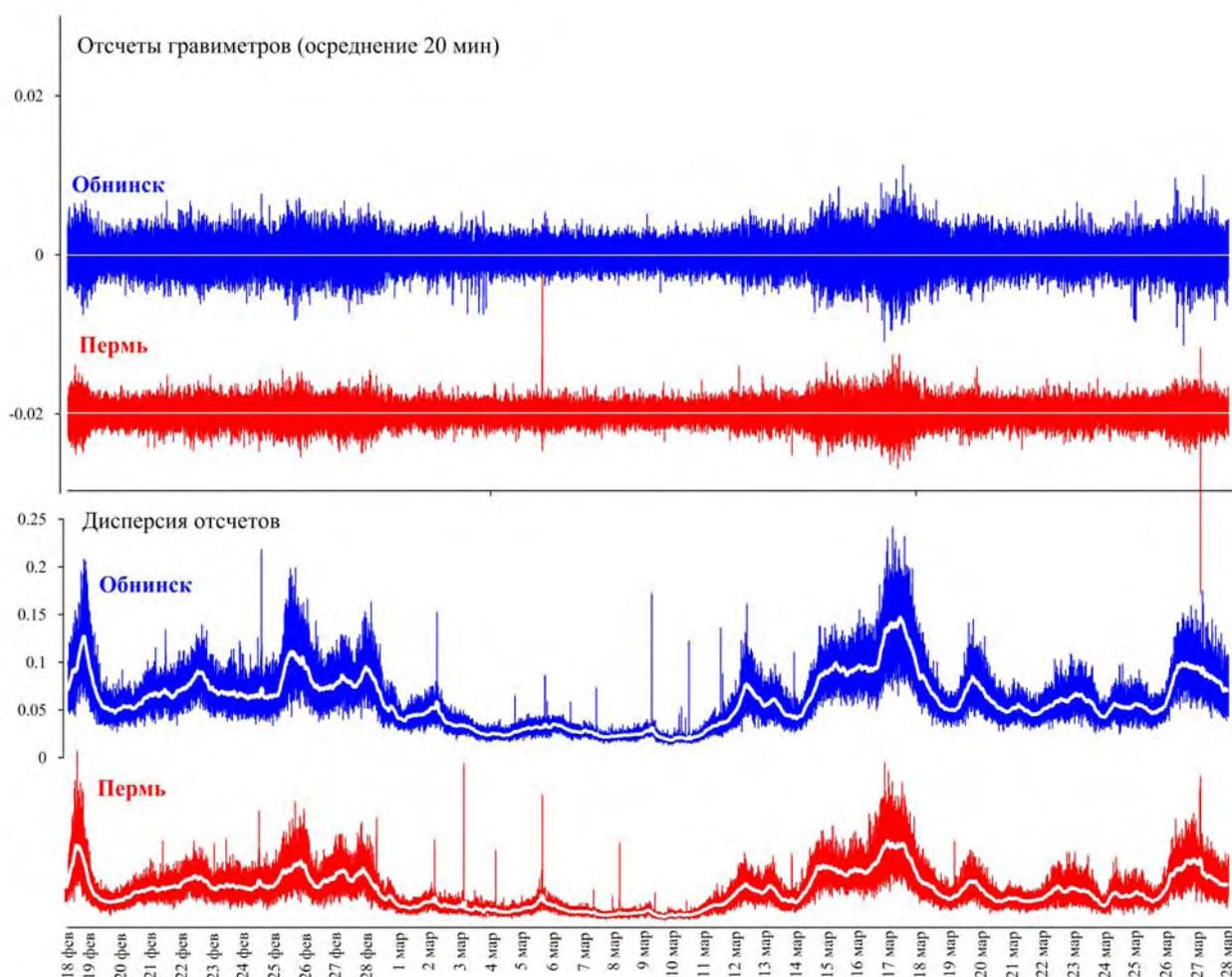


Рис. 1. Записи гравиметров в Перми и Обнинске

Аналогичная форма записи в этот же период времени получена гравиметрами, установленными в Екатеринбурге (А.В.Овчаренко), в Арти (А.С.Бибнев) и в С.-Петербурге (Е.Ю.Ермолин), несмотря на различие параметров записи и даже различные типы гравиметров (в обсерватории Института геофизики УрО РАН Арти установлен гравиметр gPhone).

Нами проверены гипотезы связи данных вариаций с метеорологическими явлениями (хотя было ясно, что в разных городах в данный момент времени различны атмосферное давление, влажность воздуха и пр.), с солнечной активностью по данным

европейской обсерватории (<http://sidc.oma.be/>) и с землетрясениями по каталогам Геофизической службы РАН (<http://www.ceme.gsras.ru>). Зависимости между повышенной дисперсией отсчетов и перечисленными явлениями не установлено. А.В.Овчаренко [8] и А.С.Бибнев [3] осуществляют такие наблюдения в течение нескольких лет и отмечают устойчивую сезонную составляющую: амплитуда дисперсии в летний период существенно меньше, т.е. возможна связь дисперсии отсчетов гравиметра с гидрогеологическими факторами.

Учитывая, что повышенная дисперсия отсчетов является помехой при высокоточных гравиметрических съемках, в частности при мониторинговых гравиметрических работах на Верхнекамском месторождении калийных солей [4] данные работы следует продолжить, объединив усилия исследователей.

В исследовании описанного процесса принимают участие сотрудники Института физики Земли РАН (Москва) Д.В.Абрамов и В.Н.Конешов, А.В.Овчаренко (Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург), А.С.Бибнев (Институт геофизики УрО РАН, Арты), О.А.Кусонский (Институт геофизики УрО РАН, Арты), Е.Ю.Ермолин (GM Service, С.-Петербург). Надеюсь, совместными усилиями возможно установить природу аномальных записей гравиметра.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-45-590426).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Д.В. Возможная природа пульсаций гравитационного поля / Д.В. Абрамов, С.Г. Бычков // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 45-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / Казан. фед. ун-т. – Казань, 2018. – С. 16-18.
2. Антонов Ю.В. Всплески непривливаемых вариаций силы тяжести // Геофизика. – 2017. – № 1. – С. 28-34.
3. Бибнев А.С. Сезонная составляющая по результатам мониторинговых наблюдений гравитационного поля на обсерватории «Арты» // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: материалы конф. / Ин-т геофизики УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2017. – С.51-54. – (Девятые науч. чтения памяти Ю.П. Булашевича).
4. Бычков С.Г. Гравиметрический мониторинг аварийных участков рудников Верхнекамского месторождения калийных солей / С.Г. Бычков, А.В. Мичурин, А.А. Симанов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: Сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием / ПГНИУ; под общ. ред. Р.Г. Ибламинова. – Пермь, 2017. – С. 132-137.
5. Михайлов И.Н. Новые результаты по регистрации краткосрочных предвестников катастрофических событий (землетрясений) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 32-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2005. – С. 193-194.
6. Собакарь Г.Т. Непривливаемые изменения силы тяжести. – Киев: Наук. думка, 1982. – 136 с.: ил.
7. CG-5. Гравиметрический комплекс Autograv компании Scintrex: Рук-во по эксплуатации: пер. с англ. AGT Systems. – М., 2002. – 248 с.
8. Ovcharenko A.V. Processing and interpretation of time series high precision gravimetric monitoring // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 45-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / Казан. фед. ун-т. – Казань, 2018. – С. 143.

И.В. ГЕНИК  
*Горный институт УрО РАН*  
**СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ И ИХ ВЗАИМОСВЯЗИ  
ПРИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РАБОТАХ НА НЕФТЬ И ГАЗ**

Выполнение анализа результатов региональных работ на нефть и газ в Пермском крае и Кировской области, в которых принимала участие гравиразведка, связано с всесторонним рассмотрением данных, включая статистические характеристики геологических и геофизических данных, используемых при интерпретации (ранее были рассмотрены методы прогнозирования результатов гравиметрических работ [4]).

Рассматривались данные региональных работ [1-3, 5] выполненных в Кировской области (две площади) и Пермском крае (14 площадей), в различных тектонических регионах. Для площадей анализировались следующие характеристики: рельеф земной поверхности ( $R$ ), магнитное поле ( $M$ ), гравитационное поле ( $G$ ), структурная карта ОГ П<sup>К</sup> (кровля визейских терригенных отложений) ( $S$ ), трансформанта гравитационного поля, характеризующая ОГ П<sup>К</sup> ( $P$ ).

В связи с этим решались три задачи:

I) изучение взаимосвязи разброса значений  $\Delta S$  (ОГ П<sup>К</sup>) с разбросом значений других геофизических характеристик ( $\Delta R$ ,  $\Delta M$ ,  $\Delta G$ ,  $\Delta P$ ), т.е. получение некоторой сводной оценки по всем площадям в целом.

II) возможности прогноза на основании всего рассматриваемого набора геофизических характеристик ( $R$ ,  $M$ ,  $G$ ,  $P$ ,  $R^2$ ,  $M^2$ ,  $G^2$ ,  $P^2$ ) или его части поведения  $S$  для каждой площади.

III) взаимосвязи трансформанты гравитационного поля ( $P$ ) с исходным набором геофизических данных ( $R$ ,  $M$ ,  $G$ )

Разброс значений какой-либо величины может описываться такими характеристиками как размах, дисперсия, стандартное отклонение, коэффициент вариации. Анализ указанных характеристик показал, что наиболее информативным является размах (разность максимального и минимального значений), поскольку непосредственно описывает пределы изменения величин.

Взаимосвязь данных описывалась с помощью коэффициентов парной и множественной корреляции. Для каждой из описанных выше задача вычислялись парные корреляции рассматриваемых величин, а также различные варианты множественной корреляции, сделанные с предположением о линейном характере связи. Коэффициенты корреляции  $K$  описывают следующие типы силы связей: 0.1-0.3 – слабая связь, 0.3-0.5 – умеренная, 0.5-0.7 – заметная, 0.7-0.9 – высокая, 0.9-1.0 – очень высокая. При анализе основное внимание уделялось связям с  $K \geq 0.7$ . Также для характеристики связей использовался Коэффициент детерминации  $R^2$  — величина, показывающая долю дисперсии зависимой переменной, объясняемой рассматриваемой моделью зависимости. В случае линейной зависимости  $R^2$  является квадратом множественного коэффициента корреляции между зависимой переменной и объясняющими переменными.

При решении задачи I были получены следующие коэффициенты парной и множественной корреляции. Парные коэффициенты корреляции были меньше 0.7, наибольшее значение для связи  $\Delta S = f(\Delta P)$ , равное 0.646. Для двух вариантов множественной корреляции  $\Delta S = f(\Delta X_1, \Delta X_2)$  максимальное значение, равное 0.776, было получено

для  $\Delta S = f(\Delta R, \Delta P)$ , другое значение  $K > 0.7$  было для  $\Delta S = f(\Delta R, \Delta G)$ . Наибольшее значение коэффициента множественной корреляции ( $K = 0.8$ ) было получено для наиболее полной связи  $\Delta S = f(\Delta G, \Delta P, \Delta R, \Delta T)$ .

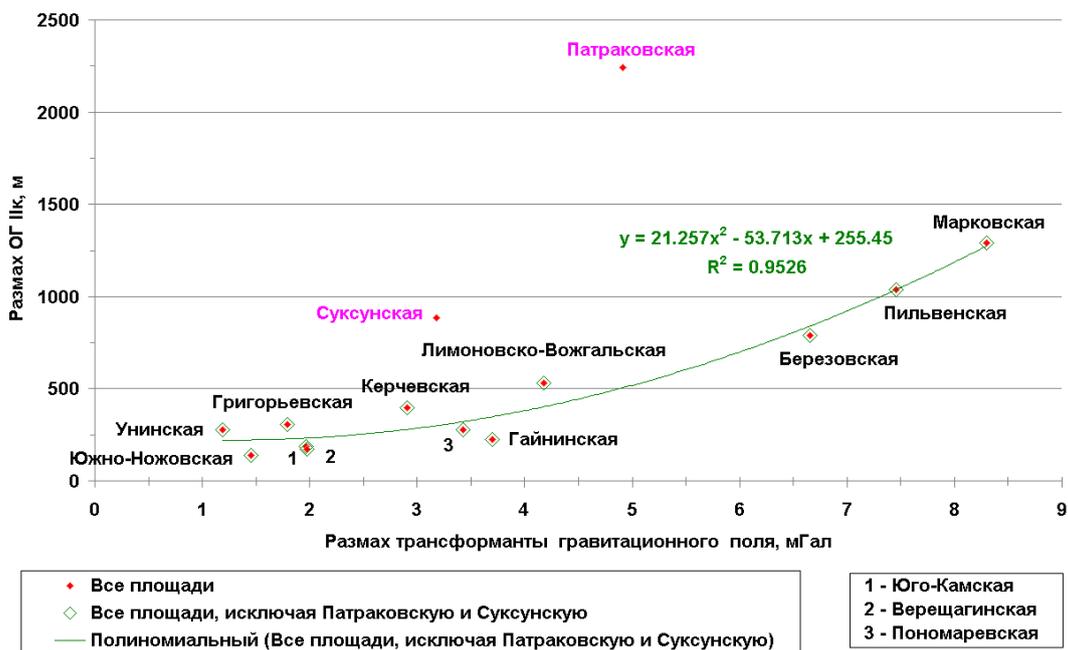


Рис. 1. Взаимосвязь размахов трансформант гравитационных полей и размахов ОГ II<sup>к</sup>

Получаемые линейные зависимости не всегда могут хорошо описать имеющиеся данные. На рис.1 приведена квадратичная зависимость с высоким значением коэффициента детерминации для квадратичной связи  $\Delta S = f(\Delta P)$ , полученной после удаления двух точек, отображающих данные по Патраковской площади [3] (складчато-надвиговая зона, единственный случай для рассматриваемой совокупности площадей) и Суксунской площади в Предуральском прогибе (уступ по кровле артинских карбонатных отложений).

При решении задачи II также вычислялись коэффициенты парной и множественной корреляции, но не для размахов ( $\Delta R, \Delta M, \Delta G, \Delta P$ ), а непосредственно для геофизических величин ( $R, M, G, P$ ). Полученные данные были сведены в таблицу. Наиболее интересные взаимосвязи имеют следующие значения  $K$ .

а) для  $S = f(R, M)$  только для Керчевской площади [5], расположенной на севере платформенной части Пермского края, сила связи оценена как высокая, в то время как для трех площадей связь была слабой ( $K < 0.3$ ). Для квадратичной зависимости  $S = f(R, M, R^2, M^2)$  высокие значения  $K$  были получены только для двух площадей (Юго-Камская [1] и Керчевская). Таким образом, с использованием только рельефа земной поверхности и магнитного поля практически невозможно спрогнозировать поведение ОГ II<sup>к</sup>.

б) для  $S = f(G, P, G^2, P^2)$ , т.е. при попытке описания сейсмических данных через квадратичную зависимость от гравитационного поля и его трансформанты коэффициенты множественной корреляции для четырех площадей (Патраковской, Григорьевской [2], Керчевской и Юго-Камской) были высокими, а еще для пяти площадей заметными ( $0.5 \leq K \leq 0.7$ ). Причем для Патраковской площади  $K = 0.845$ , что объясняется наличием надвигов, хорошо проявляющиеся как в исходном гравитационном поле, так и в его трансформанте, отображающей ОГ II<sup>к</sup>.

в) для общего вида зависимости  $S = f(M, R, G, P, M^2, R^2, G^2, P^2)$  для восьми площадей получаются высокие значения коэффициентов корреляции, а для остальных – заметные. Для четырех площадей (тех же, что и в предыдущем случае) коэффициенты корреляции были более 0.8, а коэффициенты детерминации превосходили 0.64. Таким образом, для этих четырех площадей модель сейсмической структурной поверхности на две трети описывается выбранным набором геофизических данных.

Можно отметить следующую закономерность расположения площадей, для которых коэффициенты корреляции больше и меньше 0.7. Площади с  $K < 0.7$  лежат преимущественно в западной и северо-западной части Пермского края и в Кировской области, где глубины залегания кристаллического фундамента в среднем не превышают 3 км. Конечно, имеются исключения из такой тенденции: для Лимновско-Вожгальской площади (Кировская область)  $K=0.707$ , а для Березовской площади (Пермский край, Юрюзано-Сылвинская депрессия)  $K=0.626$ , хотя глубина залегания фундамента более 4 км.

При решении задачи III вычислялись коэффициенты парной и множественной корреляции с целью выяснить насколько поведение трансформанты гравитационного поля, отображающей ОГ П<sup>К</sup> можно объяснить рельефом, магнитным полем и исходным гравитационным полем. Высокие значения коэффициентов множественной корреляции из всего набора 15 площадей были получены для трех площадей при зависимости  $P = f(M, R, M^2, R^2)$ , для пяти площадей при  $P = f(G, G^2)$  и для 10 площадей при рассмотрении полного набора данных  $P = f(G, M, R, G^2, M^2, R^2)$ . В последнем случае для двух площадей были получены  $K > 0.9$ : Юго-Камская и Марковская (восточная часть Юрюзано-Сылвинской депрессии)

Таким образом, рассчитаны коэффициенты корреляции и проанализированы различные наборы геофизических зависимостей, описывающих статистические взаимосвязи как с сейсмическими структурными поверхностями, так и с трансформанты гравитационного поля. Полученные результаты имеют значение как для оценки информативности отдельных геофизических методов, так и в дальнейшем при выполнении детального анализа взаимосвязи характеристик структур и приподнятых участков, выделяемых сейсморазведкой (по кровле визейских терригенных отложений) с параметрами гравитационных аномалий, отображающих антиклинальные структуры в этом интервале глубин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геник И.В. Геофизические исследования Юго-Камской площади // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 129-131.
2. Геник И.В. Зонально-региональные геофизические исследования Григорьевской площади // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 111-113.
3. Геник И.В. Комплексные геолого-геофизические исследования Патраковской площади (север Пермского края) на стадии зонально-региональных работ на нефть и газ // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2013. – № 4. – С. 57-86. – [http://www.ogbus.ru/authors/Genik/Genik\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Genik/Genik_2.pdf).
4. Геник И.В. Прогнозирование результатов региональных гравиметрических работ на нефть и газ с использованием статистических методов // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 38-43.
5. Геник И.В. Региональные геофизические исследования Керчевской площади (северная часть Пермского края) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 42-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2015. – С. 41-43.

А.С. ДОЛГАЛЬ

*Горный институт УрО РАН*

**ЭЛЕМЕНТЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА  
В МОНТАЖНОМ МЕТОДЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ  
ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ**

В настоящее время методы искусственного интеллекта (ИИ) являются одним из приоритетных направлений развития науки в России и в мире. В английском языке термин *artificial intelligence*, в русском переводе отвечающий ИИ, означает лишь искусственное умение рассуждать разумно, а не «интеллект» (*intellect*) [4]. Круг задач, решаемых на основе методов ИИ, включает в себя: совершенствование архитектуры компьютеров и сетей; разработку баз данных; компьютерное зрение; модели принятия решений; модели представления знаний; робототехнику; обработку речи и др. Единого определения для ИИ не существует, согласно [7] «интеллектуальной называется система, способная целенаправленно, в зависимости от состояния информационных входов, изменять не только параметры функционирования, но и сам способ своего поведения». В своих исследованиях автор данной статьи опирался именно на это определение.

Академик В.Н. Страхов еще в конце XX века писал, что в будущем необходимо «создание основ специализированного искусственного интеллекта как базовой позиции в становлении автоматической компьютерной интерпретации» [8]. Следует отметить, что геофизика является хорошо структурированной предметной областью, в которой уже существуют апробированные надежные методы и некоторые из задач, тесно связанных с ИИ, в ней уже успешно решаются. В качестве примера можно привести активно используемые на практике алгоритмы классификации многомерных данных [6] и распознавания образов [5].

Основной теоретической предпосылкой для решения обратных задач гравиразведки (ОЗГ) с использованием ИИ является существование множества равновероятных (в общем случае) допустимых решений. Все они отвечают априорным представлениям о геометрических параметрах и эффективной плотности источников, а также обеспечивают требуемое значение невязки  $\epsilon \leq \epsilon_0$  наблюдаемого и модельного полей. Это полностью согласуется с представлениями Э. Ханта о существовании счетного множества состояний  $S$  и множества операторов  $O$ , используемыми в теории ИИ [9]. Решение задачи рассматривается как передвижение в пространстве состояний для достижения желаемого целевого состояния:

$$S_1 \xrightarrow{O^1} S_2 \xrightarrow{O^2} S_3 \xrightarrow{O^3} \dots \xrightarrow{O^n} S_n$$

где  $S_1$  – некоторое состояние из множества начальных состояний,  $S_n$  – некоторое состояние из множества целевых состояний.

В простейшей постановке ОЗГ для изолированного тела  $\Omega^T$  известной плотности  $\sigma^T > 0$ , монтажный принцип решения обратной задачи состоит в том, чтобы, отправляясь от заданной связанной конфигурации  $\Omega^0$ , выстроить конечную последовательность конфигураций  $\Omega^0, \Omega^1, \dots, \Omega_n, \dots$ , имеющую пределом некоторую область  $\Omega^*$ , гравитационное поле которой при подобранной плотности  $\sigma^*$  согласуется с наблюдаемыми значениями силы тяжести. Ассоциированная с  $\{\Omega_n\}_n$  последовательность  $\{\sigma_n\}_n$  "оптимальных" значений плотностей определяется из условия минимума среднеквадратической невязки подбора  $\epsilon$  для каждого из соответствующих приближений к решению обратной задачи.

Условиями перехода от конфигурации  $\Omega_{n-1}$  к конфигурации  $\Omega_n$  являются: оптимальность, т.е. обеспечение конфигурацией  $\Omega_n$  минимальной величины  $\varepsilon$  и контроль соблюдения условия наследования конфигурацией  $\Omega_n$  основных черт конфигурации  $\Omega_{n-1}$  (при рассмотрении множества пробных конфигураций на каждом шаге процесса). Одной из реализаций монтажного принципа является итерационный метод регулируемой направленной кристаллизации (РНК), при котором любое очередное приближение  $\Omega_n$  может быть образовано путем внесения в ядро конфигурации какого-то одного нового элемента [1]. Критерием достижения решения ОЗГ является условие  $\sigma_n^T \approx \sigma^T$ .

В процессе построения последовательности решений  $\Omega^0, \Omega^1, \dots, \Omega^*$  для обеспечения связности, односвязности, гладкости границ аномалиеобразующих тел используются процедуры, базирующиеся на формальной логике, чем уже определяется взаимосвязь РНК и методов ИИ. В отличие от традиционного подхода можно также попытаться включить в компьютерную технологию решения ОЗГ обратные связи: в зависимости от получаемых результатов изменять структуру алгоритма и входные параметры с целью получения наиболее достоверной модели источников поля (рис. 1).

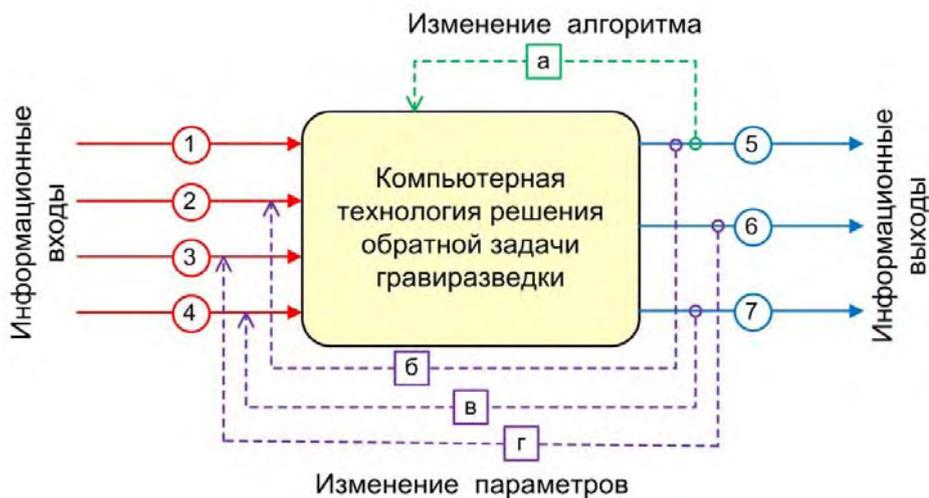


Рис. 1. Интеллектуальная система решения обратной задачи гравиразведки монтажным методом: исходные данные: 1 – значения наблюдаемого гравитационного поля; априорная информация о параметрах возмущающих объектах: 2 – геометрических (форма, размеры, глубина залегания и т.п.), 3 – физических (эффективная плотность); 4 – управляющие параметры алгоритма (невязка, размер элемента замощения и т.п.); 5 – результативные конфигурации  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$ ; динамические характеристики, отражающиеся в протоколе работы программы: 6 – плотности  $\sigma = \sigma(n)$ , 7 – невязки  $\varepsilon = \varepsilon(n)$ ; а–г – обратные связи системы.

Ниже рассмотрим некоторые виды этих обратных связей, позволяющих осуществлять "интеллектуальную корректировку" результативных геоплотностных моделей. Наиболее простой пример: выбор размеров элемента замощения (ребра  $L$  куба в 3D постановке ОЗГ), обеспечивающего требуемую величину  $\varepsilon$  невязки наблюдаемого и модельного полей, путем дихотомии  $L^k = L^{k-1}/2$  в серии  $k$  решений ОЗГ (рис. 1в). Экспериментально установлено, что при заниженной эффективной плотности аномалиеобразующего тела  $\sigma < \sigma^T$  номер итерации  $m$  для минимума функции  $\varepsilon = \varepsilon(m)$ , отвечающий значению  $\sigma(m)$ , приближенно характеризует значение  $\sigma^T \approx \sigma(m)$  [2]. Таким образом, по информационному выходу – протоколу решения ОЗГ, можно уточнить эффективную плотность тела или

набора присутствующих в разрезе тел (рис. 1г). Априорная информация о геометрических параметрах подбираемых объектов может быть разделена на два типа: 1) непосредственно используемая в процессе РНК; 2) контрольная, определяющаяся только по сформированной интерпретационной модели. Например две типичные для практики ситуации: имеются достаточно четкие представления о максимальной вертикальной мощности тел при достаточно размытых представлениях о глубинах их залегания (или наоборот). Четкие представления (тип 1 информации) используем при подборе модели, прочие (тип 2 информации) - для контроля интерпретационных построений. В случае, если резульативная модель  $\Omega^*$  не согласуется с контрольными требованиями, автоматически корректируются ограничения типа 1 (рис. 1б).

Гладкость границ аномалиеобразующих тел является важнейшим параметром интерпретационной модели. Рассмотрим одиночное изолированное возмущающее тело с плотностью  $\sigma^1 = 0.3$  г/см<sup>3</sup>, максимальная амплитуда гравитационной аномалии для которого составляет ~3 мГал. В качестве начального приближения при подборе модельных конфигураций использовался единственный элемент замощения с координатами  $x_0 = 3$  км,  $y_0 = 1$  км. Первые пять итераций РНК проводились без учета каких-либо ограничений “геометрического характера”, т.е. каждый новый элемент лишь обеспечивал минимум невязки  $\varepsilon$ . Далее корректировка гладкости границы тела достигалась за счет использования следующих изменений самого алгоритма решения ОЗГ (рис 1.а): 1) начиная с 6-й итерации требовалось, чтобы в оболочке присоединяемого элемента замощения находилось не менее 3-х элементов, принадлежащих ядру предыдущей конфигурации; 2) требование, указанное в пункте 1, дополнялось следующим условием: при  $\sigma_j / \sigma^1 \leq 1.2$ , где  $j$  - номер итерации, в оболочке присоединяемого элемента замощения должно быть не менее 4-х элементов, принадлежащих ядру предыдущей конфигурации; 3) требования, аналогичны пункту 2, однако пороговое значение для текущей плотности повышено  $\sigma_j / \sigma^1 \leq 1.5$ . Таким образом, были получены три решения обратной задачи, отвечающие, условно, низкой (рис 2а), средней (рис. 2б) и высокой (рис. 2в) степени гладкости границы аномалиеобразующего тела  $\Omega^*$ .

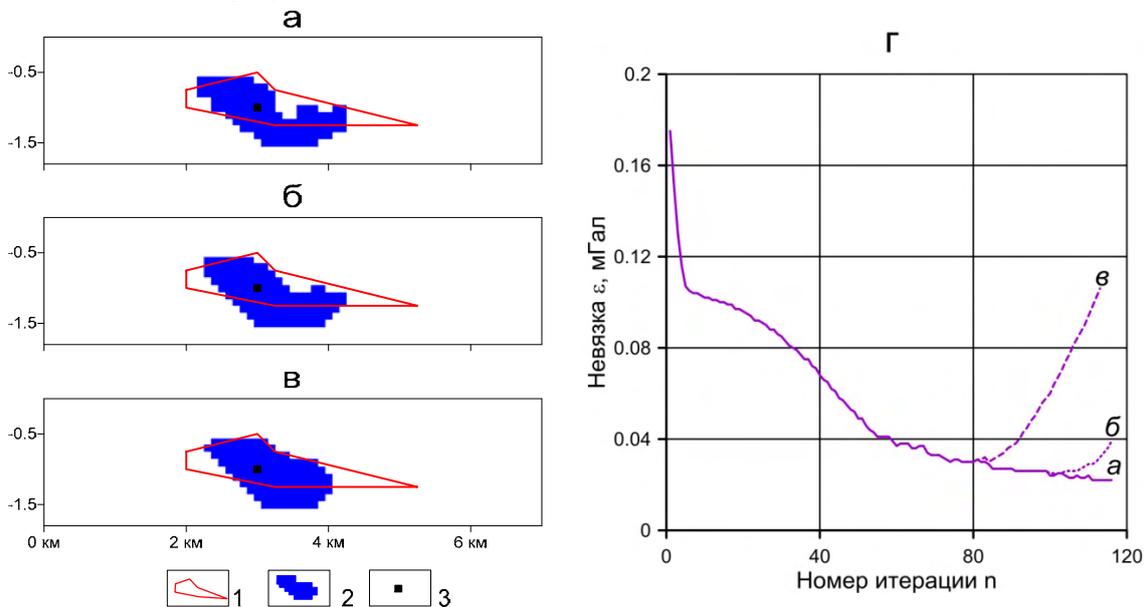


Рис. 2. Результаты решения обратной задачи гравиразведки методом РНК с низкой (а), средней (б) и высокой степенью сглаживания границы возмущающего тела и соответствующие графики изменения невязки (г): 1 – истинное тело; 2 – выбранное тело; 3 – центр кристаллизации.

Соответствующие значения невязок наблюдаемого и модельного полей в евклидовой метрике составили 0.022 мГал, 0.039 мГал, 0.109 мГал. Как очевидно, увеличение невязки является своего рода "платой" за гладкость решения, причем различия в ходе итерационного процесса начинают проявляться после выполнения основных этапов построения интерпретационных моделей (рис. 2г).

Применение ИИ в монтажном подходе не ограничивается приведенными выше примерами. На уровне собственно методов поиска единичного оптимального решения ОЗГ можно предложить еще целый ряд вариантов "обратных связей" между входной и выходной информацией. На более высоком уровне - анализе структуры множества  $Q$  допустимых решений и получении обобщенного решения обратной задачи [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] также используются модели представления знаний из области ИИ. Речь идет выборе "наилучшего" варианта из множества  $Q$  на основе критериев принятия решений в условиях неопределенности или риска, а также о применении теории нечетких множеств (в данном случае - в виде оценочных функций, представляющих собой  $\alpha$ -сечения множества  $Q$ ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балк П.И. Трехмерные монтажные технологии интерпретации гравиметрических данных / П.И. Балк, А.С. Долгаль // Докл. Акад. наук. – 2009. – Т. 427, № 3. – С. 380-383.
2. Балк П.И. Локализация геологических объектов по данным гравиразведки при неполной информации о плотности горных пород / П.И. Балк, А.С. Долгаль, Л.А. Христенко // Докл. Акад. наук. – 2012. – Т. 442, № 5. – С. 686-690.
3. Балк П.И. Обобщенные решения обратной задачи и новые технологии количественной интерпретации гравитационных аномалий / П.И. Балк, А.С. Долгаль // Физика Земли. – 2000. – № 2. – С. 189-204.
4. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем: учеб. пособие / Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.: ил.
5. Калинин Д.Ф. Информационно-статистический прогноз полезных ископаемых / ФГУНПП «Геологоразведка». – СПб, 2011. – 164 с.
6. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации: учеб. пособие / А.А. Никитин, А.В. Петров. – М.: Центр информ. Технологий в природопользовании, 2008. – 112 с.: ил.
7. Смолин А.В. Введение в искусственный интеллект: конспект лекций. – 2-е изд., перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 259 с.: ил.
8. Страхов В.Н. Что делать?: (О развитии гравиметрии и магнитометрии в России в нач. XXI в.) / ОИФЗ РАН. – М., 1998. – 24 с.
9. Хант Э. Искусственный интеллект / пер. с англ. Д.А. Белова, Ю.И. Крюкова; под ред. В.Л. Стефанюка. – М: Мир, 1978. – 558 с.: ил.

А.В. МИЧУРИН

*Горный институт УрО РАН*

## КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ПОИСКАХ МЕДНО-ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Необходимость комплексирования геофизических методов определяется многозначностью интерпретации какого-либо одного вида работ. Применение комплексирования позволяет повысить глубинность и эффективность поисков. При этом выбор рационального комплекса геофизических методов, их сочетание и последовательность позволяют надежно решить поставленную задачу поиска медно-порфирирового оруденения. В процессе интерпретации для выделения и ранжирования участков, перспективных на обнаружение рудоносного интрузивного комплекса в качестве исходных геофизических признаков использовались цифровые данные гравиметрической съемки; комплексной аэрогеофизической съемки, электроразведки методом ВП [1, 2, 4].

Участок исследования составляет порядка 30 кв.км. и характеризуется резко-расчленённым рельефом с перепадом высот порядка 500 метров (Рис. 1). В пределах площади работ известно крупное медно-порфирировое месторождение. Промышленное оруденение распространено на площади 800×900 м и прослежено буровыми скважинами до глубин 400–700 м. Интрузивный массив, с которым пространственно и генетически связано Cu–Mo оруденение, отчетливо фиксируется в гравитационном поле отрицательной локальной аномалией с амплитудой до  $-2.0$  мГал. Его эффективная плотность относительно вмещающих пород оценивается величиной около  $-0.2$  г/см<sup>3</sup>. Основную ценность месторождения представляют вкрапленные сульфидные руды с высоким содержанием Cu и средним – Mo.

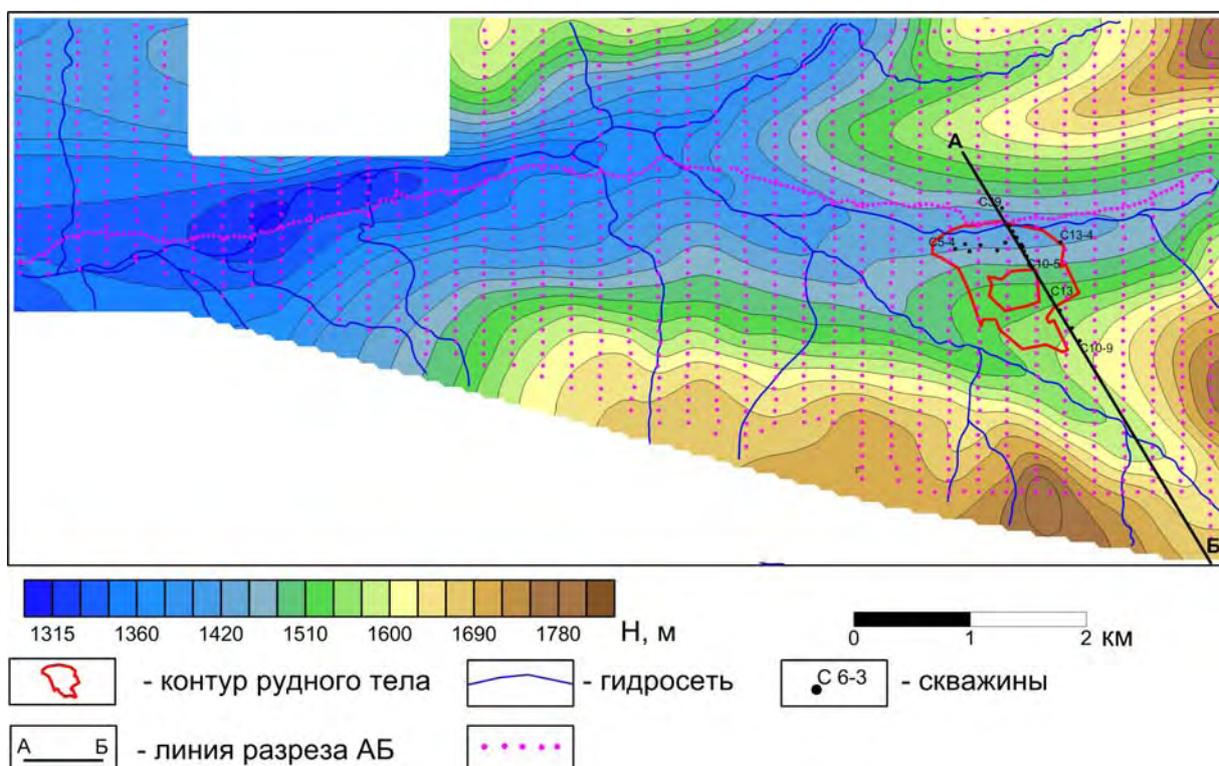


Рис. 1. Карта рельефа площади исследований

По результатам работ выявлено, что известный крупный интрузивный комплекс характеризуется пониженными значениями как гравитационного так и магнитного полей, что явилось основанием к отнесению данных параметров к основным геофизическим критериям поиска медно-порфирового оруденения на участке исследования.

В рамках исследований был разработан алгоритм трехмерной совместной интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки, основанный на построении и анализе комплексной функции локализации, которая в равной степени удовлетворяет обоим геофизическим методам. Рассчитывается комплексная функция локализации как среднее значение функции локализации в элементарном объеме для различных геофизических методов. Пространственное распределение комплексной функции локализации, позволило выявить общие закономерные особенности геометрических параметров аномалиеобразующих объектов и тем самым снизить проявление  $\epsilon$ -эквивалентности [3].

На рис. 2 представлены срезы комплексной функции локализации по линии разрезов АБ и ВГ, выполненные в крест известного интрузивного массива гранитоидов. На вертикальном срезе по линии АБ, отчетливо видно пространственное совпадение повышенных значений комплексной функции локализации с рудным телом на геологическом разрезе, в частности – верхней и нижней границы интрузии. В юго-восточной части профиля локализуется объект, с низкой вероятностью обнаружения рудных объектов в рассматриваемом объеме геологической среды. В разрезе в данном пространстве рудное тело так же отсутствует. На разрезе по линии ВГ, основная часть интрузии отмечается высокими значениями комплексной функции локализации. Фланговые части интрузивного комплекса не нашли своего отражения в построенной комплексной функции ввиду возможного недоучета регионального гравитационного и магнитного фона, высокой степени неоднородности исследуемой области геологической среды, а также из-за недостаточной детальности имеющихся геофизических данных.

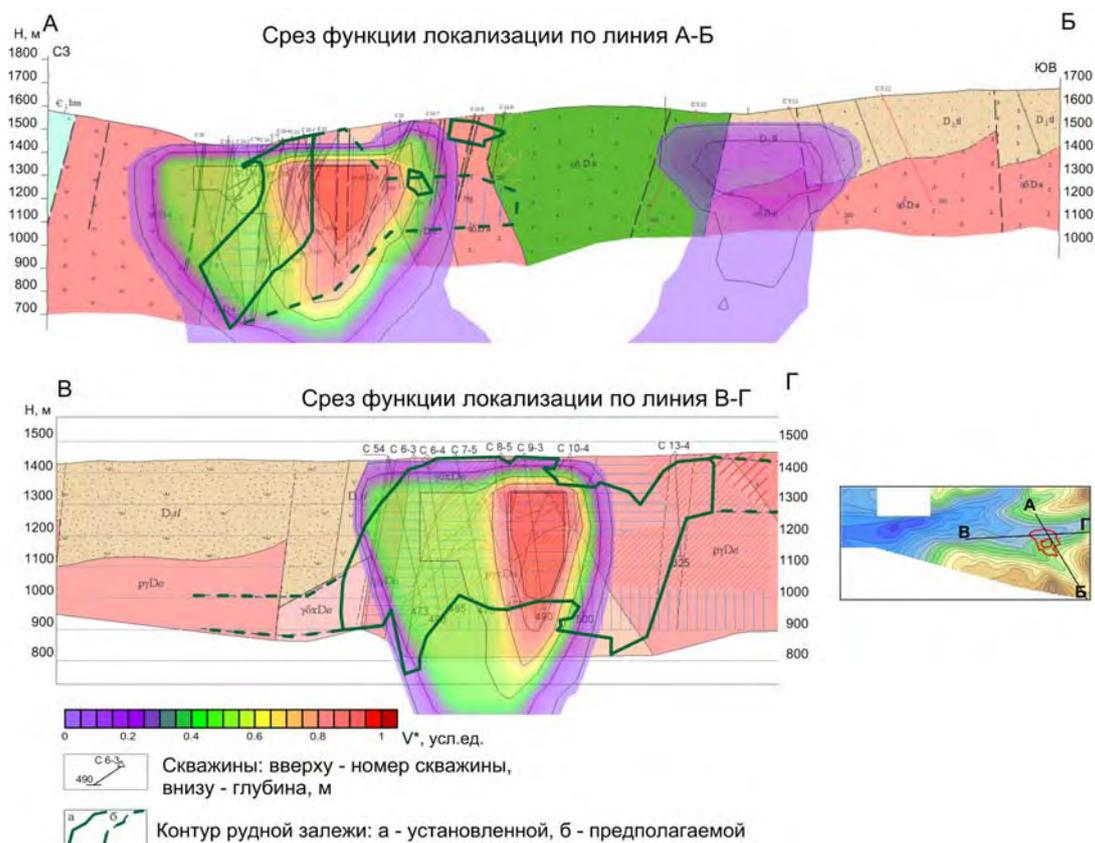


Рис. 2. Результат построения комплексной функции локализации

Кроме данных гравиразведки и магниторазведки на площадь исследования имелись цифровые материалы электроразведки методом ВП и результаты измерений интенсивности гамма-поля. При анализе поведения рассматриваемых геофизических полей непосредственно над выделенной рудной залежью были выявлены следующие закономерности:

- гравитационное и магнитное поле характеризуются пониженными значениями амплитуды;
- низкое кажущееся электрическое сопротивление;
- повышенные значения поляризуемости и мощности экспозиционной дозы гамма-излучения.

Наиболее перспективные участки в отношении поисков медно-порфирирового оруденения возможно выделить по комплексу геофизических аномалий, для которых характерно пространственное совпадение указанных выше признаков.

Был выполнен комплексный анализ рассматриваемых геофизических материалов и вычислен комплексный показатель. Исходя из предположения о независимости использованных признаков и равной их информативности, можно отождествлять аномалии повышенных значений комплексного показателя с рудоносными объектами.

По итогам работ доказана возможность успешного применения комплексной функции локализации при поисках Cu-Mo оруденения в сложных геолого-геофизических условиях. В пределах исследуемой площади существенно расширены перспективные флангов известного медно-порфирирового месторождения. Для постановки дальнейших геологоразведочных работ выделены новые рудоперспективные участки и проведено их ранжирование. В результате выполненных работ, получены дополнительные геофизические критерии прогнозирования медно-порфирирового оруденения.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 16-45-590426, 17-45-590302 p\_a, 18-35-00299 мол\_a).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вахромеев Г.С. Моделирование в разведочной геофизике / Г.С. Вахромеев, А.Ю. Давыденко. – М.: Недра, 1987. – 192 с.: ил.
2. Петрофизика: учебник для вузов / Г.С. Вахромеев, Л.Я. Ерофеев, В.С. Канайкин, Г.Г. Номоконова. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1997. – 462 с.: ил.
3. Мичурин А.В. Возможности гарантированного подхода при решении трехмерных обратных задач гравиразведки / А.В. Мичурин, А.В. Пугин, А.А. Симанов // Геоинформатика. – 2014. – № 1. – С. 42-50.
4. Прогнозирование не выходящего на поверхность оруденения при глубинном геологическом картировании и геологическом доизучении площадей: метод. пособие / [М.Л. Сахновский и др.]. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2003. – 270 с.: ил.

П.Н. НОВИКОВА  
*Горный институт УрО РАН*  
**ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ  
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО КОЛЛЕКТОРА**

Геомониторинг урбанизированных территорий на современном этапе обязательно должен включать дистанционные исследования, позволяющие выявлять различные техногенные объекты, которыми могут являться подземные коммуникации и сооружения, археологические ценности и др. Такие работы позволят безопасно эксплуатировать как само подземное пространство, так и здания, находящиеся на изучаемом участке, а также грамотно проектировать дальнейшие работы по освоению недр. Эффективными методами в данном направлении могут выступать инженерные геофизические исследования, позволяющие осуществлять неразрушающий контроль подземного пространства.

В декабре 2017 г. были проведены инициативные работы по трассированию безнапорного железобетонного коллектора прошлых лет, представляющего из себя 4 параллельных трубопровода, каждый с внутренним диаметром 1.2 метра. Глубина залегания коллектора изменяется от 3 до 8 метров, поперечные размеры составляют порядка 5 метров. Основанием работ послужило отсутствие смотровых колодцев на значительной протяженности трубопровода и устаревшая проектная документация, которая в приведенном масштабе не отражала действительной проекции коллектора на земную поверхность.

Стандартные методы поиска коммуникаций (трассоискатель и георадиолокация) оказались малоинформативными вследствие глинистого литологического состава вмещающих грунтов и существенной глубины залегания искомого объекта.

Для обнаружения стокового коллектора был применен метод инженерной магниторазведки, позволяющий выявлять контрастные по магнитным свойствам объекты на небольших территориях и залегающих на небольших глубинах (инструктивно до глубины 10 метров [3]). Комплект используемой аппаратуры состоял из двух оверхаузеровских магнитометров ММРОС (полевой магнитометр и магнитовариационная станция) и GPS-приемника для привязки полевых данных. Участок исследования заведомо находился на территории с различными источниками электромагнитных помех, такими как воздушные и подземные линии электропередач, автомобильная трасса и др. Поэтому полевые измерения велись в модифицированном виде: магнитовариационная станция устанавливалась в непосредственной близости к участку измерения с целью дальнейшей фильтрации «быстрых» помех [4, 5, 6].

Первым этапом были проведены площадные микромагнитные работы на участке 20×20 метров с расстоянием между профилями 2 метра и шагом по профилю 1 м с известным местоположением коллектора, рядом с выпускным сооружением. Измеренные магнитные вариации показали наличие техногенной помехи с максимальной амплитудой порядка 20-30 нТл, поэтому дальнейшая обработка данных велась по методике, учитывающей фактор интенсивных помех с применением частотного разложения нестационарных сигналов Empirical Mode Decomposition (EMD-разложение) [1, 2, 4, 5, 6]. Повторные наблюдения на ряде профилей показали хорошую сходимость графиков модуля полного вектора магнитной индукции  $T$ , что в данных условиях съемки является достаточным для контроля производимых измерений магнитного поля. После процедуры специальной обработки (фильтрация помех, снятие фона) были получены графики и карта аномального магнитного поля участка (рис. 1, А, Б). Стоковый коллектор уверен-

но выделяется по определенной форме магнитных аномалий – высококонтрастная положительная аномалия с двумя сопровождающими минимумами (рис. 1, А, Б). Однако, максимальные значения такой аномалии даже в пределах небольшого участка изменяются в широких пределах от 61 до 460 нТл. Такую ситуацию можно объяснить непостоянным суммарным вектором намагниченности железобетонных трубопроводов. Также на участке исследований по магнитному полю были обнаружены подземные кабельные сети, которые сильно отличаются по форме и амплитуде от магнитных аномалий, соответствующих коллектору. Учитывая, что глубина залегания коллектора на участке составляет порядка 7-8 метров, полученные признаки магнитного поля явились достаточными для продолжения геофизических исследований.

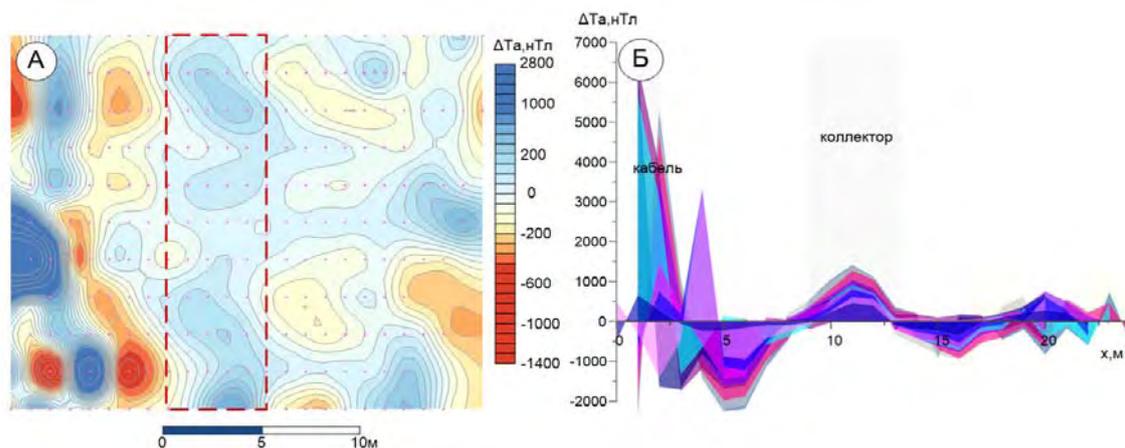


Рис. 1. Трассирование подземного коллектора по данным аномального магнитного поля:  
 А – площадная микромагнитная съемка с известным положением коллектора, красной пунктирной линией обозначено предполагаемое местоположение коллектора;  
 Б – совмещенное аномальное магнитное поле вдоль профилей площадной съемки

Дальнейшее обнаружение коллектора проводилось посредством профильных наблюдений с шагом по профилю 1 м. Расстояние между профилями диктовалось условиями возможности проведения геофизических работ. Всего было отработано 12 профилей общей протяженностью 530 метров. На каждом профиле стоковый коллектор также прослеживался магнитной аномалией с выраженной положительной частью с меняющейся максимальной амплитудой. Полевые измерения показали наличие сближенных сопутствующих подземных коммуникаций (воздушные кабели, другие подземные коммуникации и др.), поэтому для локализации коллектора необходимо было проведение качественной интерпретации, направленной на разделение локальных магнитных аномалий (рис. 2). Для прослеживания границ коллектора была выполнена полосовая фильтрация с применением процедур аналитического продолжения магнитного поля в верхнее полупространство на высоту, соответствующую предполагаемой глубине залегания коллектора, а также последующее вычисление высших горизонтальных производных. Ширина аномальной зоны, предположительно соответствующей искомому коллектору, изменяется от 5 м до 9 м, что косвенно может свидетельствовать о неперпендикулярном расположении коллектора относительно профиля на определенных участках измерения.

На нескольких профилях дополнительно было проведено вертикальное электрическое зондирование четырехэлектродной установкой АМНВ, по результатам которой на геоэлектрических разрезах выделялись зоны повышенного электрического сопротивления, соответствующие выделенным магнитным аномалиям от коллектора. Таким образом, комплексирование с электроразведочным методом показало надежность качественной интерпретации микромагнитной съемки.

В результате опытных работ можно сделать вывод, что по данным инженерной магниторазведки возможно уверенное трассирование сильномагнитных подземных коммуникаций до глубины 8 метров (рис. 2). Количественную интерпретацию таких данных с определением глубины залегания объекта проводить не рекомендуется из-за широкого интервала изменения амплитуды магнитных аномалий, соответствующих техногенному объекту. Для повышения достоверности получаемых результатов возможно комплексирование инженерной магниторазведки с другими геофизическими, например, электроразведкой, или георадиолокационными методами.

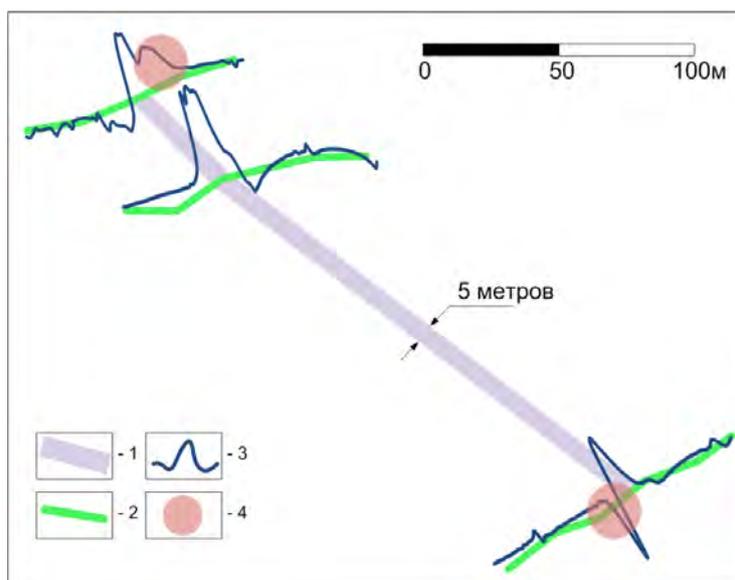


Рис. 2. Профильное обнаружение стокового коллектора по данным инженерной магниторазведки: 1 – проекция подземного коллектора на горизонтальную поверхность; 2 – магниторазведочные профили; 3 – графики аномального магнитного поля вдоль профиля, максимальная амплитуда 1200 нТл; 4 – магнитные аномалии, связанные с другими видами коммуникаций

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давыдов В.А. Очистка геофизических данных от шумов с использованием преобразования Гильберта-Хуанга / Давыдов В.А., Давыдов А.В. // Актуальные инновационные исследования: наука и практика. – 2010. – №1. – С. 1.
2. Долгаль А.С. Применение эмпирической модовой декомпозиции при обработке геофизических данных / Долгаль А.С., Христенко Л.А. // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 100-108.
3. Инструкция по магниторазведке: Утв. М-вом геологии СССР 23.03.79. – Л.: Недра, 1981. – 263 с.
4. Новикова П.Н. Исследование подземных техногенных объектов методом инженерной магниторазведки // Гординские чтения: материалы IV шк.-семинара / ИФЗ РАН. – М., 2017. – С. 138-141.
5. Новикова П.Н. Применение детальной магниторазведки в условиях интенсивных техногенных помех // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 45-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / Казан. фед. ун-т. – Казань, 2018. – С. 43-44.
6. Новикова П.Н. Обнаружение подземных коммуникаций в условиях техногенных помех по данным магнитного поля / Новикова П.Н., Ворошилов В.А. // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 4-9.

Г.В. ПРОСТОЛУПОВ  
Горный институт УрО РАН

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА POLUS2D ПРИ РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГРАВИМЕТРИИ

В предыдущих докладах описывались свойства определенных полюсов первого  $P_I^{++}$ ,  $P_I^-$ , второго  $P_{II}^{++}$ ,  $P_{II}^-$ , и третьего  $P_{III}^{++}$ ,  $P_{III}^-$  порядков, неопределенных первого  $P_I^+$ ,  $P_I^-$ , второго  $P_{II}^+$ ,  $P_{II}^-$  и третьего  $P_{III}^+$ ,  $P_{III}^-$  порядков относительно источников гравитационного поля [1].

Целью данной работы является отнесение вышеперечисленных полюсов к полезным, условно полезным и бесполезным при решении обратной задачи гравиметрии и последующего интерпретационного процесса.

**Определенные полюсы.** Полюсы  $P^{++}$  определенные положительные образуются в нижнем полупространстве при пересечении пары линейных продолжений положительных векторов. Полюсы  $P^-$  определенные отрицательные образуются в нижнем полупространстве при пересечении линейных продолжений отрицательных векторов в направлении, противоположном «стрелке» вектора. Векторы с компонентами по осям  $V_z$ ,  $V_x$ , образующие полюсы первого порядка  $P_I^{++}$ ,  $P_I^-$ , являются ортогональными к поверхности потенциала  $V$ . Векторы с компонентами по осям  $V_{zx}$ ,  $V_{zz}$ , образующие полюсы второго порядка  $P_{II}^{++}$ ,  $P_{II}^-$ , являются ортогональными к поверхности вертикальной производной потенциала  $V_z$ . Векторы с компонентами по осям  $V_{zxx}$ ,  $V_{zzz}$ , образующие полюсы третьего порядка  $P_{III}^{++}$ ,  $P_{III}^-$ , являются ортогональными к поверхности второй вертикальной производной потенциала  $V_{zz}$ .

Ранее полезность определенных полюсов всех трех порядков  $P_I$ ,  $P_{II}$ ,  $P_{III}$  не вызывала сомнения. Их эффективность была рассмотрена при решении обратных задач по локализации объектов типа шар, стержень, горизонтальная пластина, уголок, риф. Описан их взаимодополняющий эффект [2] при локализации источников.

Однако дальнейшие исследования более сложных модельных полей выявили недостатки некоторых из них, в частности, определенных полюсов первого порядка  $P_I$ , о чем будет сказано ниже.

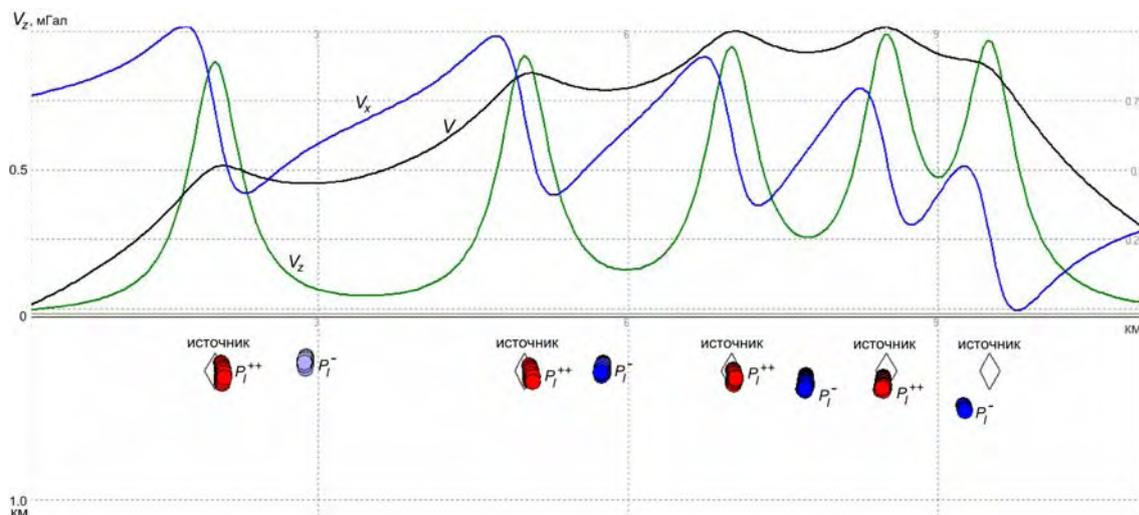


Рис. 1. Модель гравитационного влияния 5-ти источников и распределение полюсов первого порядка определенных положительных  $P_I^{++}$  и неопределенных отрицательных  $P_I^-$ .

**Неопределенные полюсы.** Полюсы  $P^+$  неопределенные положительные образуются в нижнем полупространстве при пересечении пары линейных продолжений отрицательных векторов в направлении, противоположном «стрелке» вектора. Полюсы  $P^-$  неопределенные отрицательные образуются в верхнем полупространстве при пересечении линейных продолжений положительных векторов в направлении, противоположном «стрелке» вектора.

Логика появления неопределенных полюсов  $P^+$ ,  $P^-$  заключается в закономерном ожидании локализации источников противоположного знака в пространстве между явными источниками, в окрестности которых и формируются полюсы определенные  $P^{++}$ ,  $P^{--}$ .

Характер распределения неопределенных полюсов первого порядка  $P_I$  рассмотрим на примере решения обратной задачи аномального поля 5-ти источников, расположенных на глубине 300 м и удаленных друг от друга по горизонтали на 3, 2, 1.5 и 1 км (рис.1). Эта модель хороша тем, что расстояние между источниками меняется, уложняя поле и позволяя увидеть изменение характера локализации полюсов по мере сближения источников.

Определенные полюсы  $P_I^{++}$  на модели локализовались в районе источников. Неопределенные  $P_I^-$  разместились приблизительно на той же глубине между источниками. В районе пятого источника (справа на рис.1) полюсы первого порядка  $P_I^{++}$  не локализовались.

Причину тяготения неопределенных полюсов первого порядка  $P_I^-$  по горизонтали к левому источнику можно объяснить характером графика функции потенциала  $V$ . Возрастающий график дает эффект смещения неопределенных полюсов  $P_I^-$  влево, убывающий – соответственно вправо. Заметно, что местоположение неопределенных полюсов по горизонтальной оси совпадает с локальным минимумом графика потенциала  $V$  (см. рис.1).

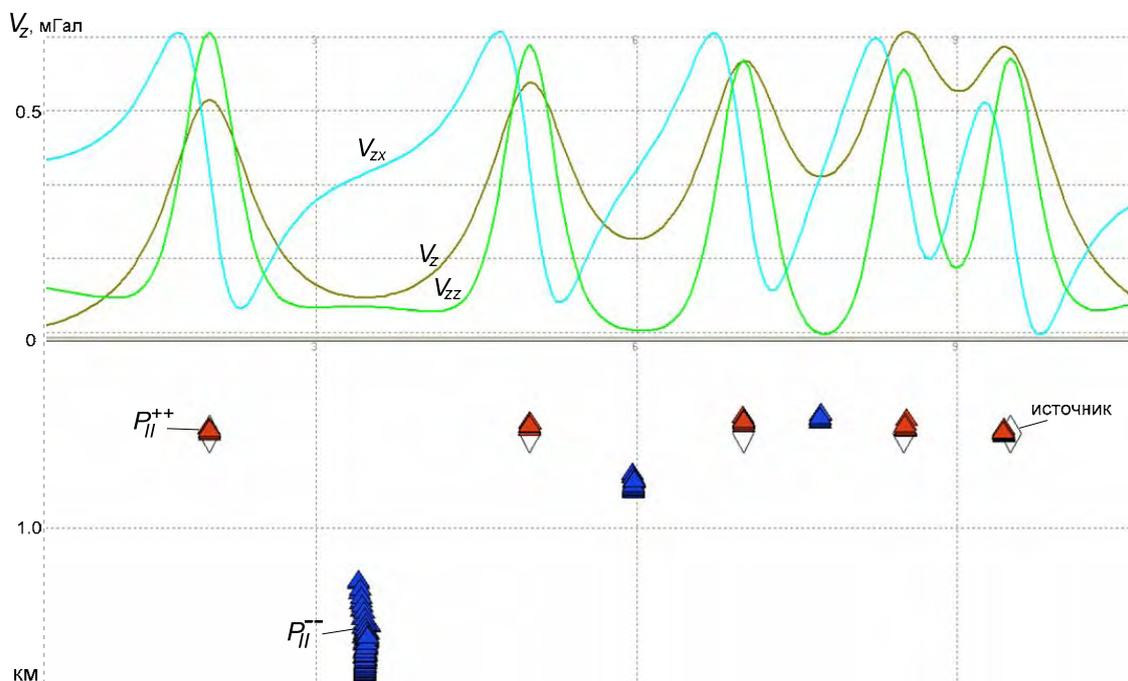


Рис. 2. Модель гравитационного влияния 5-ти источников и распределение полюсов третьего порядка основных положительных  $P_{II}^{++}$  и сопряженных отрицательных  $P_{II}^-$ .

Неопределенные полюсы второго и третьего порядка  $P_{II}^-$ ,  $P_{II}^+$ ,  $P_{III}^+$ ,  $P_{III}^-$  вследствие быстрой смены характера графиков высших производных  $V_{zz}$ ,  $V_{zx}$  и  $V_{zzz}$ ,  $V_{zxx}$

– резкого возрастания (убывания), сменяющегося пологими составляющими, чаще образуются вне области интерпретационного пространства (глубина превышает 1/3 размера съемки). По характеру расположения полюсов относительно источников их можно охарактеризовать скорее как случайный разброс. В случае с полюсами второго типа  $P_{II}^- P_{II}^+$ , их множества концентрируются больше между источниками с противоположной избыточной плотностью, но слабо поддаются систематизации. Характеру шума также соответствуют и нейтральные полюсы  $P^0$ .

**Полюсы основные и сопряженные.** Необходимо ввести еще одну градацию полюсов, разделив их на две большие группы: множества, попадающие в окрестности источника – полюсы основные, и множества противоположного знака и группирующиеся между основными – полюсы сопряженные. Основные – это полюсы, совпадающие с источниками аномального поля по знаку и локализации. Это подразделение касается всех трех порядков определенных полюсов  $P_I, P_{II}, P_{III}$ . Следует заметить, что рассмотренные выше неопределенные полюсы всегда являются сопряженными, определенные могут быть как основными, так и сопряженными.

Рассмотрим характер локализации сопряженных полюсов второго порядка  $P_{II}$  при решении обратной задачи аномального влияния 5-и источников (рис. 2). Источники расположены на глубине 500 м, на горизонтальном расстоянии друг от друга 3, 2, 1.5, и 1 км. Положительные полюсы  $P_{II}^{++}$ , локализующиеся в области источников, являются основными. Полюсы противоположного знака  $P_{II}^{--}$  локализируются в пространстве между основными и являются сопряженными.

Глубина сопряженных зависит от горизонтального расстояния между источниками. Чем больше это расстояние, тем глубже расположены сопряженные полюсы. И это закономерно, в связи с тем, что среда в горизонтальном направлении между, например, положительными источниками, является, по сути, протяженным отрицательным источником, и чем больше эта протяженность, тем глубже локализируются отрицательные сопряженные полюсы. При наличии единственного тела сопряженные полюсы не образуются.

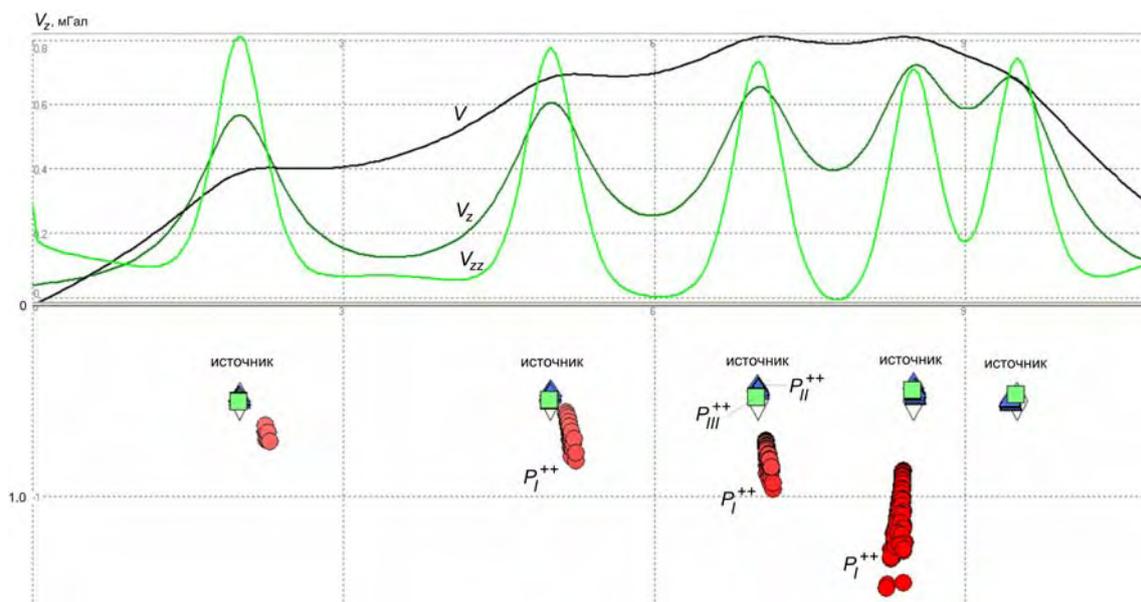


Рис. 3. Модель гравитационного влияния 5-ти источников и распределение полюсов первого порядка определенных положительных  $P_I^{++}$ , второго порядка определенных положительных  $P_{II}^{++}$  и третьего порядка определенных положительных  $P_{III}^{++}$ .

**Исследование моделей с константой  $\Delta g$ .** При развитии полярного метода на начальном этапе полюсы первого порядка  $P_I$  рассматривались как основные для локализации источников. Действительно, векторы, ортогональные поверхности потенциала  $V$ , их формирующие, прямо направлены в сторону изометричного источника. Однако было замечено, в сложных условиях формирования поля, например, при заглаблении источников модели или добавлении константы поля  $\Delta g$ , разброс полюсов становился очень значительным. Это свойство полюсов в случаях сложных полей рассматривалось как препятствие к применению и недостаток при интерпретации аномалий.

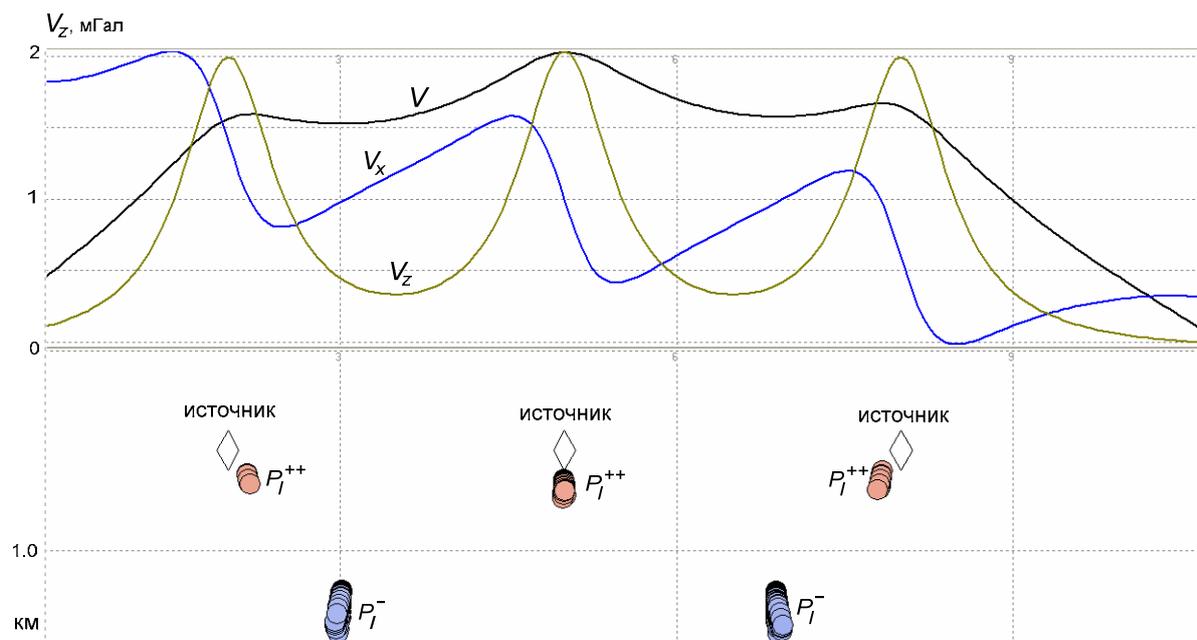


Рис. 4. Модель гравитационного влияния 3-х источников и распределение полюсов первого порядка определенных положительных  $P_I^{++}$  и неопределенных полюсов первого порядка неопределенных отрицательных при сдвиге  $\Delta g$  на  $+0.1$  мГал.

Рассмотрим рис. 3. На модели 5 источников находятся на глубине 500 м, что на 200 м глубже, чем на первой модели (см. рис. 1). Такое увеличение глубины источников вызвало значительно смещение полюсов первого порядка  $P_I^{++}$ .

При проведении модельных исследований полюсов второго  $P_{II}$  и третьего порядка  $P_{III}$ , была замечена не только их способность к локализации более глубоких источников (см. рис. 3), но устойчивость к изменению фоновой составляющей исходного поля  $\Delta g$ .

В связи с этим проведены следующие исследования. Взяты три источника на глубине 0.5 км, создающие аномальное поле амплитудой 2 мГал. К полю прибавлялась константа 0.1 и 0.5 мГал. Полюсы первого  $P_I^{++}$  порядка локализовались глубже источников примерно на 150 м в первом случае (рис. 4) и на 500 м во втором.

Полюсы же второго  $P_{II}^{++}$  (рис.5) и третьего порядка  $P_{III}^{++}$ , локализовались точно в районе источников. Попутно рассмотрено, как сопряженные полюсы реагируют на константу поля – наличие таковой для полюсов первого порядка вызывает еще больший уход с местоположения источников (см. рис.4). При отсутствии константы более заглабленные источники локализируются полюсами второго  $P_{II}$  и третьего  $P_{III}$  порядков также значительно лучше (см. рис. 3).

Таким образом, локализация полюсов  $P_{II}^-$ ,  $P_{II}^+$ ,  $P_{III}^+$ ,  $P_{III}^-$  является нечувствительной к фоновым колебаниям. Этот вывод является значимым, так как повышает возможности интерпретации наблюдаемого гравитационного поля этим методом Polus2d, что было проверено на примере локализации источников сложного гравитационного поля.

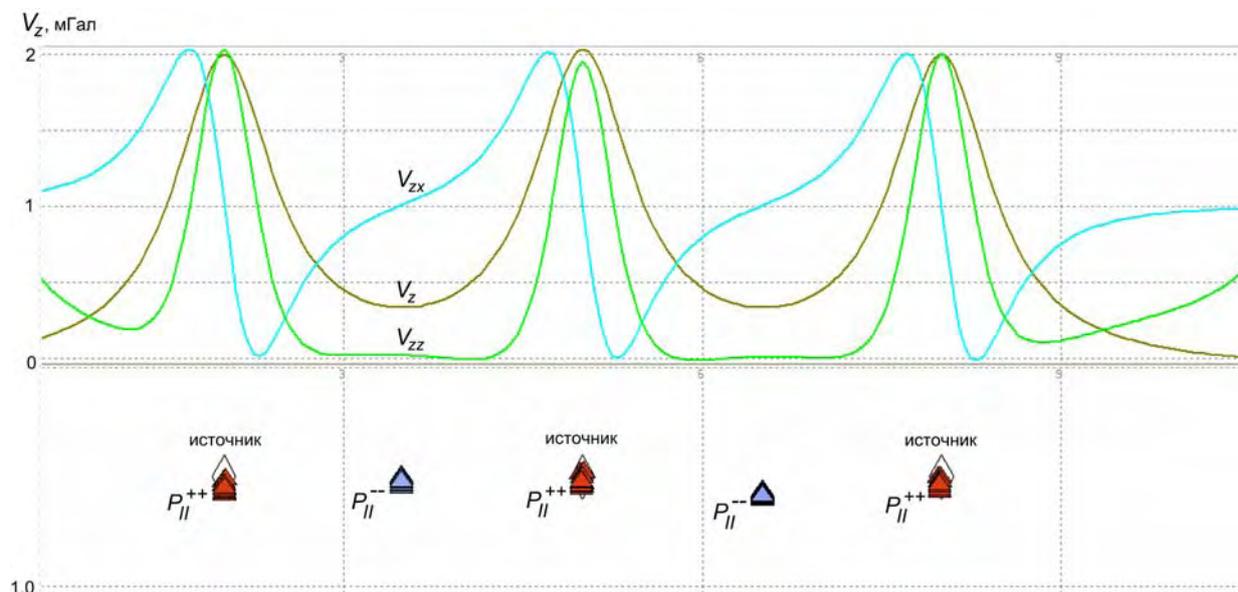


Рис. 5. Модель гравитационного влияния 3-х источников и распределение полюсов второго порядка определенных положительных  $P_{II}^{++}$  и сопряженных полюсов второго порядка определенных отрицательных  $P_{II}^{--}$  при сдвиге  $\Delta g$  на  $+0.1$  и  $+0.5$  мГал

По итогам вышеописанных исследований сделаны выводы о полезности полюсов. Для интерпретации наблюдаемого гравитационного поля могут быть рекомендованы определенные основные полюсы второго  $P_{II}^{++}$ ,  $P_{II}^{--}$  и третьего  $P_{III}^{++}$ ,  $P_{III}^-$  порядков. В качестве вспомогательных могут послужить полюсы: определенные основные первого порядка  $P_I^{++}$ ,  $P_I^-$ , неопределенные первого порядка  $P_I^+$ ,  $P_I^-$  и определенные сопряженные второго порядка  $P_{II}^{++}$ ,  $P_{II}^-$ .

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-45-590426.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Простолупов Г.В. Исследование свойств локализации полюсов относительно источников потенциального поля // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 43-й сес. Междунар. науч. семинара им. Д.Г. Успенского / Воронежский гос. ун-т [и др.]. – Воронеж, 2016. – С. 148-150.
2. Простолупов Г.В. Определение основных параметров источников гравитационного поля методом «Полюс» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей: материалы 44-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / ИФЗ РАН. – М., 2017. – С. 319-324.

А.А. СИМАНОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ  
КАРСТОВО-СУФФОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
В РАЙОНАХ ИНТЕНСИВНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР**

Проблема изучения горного массива, расположенного над естественными или техногенными полостями в геологическом пространстве существует уже давно. От сохранности массива горных пород над этими полостями часто зависит безопасность жизнедеятельности населения, сохранность самого рудника или природного объекта. Изучение территории с поверхности посредством геофизических наблюдений дает хорошие результаты как с точки зрения выявления ослабленных или потенциально опасных зон (при однократно проведенной съемке), так и в плане прогноза развития аномальных зон в пространстве с течением времени (в случае регулярных повторных наблюдений).

С целью получения информации о развитии негативных инженерно-геологических процессов в массиве, вызванных процессом эксплуатации месторождений калийных солей, разработана методика высокоточных мониторинговых гравиметрических наблюдений, включающая в себя определение динамической составляющей, т.е. изменение параметров поля во времени [1]. Данная методика позволяет выявить развитие процессов деформации породных масс и осуществить прогноз опасных и катастрофических ситуаций.

Мониторинговые наблюдения поля силы тяжести выявляют динамику процессов деформации породных масс и позволяют осуществить прогноз опасных и катастрофических ситуаций. По результатам повторных наблюдений рассчитывается динамическая аномалия силы тяжести, определяемая как разность между последующими и предыдущими значениями силы тяжести. Специфика данных аномалий заключается в их «чистоте» от влияния рельефа местности, плотностных неоднородностей в массиве. Поскольку все неизменные составляющие гравитационного поля в равной степени присутствуют в любой паре наблюдений, динамическая аномалия отражает только конкретный горнотехнический или быстротекущий геологический процесс, такой, как, например, образование и развитие карстовых полостей.

В 2006 году проникновение подземных вод в шахты Первого Березниковского рудника, расположенного под промышленной зоной и жилыми кварталами г. Березники, привело к его затоплению и последующим провалам земной поверхности. В районе провалов проведены детальные мониторинговые гравиметрические съемки с целью оконтуривания и изучения опасных зон, выяснения их природы, глубины распространения разуплотненных пород, а также в выявлении потенциально опасных участков на прилегающих территориях.

В 2016 -2017 гг. на одном из потенциально опасных участков в г. Березники были выполнены высокоточные гравиметрические мониторинговые работы. Здесь создано 102 мониторинговых гравиметрических пункта, но которых выполнены четыре серии гравиметрических наблюдений: в сентябре, октябре, декабре 2016 г. и сентябре 2017 г. Среднеквадратическая погрешность определения силы тяжести составила  $\pm 0.005$  мГал. В результате проведенных мониторинговых гравиметрических наблюдений в четырех циклах построены карты динамических аномалий за период сентябрь-октябрь 2016 г. (рис. 1 а), сентябрь-декабрь 2016 г. (рис. 1 б), сентябрь 2016 г. – сентябрь 2017 г. (рис. 1 в).

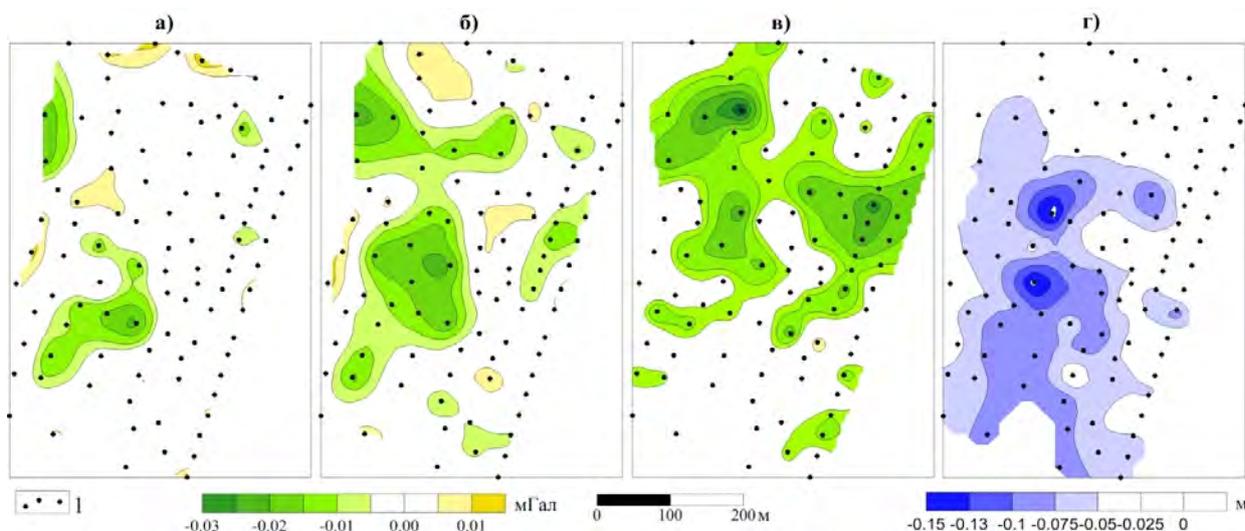


Рис. 1. Карты динамических аномалий:  
 а) сентябрь – октябрь 2016 г., б) сентябрь – декабрь 2016 г.,  
 в) сентябрь 2016 г. – октябрь 2017 г., г) оседания земной поверхности в период –  
 сентябрь 2016 г. – октябрь 2017 г.: 1 – пункты гравиметрических наблюдений

Анализируя период сентябрь – декабрь 2016 г. видно, что в центре площади отчетливо локализуется динамическая аномалия гравитационного поля амплитудой 0.022 мГал (более чем в три раза превышающая точность съемки), размерами 250×125 м. Нельзя не отметить увеличение амплитуды и размеров динамической аномалии за период с сентября по декабрь. Выделенная отрицательная аномалия может быть связана с процессом разуплотнения пород. Кроме того можно выделить локальный участок уменьшения значений поля на северо-западе границе изучаемого участка.

На рис. 2 представлены результаты решения обратной задачи гравиразведки в виде срезов функции локализации по профилям 1 и 2. На срезах функции локализации по профилям наиболее вероятное местоположение области разуплотнения отмечается в интервале глубин 15-50 метров. Восточная часть выделенного области разуплотнения отмечается наибольшей мощностью. Модельные расчеты показали, что уменьшение поля на 0.02 мГал при данной форме и размере выделенной динамической аномалии может быть обусловлено источником поля находящимся на глубине порядка 30 м, плотность которого изменилась на  $-0.10 \text{ г/см}^3$ . Размер зоны разуплотнения может достигать более 200 м в плане и мощности 20-40 м.

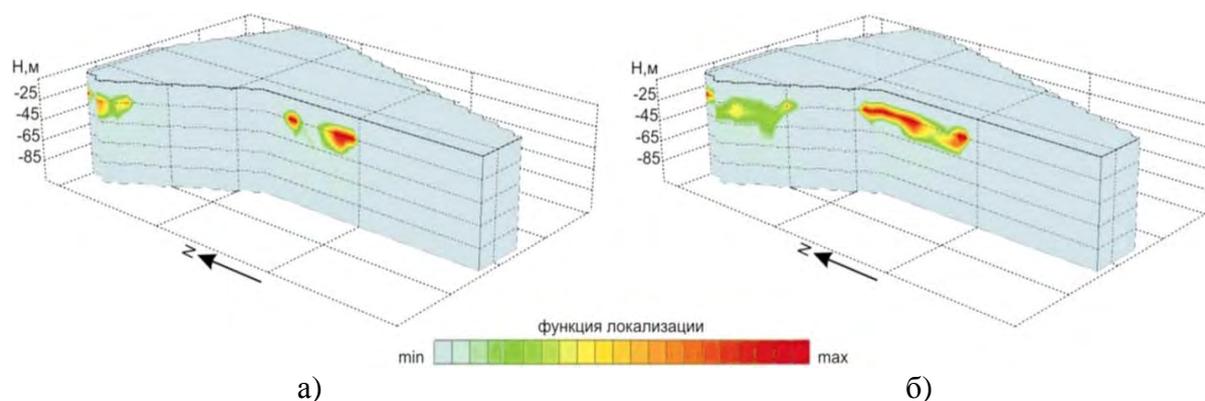


Рис. 2. Результаты решения обратной задачи гравиразведки для динамических аномалий:  
 а) сентябрь – октябрь 2016 г., б) сентябрь – декабрь 2016 г.

Сопоставление карт динамической аномалии за период сентябрь 2016 г. – сентябрь 2017 г. (рис. 1 в) совместно с картой оседаний земной поверхности за этот же период (рис. 1 г) показывает, что произошло «затухание» выделенной динамической отрицательной аномалии. Участки повышенных оседаний земной поверхности сопровождаются уменьшением величины динамической аномалии, что объясняется компенсацией значений аномалий уменьшением высот пунктов и увеличением плотности пород. Уменьшение значений поля произошло на периферии локальной отрицательной аномалии. Это может свидетельствовать о расширении зоны разуплотнения.

Гравиметрические исследования на Верхнекамском месторождении вносят определенный вклад в изучение картины плотностной неоднородности верхней части разреза, в обеспечение безопасности и жизнедеятельности. Изменения плотности пород в горном массиве, происходящие под влиянием горно-геологических условий, отчетливо фиксируются в гравитационном поле. Разрабатываемая технология проведения и интерпретации мониторинговых гравиметрических наблюдений позволяет перейти на новый качественный уровень получения информации о распределении и развитии во времени плотностных неоднородностей геологического разреза, что существенно повышает безопасность проведения горных работ. Гравиметрия должна применяться как опережающий метод, позволяющий на предварительном этапе уточнить геолого-тектоническую обстановку в пределах шахтных полей, выделить зоны повышенного риска.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 16-45-590426, 17-45-590302).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бычков С.Г. Гравиметрический мониторинг рудников Верхнекамского месторождения калийных солей / С.Г. Бычков, А.В. Мичурин, А.А. Симанов // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 10-16.

УДК 550.831

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.43

М.С. ЧАДАЕВ

*Горный институт УрО РАН*

### **ВЕРТИКАЛЬНОЕ ПРОЕКЦИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНОГО ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ В СИСТЕМЕ ВЕКТОР**

#### **Введение**

С теоретических позиций познание строения и тектонических процессов зон сочленения морской и сухопутной частей региона, океанической и континентальной земной коры, соотношения разноплановых мегаблоков Фенноскандинавского щита, Баренцевской, Печорской и Русской плит относят к числу приоритетных исследований геологической науки, рассматривая Евро-Арктический регион как уникальный энерго-сырьевой район.

При изучении глубинного строения верхней средней и нижней земной коры применяют комплекс сейсмических методов, сопровождаемый гравиметрией и магнитометрией. В процессе решения обратной задачи гравиметрии, а также магнитометрии способом подбора участвуют два основных компонента: модель или эскиз геологического строения и петрофизическое обеспечение. Отсюда возникает необратимая зави-

симось от принятой начальной модели. Причем существующая теоретическая неоднозначность решения осложняет оценку достоверности результата.

В данной работе рассмотрена гравиметрическая задача изучения нижней коры [2, 3], уделяя основное внимание анализу раздела Мохо. Новизна предложенного способа интерпретации заключается в непосредственном использовании глубинных гравиметрических разрезов.

Обработка гравиметрических данных в системе ВЕКТОР выполнена для двух соседних регионов, изображенных на рис. 1, А и 1, Б на соответствующих горизонтальных срезах диаграмм 3D в системе ВЕКТОР.

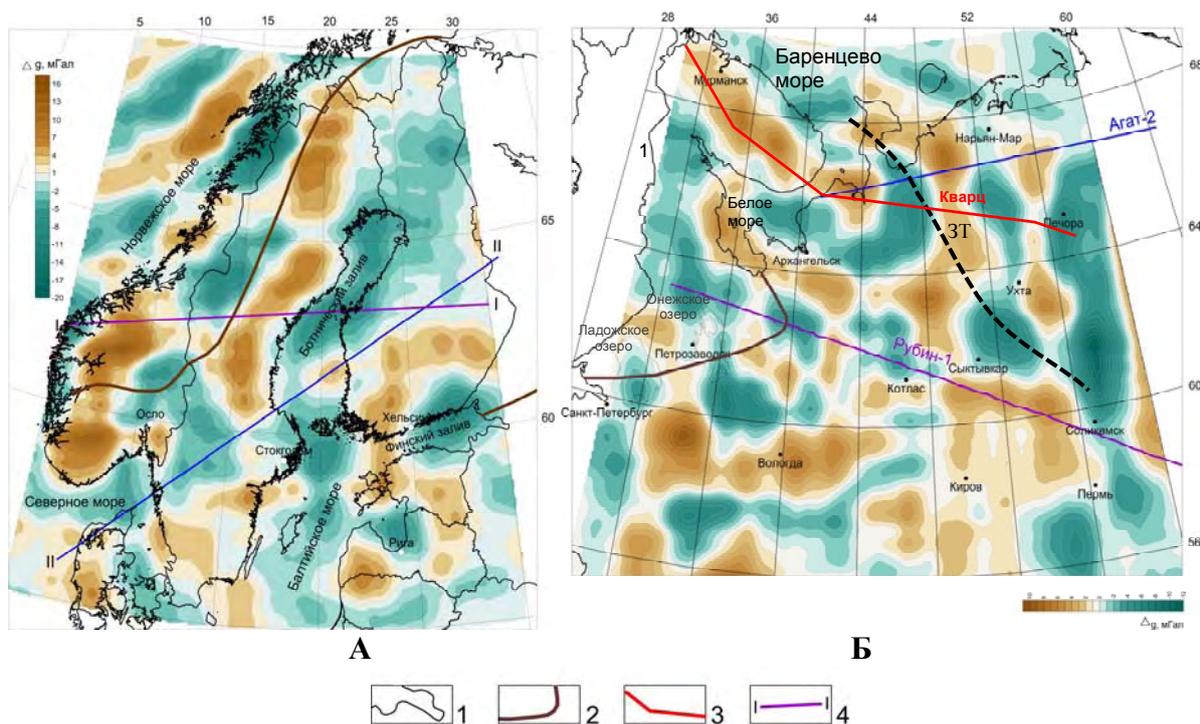


Рис. 1. Горизонтальный срез диаграммы 3D в системе ВЕКТОР на эффективной глубине раздела Мохо: А – Северо-западная часть, Б – Северо-восточная часть. ЗТ – Западно-Тиманский глубинный разлом [1]. Границы: 1 – административная, 2 – Фенноскандинавского щита [4]; 3 – профили ГСЗ КВАРЦ, АГАТ-2 и РУБИН-1; 4 – линии I-I и II-II гравиметрических разрезов в системе ВЕКТОР

### **Северо-Восточная часть**

Профили ГСЗ КВАРЦ, РУБИН-1 и АГАТ-2 по вертикали неоднородны по структуре поля: в верхней своей части (нижняя кора) содержат множественные аномалии с размерами от 20 и редко до 100 и более километров. В нижней части профиля (верхний слой литосферы) аномалии более интенсивные, превышают по протяженности 100 км.

Это позволяет, учитывая и скоростную характеристику, отнести верхнюю часть профиля к нижней коре и тем самым спрогнозировать границу Мохо между этими группами аномалий. При визуальном анализе можно отметить, что большеразмерные положительные аномалии в общих чертах характеризуют повышенное залегание границы Мохо, а отрицательные – пониженное. Положительные аномалии пространственно, как правило, совпадают с интервалами нескольких протяженных сейсмических границ в нижней земной коре.

На рис. 2 помещён гравиметрический разрез по профилю АГАТ-2. Наблюдаемые аномалии для Русской по сравнению с Печорской плитой имеют большие размеры и глубину залегания источников. Наиболее интенсивные положительные аномалии вдоль профиля РУБИН-1 находятся в интервале примерно от 43<sup>0</sup> до 56<sup>0</sup> в.д. (рис. 3). Эта область (Русская плита) пространственно соответствует Волго-Уральской антеклизе и характеризуется относительно приподнятым положением границы Мохо (интервал 43<sup>0</sup>–57<sup>0</sup>).

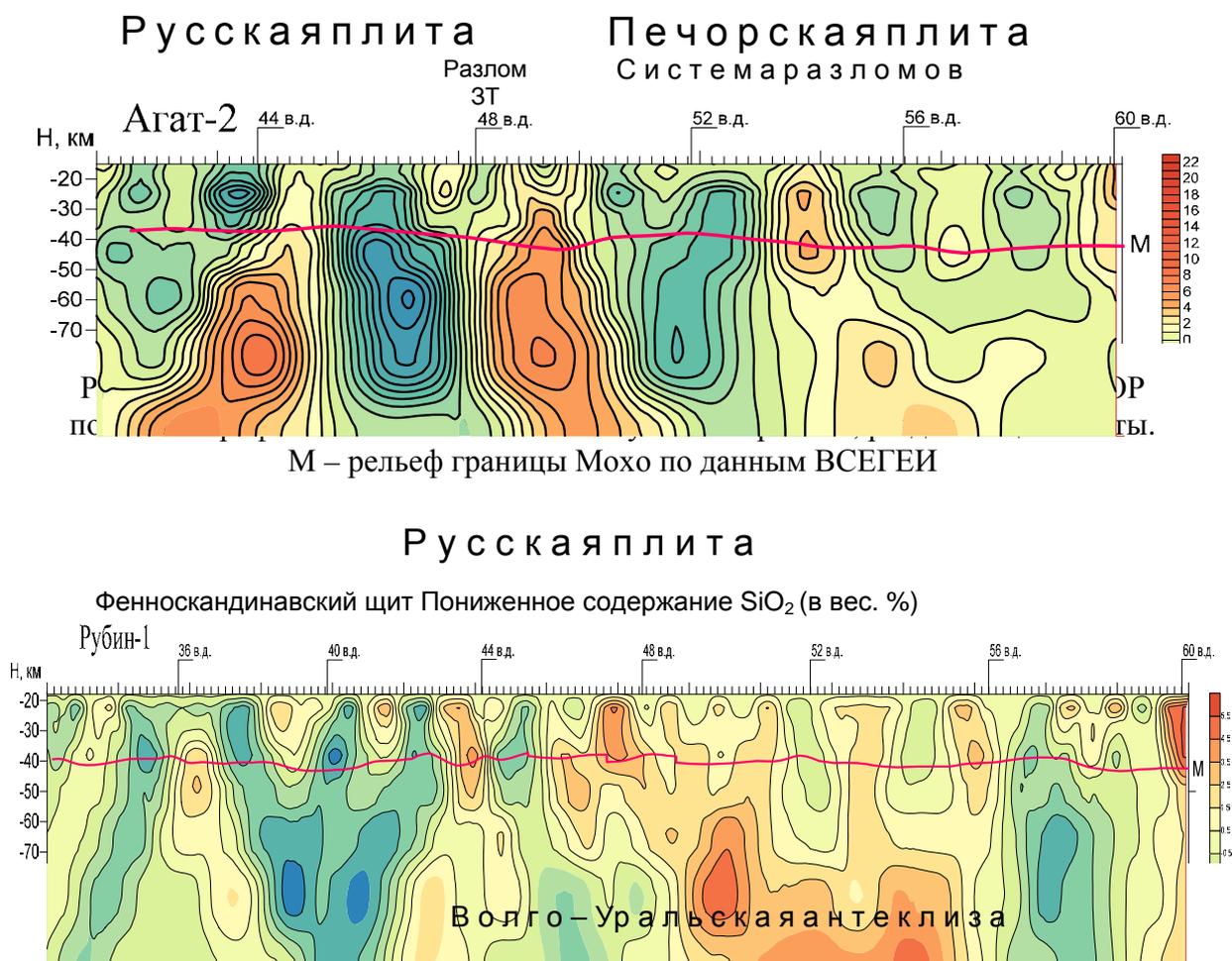


Рис. 3. Вертикальный срез гравитационной диаграммы 3D в системе ВЕКТОР по профилю ГСЗ РУБИН-1. М – рельеф границы Мохо по данным Егоркина А.В. и др. (1986)

По сравнению с ГСЗ КВАРЦ и АГАТ-2 профиль РУБИН-1 отличают существенно меньшие размеры глубинных источников аномалий, но более плотно занимающих пространство разреза.

Профиль РУБИН-1 пересекает [1] область пород аномально пониженного содержания кремнезема, пространственно соответствующую Коми-Пермяцкому своду (КПС). Эта область на профиле занимает интервал 43<sup>0</sup>–54<sup>0</sup> в.д. с экстремумом на широте 53<sup>0</sup> в. д. Пониженное содержание SiO<sub>2</sub> указывает на повышенную «основность» пород нижней коры, что и приводит к усилению интенсивности глубинных гравитационных аномалий.

Печорская плита – участок эпибайкальской платформы, имеющий значительной мощности осадочный чехол (нефтегазоносная провинция), характеризуется тремя доминирующими отрицательными глубинными аномалиями, указывающими на пониженное положение поверхности Мохо.

Наиболее интенсивные положительные аномалии находятся в интервале профиля РУБИН-1 примерно от 43<sup>0</sup> до 57<sup>0</sup> в.д. Эта область пространственно соответствует Волго-Уральской антеклизе (В.А. Дедеев, И.В. Запорожцева, 1985); характеризуется относительно приподнятым положением границы Мохо. Положительные глубинные аномалии на срезе, как правило, характеризуют приподнятые участки раздела Мохо, а отрицательные – впадинные.

### Северо-Западная часть

Продолжая условно на территорию Фенноскандинавского щита (рис. 1, А) профили АГАТ-2 и РУБИН-1, имеем две линии профилей I-I и II-II. По этим линиям на основе гравитационной диаграммы 3D в системе ВЕКТОР получены глубинные гравиметрические разрезы, изображенные соответственно на рис. 4 и 5.

Аномальный план разреза II-II структурно детализирован в одинаковой степени с разрезом I-I. Наблюдаемые положительные аномалии характеризуют приподнятые участки раздела Мохо, а отрицательные – пониженные. Вместе с тем структурный план профилей в изаномалах имеет существенные отличия, особенно на акватории, например, в области Ботнического залива (примерно, 17<sup>0</sup> – 22<sup>0</sup> в. д.) [4, 5].

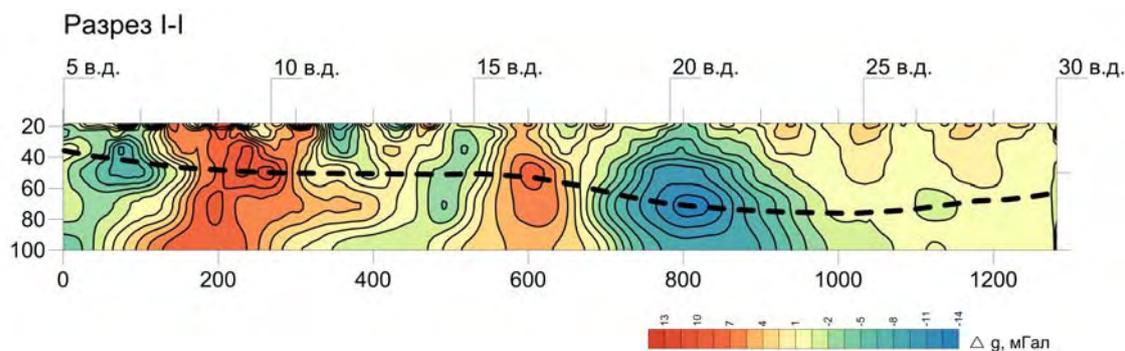


Рис. 4. Вертикальный разрез гравитационной диаграммы 3D в системе ВЕКТОР по линии I-I (Продолжение линии профиля ГСЗ РУБИН-1). Пунктирной линией показана прогнозная граница Мохо

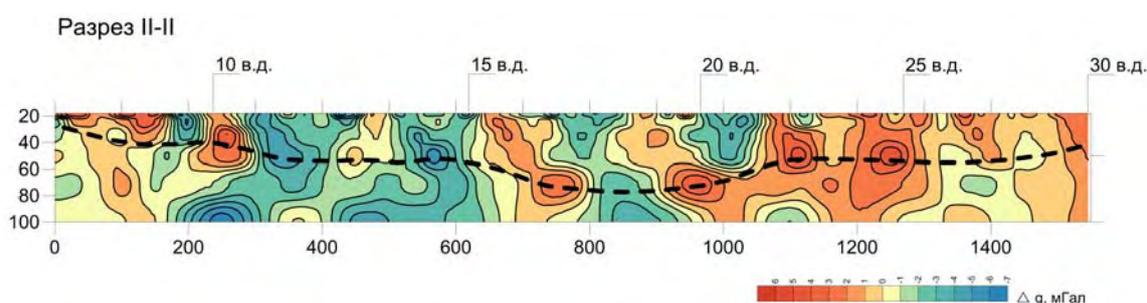


Рис. 5. Вертикальный разрез гравитационной диаграммы 3D по линии II-II (Продолжение профиля ГСЗ АГАТ-2). Пунктирной линией показана прогнозная граница Мохо

### Выводы

Наиболее востребованное решение обратной задачи гравиметрии способом подбора включает два основных компонента: модель или эскиз геологического строения и петрофизическое обеспечение. Отсюда возникает необратимая зависимость от принятой начальной параметрической модели. Вносимые неточности параметризации и су-

шествующая теоретическая неоднозначность решения осложняют оценку достоверности результата.

Новизна предложенного интерпретационного процесса заключается в непосредственном переходе от графиков к глубинным гравиметрическим разрезам в системе ВЕКТОР, которые могут быть дополнены геологическими или другими материалами на любой стадии интерпретации, что расширяет возможности комплексирования методов.

Обработка гравиметрических данных в системе ВЕКТОР позволила выполнить прогноз рельефа границы Мохо, относительного положения блоков пород по глубине и изменчивости их вещественного состава.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарева Т.А. Взаимосвязи теплового потока и естественных радионуклидов с глубинным строением Тимано-Североуральского региона / Пономарева Т.А., Шуктомова И.И. // Изв. Коми науч. центра. – 2012. – № 3 (11). – С. 68-75.
2. Чадаев М.С. Проецирование трехмерного изображения гравитационного поля в системе «ВЕКТОР» / Чадаев М.С., Простолупов Г.В. // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: статьи по материалам регион. науч.-практ. конф. / ПГНИУ. – Пермь, 2013. – С. 215-218.
3. Возможности геофизических методов при изучении неоднородностей земной коры / [Чадаев М.С., Костицын В.И., Ибламинов Р.Г., Гершанок В.А., Тарантин М.В., Простолупов Г.В., Христенко Л.А.]; под общ. ред. М.С. Чадаева, Р.Г. Ибламинова; Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2017. – 136 с.
4. Шаров Н.В. Литосфера Северной Европы по сейсмическим данным. – Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2017. – 168 с.: ил.
5. Grad M. The Moho depth map of the European Plate / Grad M., Tiira T. // Geophysical journal international. – 2009. – V. 176, № 1. – С. 279-292.

УДК 550.831

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.44

Г.П. ЩЕРБИНИНА

*Горный институт УрО РАН*

### **РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Территория исследований находится в области выклинивания лунежской соляной толщи и включает восточный край Восточно-Европейской платформы и западную часть Предуральского прогиба. На площади находится Белопашнинское поднятие по кровле соли, которое является одной из вершин регионального Камско-Вишерского соляного вала, сформированного вдоль восточной границы плат. формы. Поднятие имеет амплитуду 160 м, горизонтальные размеры 10×10 км. Кровля соляной толщи на вершине поднятия расположена на абсолютных отметках от 0 м до +21 м, т.е. соляные породы здесь залегают близко к земной поверхности – на глубине 130–150 м. Средний угол падения соляной поверхности на склонах составляет 2.0–2.5°.

Слои надсоляной толщи, представленные глинистыми, алевро-песчаными, карбонатными отложениями, повторяют морфологию соляной поверхности. Верхняя часть надсоляной толщи на вершине поднятия эродирована, имеет неполный разрез, что говорит о разрыхленном состоянии горных пород.

Морфология гравитационного поля (рис. 1) с почти равномерным падением значений на восток формируется многими причинами. Основной вклад вносит изменение по площади мощности соляной толщи и глубины залегания ее кровли и подошвы. В районе вершины соляного купола мощность соляной толщи достигает 480 м, у подножия восточного склона – 340–350 м, а в 6 км западнее вершины, на границе с платформой, толща соли выклинивается. Граница между надсоляной толщей, сложенной породами высокой плотности (2.35–2.47 г/см<sup>3</sup>), и нижележащей толщей соляных пород, характеризующихся низкой плотностью (1.98–2.17 г/см<sup>3</sup>), является гравиактивной. По результатам моделирования Белопашнинское соляное поднятие создает отрицательную аномалию силы тяжести амплитудой около -1.8 мГал.

Мощность соляной толщи кроме ее верхней поверхности определяется и формой ее подошвы. Подошва соляной толщи (ОГ «С») на данной площади изучена сейсморазведкой, проводившейся в 2001 и 2002 гг. с нефтепоисковой целью. Отражающий горизонт «С» фиксируется на западе в пределах отметок –260 м, в восточной части площади погружается до отметок –500 м (рис. 2).

Общее падение подошвы соляной толщи в восточном направлении осложняется наличием в ее морфологии приподнятых зон, расположенных южнее и севернее вершины соляного поднятия. Таким образом, под соляным куполом в подошве соляной толщи наблюдается отрицательная структура в виде «залива» заходящего с востока. Совпадение в плане поднятия в кровле соли и отрицательной структуры в подошве соли говорит о том, что такое соотношение структур не случайно. Так как кровля соляной толщи находится близко к земной поверхности, то является вторичной по отношению к форме ее подошвы. Наличие «залива» в подошве жесткого соляного ложа обеспечивало неоднородность напряженного состояния соляной толщи и создавало геодинамические условия благоприятные для максимального нагнетания сюда соли во время формирования приплатформенного вала. Таким образом, данное поднятие, можно рассматривать как элемент, сформированный за счет выдавливания соли на границе с жесткой платформой в обстановке горизонтального сжатия при воздействии давления Уральской системы.

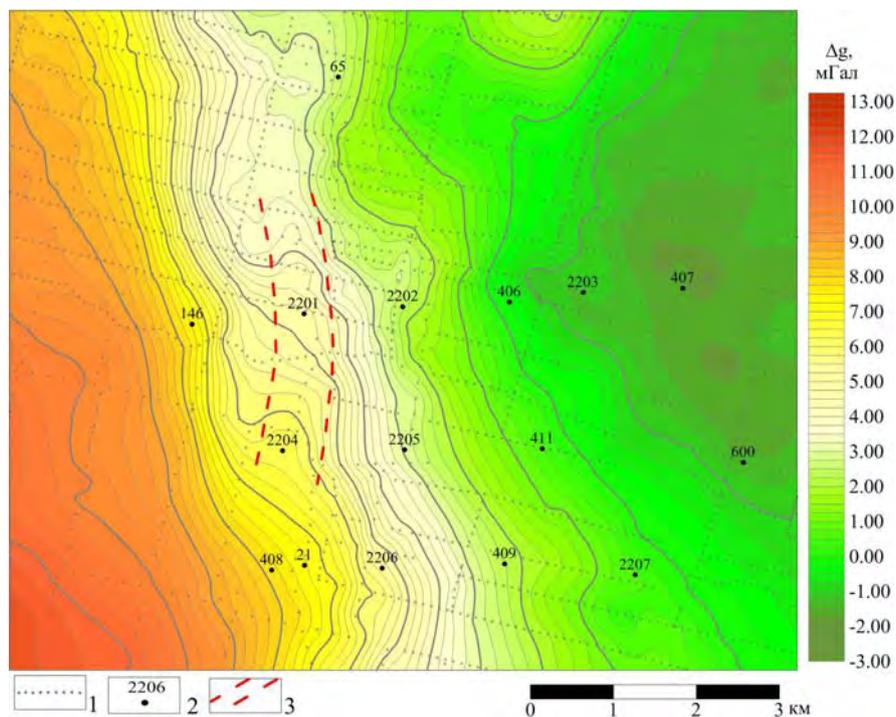


Рис. 1. Гравитационное поле: 1 – пункты гравиметрических наблюдений, 2 – скважины, 3 – локальная положительная аномалия, обусловленная надвигом

Сложная картина распределения геодинамических напряжений, генерируемых складчатой зоной Урала, определила сложную геологическую ситуацию на изучаемом участке. Данные бурения показывают наличие интенсивных вторичных изменений пород, неравномерное их выветривание, изменяющуюся по латерали мощность толщ, разную полноту разреза.

В скважине 2201, пробуренной в 2 км западнее вершины соляного поднятия, наблюдается повторение разреза надсоляной толщи. На каротажной кривой естественной радиоактивности наблюдается двойная закономерная последовательность ритмов, что свидетельствует о вскрытии скважиной надвига. Пересечение скважиной плоскости надвига фиксируется на глубине 105 – 110 м. Описание керна в районе этого интервала отражает крайнюю степень нарушенности пород – углы наклона слоистости до  $90^\circ$ , наличие систем микросбросов, зеркал скольжения, открытых и минерализованных трещин и т. д. Сильные вторичные изменения пород характерны для всей надсоляной толщи данной скважины. Это говорит о том, что породы в районе скважины 2201 интенсивно подвергались тектоническим преобразованиям.

Кроме скважины 2201 значительные изменения пород по описанию керна отмечаются также в скважине 2204, расположенной в 1.7 км южнее скважины 2201. Однако, повторение разреза на каротажной кривой скважины 2204 визуально не просматривается по причине слабой ее дифференцированности.

Геологический разрез, приведенный на рис. 2, дает общее представление о строении изучаемого участка. Надвиг, зафиксированный в надсоляной толще скважины 2201, пересекает, согласно построенному разрезу, надсоляную и продуктивную толщи и, вероятно, затухает в пластичных породах подстилающей соли. Исходя из истории геодинамического развития региона, принимаем, что движение породных масс осуществлялось с востока на запад. Следовательно, плоскость надвига должна падать на восток, что и отражается на разрезе. Угол падения плоскости надвига составляет в данной модели  $13^\circ$ , амплитуда надвига по плоскости смещения 150–160 м.

На разрезе фиксируется неравномерное по площади растворение верхней части соляной толщи. Максимальное растворение отмечается на выпуклых вверх участках (скв. 146, 406), где на границе соляной и надсоляной толщ во время нагнетания соли формировались области максимального вертикального давления, что способствовало ускоренному растворению соляных пород. На пониженных участках соляной поверхности, находящихся в зонах менее интенсивных вертикальных напряжений, наблюдается практически сохраненный полный разрез верхней части соляного массива: переходная толща, покровная соль, продуктивная толща. На геологическом разрезе такие участки наблюдаются в скважине 2201, где продуктивная толща сохранилась под плоскостью надвига в локальном понижении автохтона, в скважинах 407, 110 – на пониженных участках восточного склона соляного поднятия.

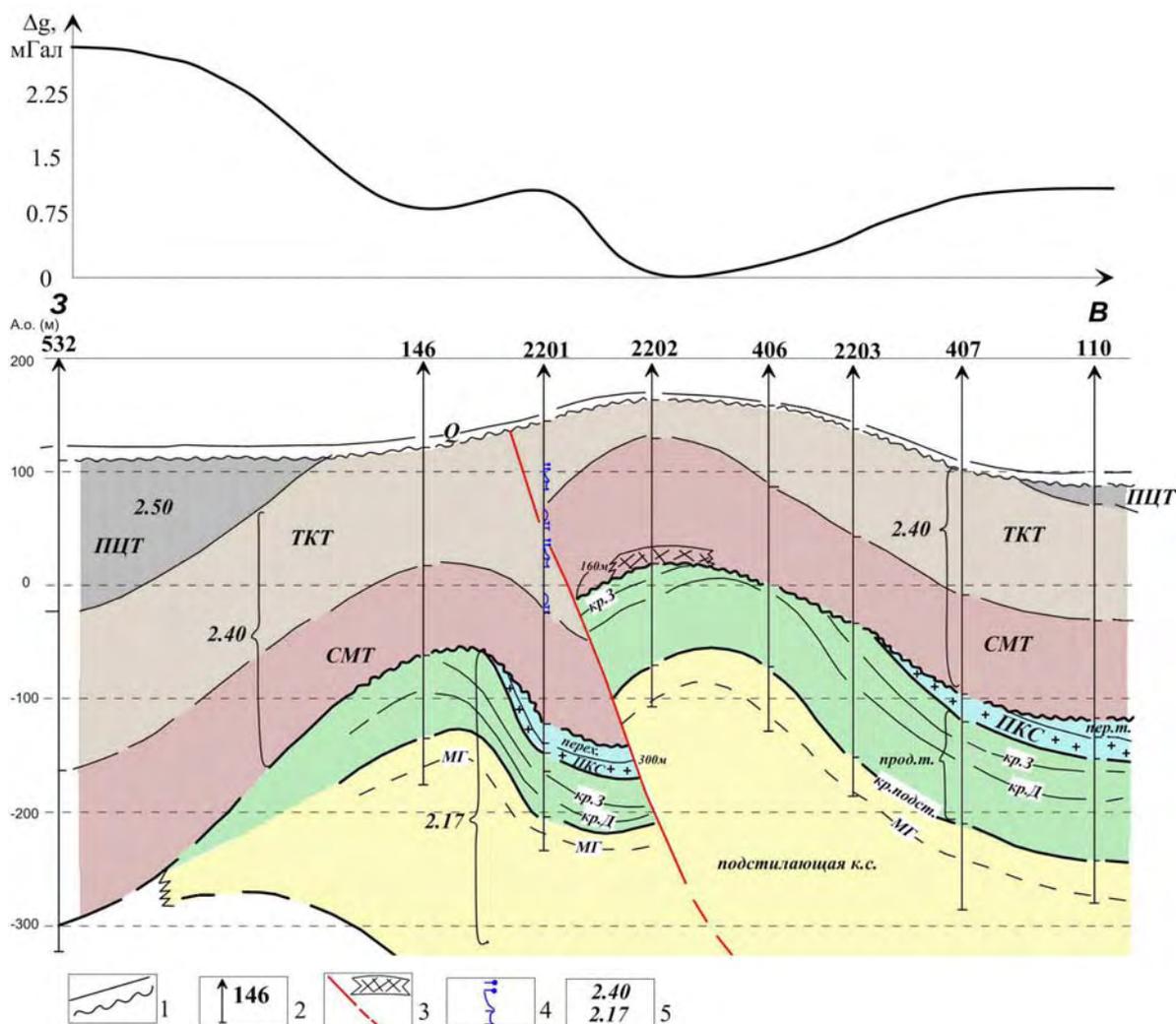


Рис. 2. Геологический разрез и модельное гравитационное поле:

1 – геологические поверхности, 2 – скважины, 3 – глинисто-гипсовая шляпа, плоскость надвига, 4 – повторяющиеся элементы кривой ГК в автохтоне и аллохтоне, 5 – средняя плотность толщ,  $г/см^3$  (толщи: Q – четвертичная, ПЩТ – пестроцветная, ТКТ – терригенно-карбонатная, СМТ – соляно-мергельная, ПКС – покровная каменная соль, пер.т. – переходная, прод. – продуктивная, кр.З. – кровля пласта З, кр.Д. – кровля пласта Д, кр.подст. – кровля подстилающей соли, ОГ "С" – сейсмический отражающий горизонт "С")

На разрезе фиксируется неравномерное по площади растворение верхней части соляной толщи. Максимальное растворение отмечается на выпуклых вверх участках (скв. 146, 406), где на границе соляной и надсоляной толщ во время нагнетания соли формировались области максимального вертикального давления, что способствовало ускоренному растворению соляных пород. На пониженных участках соляной поверхности, находящихся в зонах менее интенсивных вертикальных напряжений, наблюдается практически сохраненный полный разрез верхней части соляного массива: переходная толща, покровная соль, продуктивная толща. На геологическом разрезе такие участки наблюдаются в скважине 2201, где продуктивная толща сохранилась под плоскостью надвига в локальном понижении автохтона, в скважинах 407, 110 – на пониженных участках восточного склона соляного поднятия.

На базе разнообразных данных о строении и развитии территории стала возможной эффективная интерпретация гравиметрических материалов. Для построения трансформант гравитационного поля использовалась программа «Вектор» [2].

Применение гравиметрии при подготовке изучаемого участка для проведения горных работ позволило решить две задачи. Во-первых, выяснить положение в плане, выявленного по результатам бурения, надвига, определить его длину. Во-вторых, выявить участки с низкими прочностными свойствами пород, т.е. пород пониженной плотности – повышенной пористости и трещиноватости.

Для выяснения характера проявления надвиговой структуры в гравитационном поле был рассчитан гравитационный эффект от кровли соляной толщи для модели надвига, показанной на рис. 2. По результатам решения прямой задачи гравиметрии, увеличение мощности плотных надсоляных пород в районе надвига создает положительную аномалию амплитудой 0.7 мГал. На карте поля силы тяжести (рис. 1) в районе скважины 2201 отчетливо видна положительная аномалия линейной формы. Ее длина около 3 км, ширина 700–800 м. Амплитуда и ширина подобны модельным величинам. Это означает, что западный склон соляного купола осложнен надвигом меридионального простирания длиной около 3 км.

Можно предположить, что своевременное выявление надвига, осложняющего надсоляную и верхнюю часть соляной толщи, позволит избежать негативной ситуации при горных работах.

Вторая задача решалась путем построения разностных трансформант гравитационного поля, которые отражают плотностную неоднородность породных слоев на выбранных глубинах. На трансформантах, рассчитанных для глубин залегания надсоляного и верхней части соляного разреза, наблюдается мозаичная картина положительных и отрицательных локальных аномалий. Отрицательные аномалии указывают положение участков разуплотненных пород.

Разуплотненные участки относительно структуры поверхности соляной толщи располагаются закономерно. Например, на разностной трансформанте для глубины 130 – 280 м (рис. 3) локальные аномалии 1, 2, 3, 4 обнаружены в области вершины соляного валика, сформированного перед фронтом надвига.

Серия разуплотнений 26, 8, 9 сформирована вдоль перегиба надсоляной толщи над соляным носом, простирающимся от вершины поднятия на юг. Аномалия 13 вытянута вдоль другого соляного носа в юго-восточном направлении. Аномалии 24, 18, 19, 20, 14, 15, 16 приурочены к склону соляного купола.

**Выводы.** На одном из соляных куполов приплатформенного Камско-Вишерского вала выявлено дизъюнктивное нарушение – структура горизонтального сжатия – надвиг, который осложняет верхнюю часть геологического разреза. Положение надвига в плане отражается в морфологии гравитационного поля. Наличие надвига в западной части Предуральского прогиба является свидетельством того, что геодинамическое влияние Уральской складчатой зоны распространялось до границы платформы. Данный надвиг вписывается в общую картину других проявлений горизонтального давления с востока, зарегистрированных в Предуральском прогибе.

Надсоляная толща и верхняя часть соляной толщи приобрели в течение геологической истории высокую степень плотностной неоднородности с формированием участков плотных и разуплотненных пород. Разностные трансформанты гравитационного поля показали конкретное положение разуплотнений на изучаемом участке. На поднятых участках на контакте надсоляной и соляной толщ наблюдается неполный разрез соляной толщи – растворение под давлением. Причины вторичных преобразований пород – тектонические процессы в условиях зоны гипергенеза.

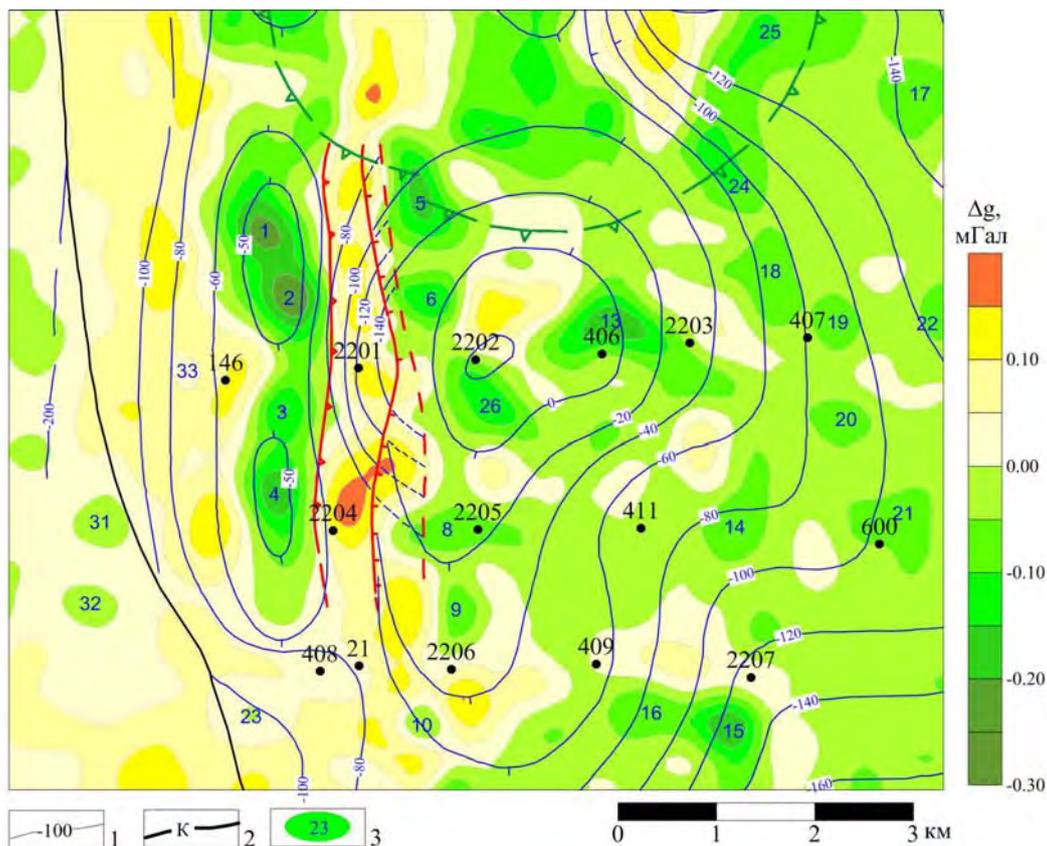


Рис. 3. Плотностное строение надсоляной толщи:

- 1 – изогипсы кровли солей по скважинным и гравиметрическим данным,
- 2 – граница распространения калийной залежи,
- 3 – локальные отрицательные аномалии силы тяжести

Полученные данные на конкретном примере подтверждают высказанную ранее идею о том, что рассматриваемая территория является одним из элементов сложной геодинамической системы Предуральского краевого прогиба, и находится в зоне действия сжимающих уральских напряжений, хотя расположена на большом расстоянии от передовых Уральских складок (50 км) – у границы Восточно-Европейской платформы. Ранее [1] на данном участке было спрогнозировано наличие Усольского надвига, как элемента системы предполагаемых региональных надвигов, нарушающих структуру Верхнекамского месторождения и ниже залегающих толщ палеозоя.

Проведенные исследования продемонстрировали, что применение гравиразведки повышает эффективность изучения территории. Полученные результаты комплексной интерпретации геолого-геофизических материалов повышают безопасность горных работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с. – С. 19-82.
2. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе Vector / Г.В. Простолупов, В.М. Новоселицкий, В.Н. Конешов, Г.П. Щербинина // Физика Земли. – 2006. – № 6 – С. 90-96.

Д.Ю. ШУЛАКОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКВАЖИННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ  
ПОВЫШЕНИЯ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
ЛОКАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

Проведение сейсмологических наблюдений на горнодобывающих объектах, как и в любых других местах с высокой техногенной нагрузкой, сопряжено с необходимостью обнаружения целевого сигнала на фоне интенсивных сейсмических помех. Дополнительно осложняют ситуацию относительно небольшие размеры объектов, в связи с чем возможности выбора мест для установки сейсмических датчиков очень ограничены. Частично задача подавления помех может быть решена за счет углубленной цифровой обработки сейсмограмм и использования различных способов фильтрации. Однако весьма перспективным направлением представляется непосредственное снижение уровня шумов в месте установки датчика.

Наиболее простым и очевидным способом повышения качества сейсмических записей является установка датчиков в скважины. При этом решаются сразу две задачи: снижается уровень микросейсмических шумов и повышается качество целевого сигнала за счет уменьшения его поглощения в породах верхней части разреза. Понятно, что с увеличением глубины скважины отношение сигнал/помеха будет возрастать, но при этом также стремительно растет стоимость бурения и возникает целый ряд технологических проблем, связанных с установкой и точной ориентировкой сейсмических датчиков. Целью данной работы является определение оптимальной глубины скважин, используемых для установки датчиков при мониторинге техногенной сейсмичности.

***Снижение уровня шумов***

Микросейсмические колебания различной интенсивности присутствуют в любой точке земной поверхности. Характерной их особенностью является то, что они состоят преимущественно из волн поверхностного типа. Это обусловлено тем, что амплитуда поверхностных волн при удалении от источника убывает гораздо медленнее, чем у объемных Р- и S-волн. Однако амплитуда поверхностных волн достаточно быстро уменьшается с глубиной. Глубина проникновения поверхностной волны зависит от ее длины  $\lambda$ : для вертикальной компоненты максимальная амплитуда поверхностной волны наблюдается на глубине  $z=0.1\lambda$ , и на глубине  $z>\lambda$  ее амплитуда становится пренебрежимо мала [1] (см. рис. 1). Амплитуда горизонтальной компоненты поверхностной волны убывает с глубиной еще быстрее, чем вертикальной.

Таким образом, установка датчика в скважине позволяет значительно снизить уровень микросейсмических шумов, причем чем больше глубина установки, тем ниже минимальная частота подавляемых помех. Для количественной оценки этой зависимости было проведено сопоставление спектров сейсмических шумов на земной поверхности и в скважине, полученных при работах по сейсмологическому мониторингу процесса гидроразрыва пласта (ГРП) (см. рис. 2). Один из датчиков был установлен в скважине глубиной 10 м, второй – на земной поверхности возле ее устья. Как видно из представленного рисунка, до частоты 17 Гц спектры шумов практически совпадают, однако на более высоких частотах уровень шумов в скважине быстро снижается. Учитывая, что скорость поверхностных волн на глубине в единицы метров составляет около 500 м/с, существенное снижение амплитуды поверхностной волны начинается уже при отношении  $z/\lambda \geq 0.3$ . Этот факт вступает в противоречие с описанными выше свойствами поверхностных Рэлеевских волн, согласно которой их амплитуда на подобной глубине должна быть значительной.

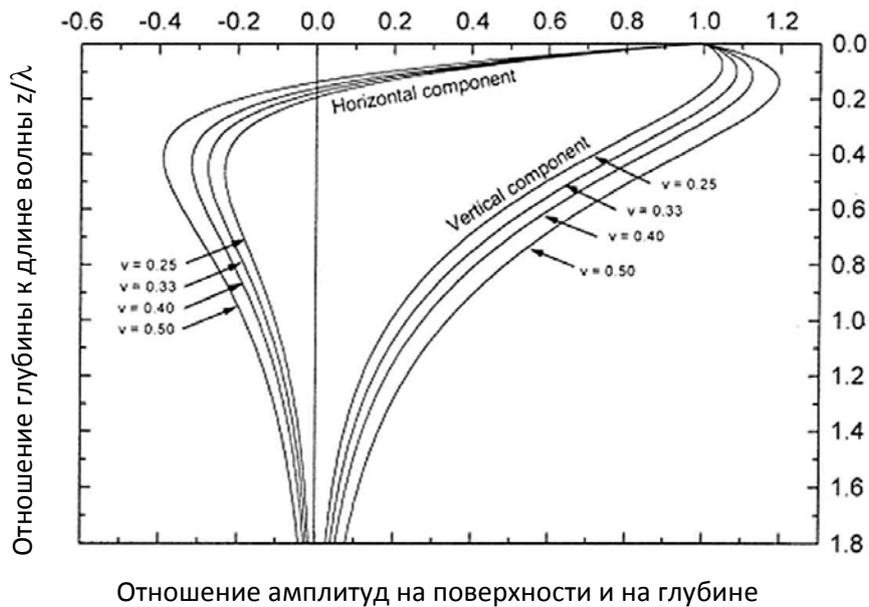


Рис. 1. Зависимость амплитуды волны Релея от глубины [1]

Для проверки устойчивости наблюдаемого эффекта было проведено аналогичное сравнение уровня шумов на земной поверхности и на глубине в двух сейсмологических обсерваториях: «Обнинск» и «Владикавказ». Для станции «Обнинск» были использованы датчики, установленные в штольне на глубине 30 м и в скважине на глубине 80 м, для «Владикавказа» - датчик, установленный в 70-метровой скважине. Во всех трех случаях были получены сопоставимые результаты: в обсерватории «Обнинск» для датчиков в штольне и скважине резкое снижение шумов начинается с частот 4 и 2.7 Гц соответственно, для «Владикавказа» - с частоты 3.3 Гц. С учетом скоростного строения во всех случаях эта глубина примерно соответствует  $0.1 \lambda$ . Данный результат, хотя и является очень благоприятным с практической точки зрения, трудно объяснить теоретически и требует дальнейших исследований.

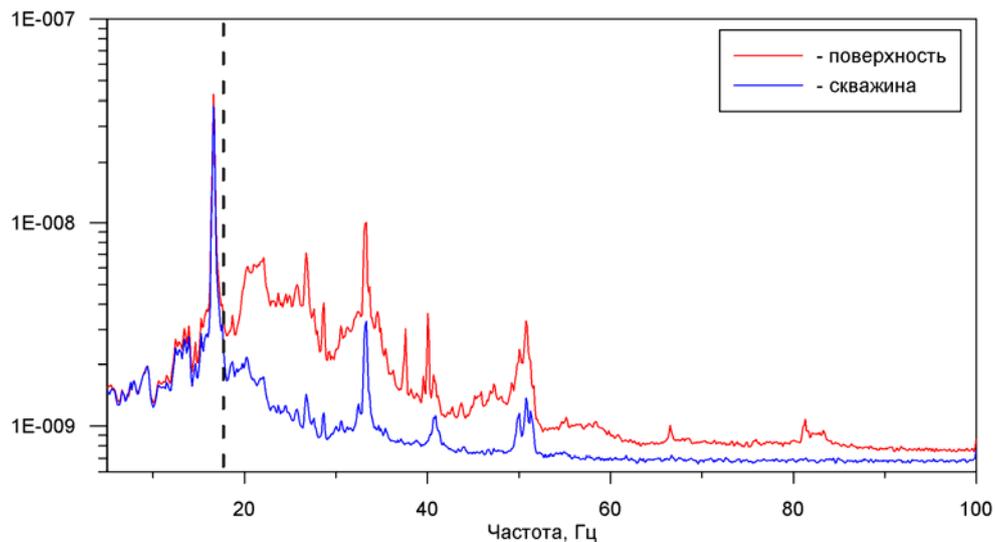


Рис. 2. Сопоставление спектров микросейсмических шумов в скважине и на земной поверхности

### ***Расширение частотного диапазона***

Второй проблемой, возникающей при регистрации сейсмических сигналов на земной поверхности, является интенсивное поглощение высокочастотной составляющей сейсмической волны в рыхлых горных породах верхней части разреза (ВЧР). Повысить качество регистрации сигналов также можно за счет установки датчиков в скважинах. Однако предварительно надо определить, какие частоты и насколько сильно поглощаются породами в ВЧР и есть ли необходимость бороться с этим эффектом.

Для решения данной задачи также были использованы сопряженные пары поверхностных и скважинных датчиков. В первую очередь, был выполнен анализ записей, полученных системой сейсмического мониторинга в районе «большого» провала на руднике БКПРУ-1. Данная система включает в себя как поверхностные датчики, так и скважинные, установленные на различной глубине. Для сравнения были выбраны записи «импульсных» высокочастотных событий, связанных с трещинообразованием в прочных породах, полученные тремя датчиками: поверхностным S15 и двумя, расположенными в скважине, находящейся в 20 м от него – В3U (глубина 17 м) и В3D (глубина 39 м). Для анализа были выбраны записи 5 «импульсных» событий, имеющих относительно высокую энергию (более 20 Дж) и произошедших в радиусе 100 м от датчиков. Сопоставление нормированных спектров сейсмограмм показало, что записи, полученные на земной поверхности, несколько богаче низкочастотными колебаниями (5 – 20 Гц), однако начиная с частоты 50 Гц амплитуда сигнала на поверхностном датчике становится заметно ниже, чем на обоих скважинных. Данная тенденция с разной степенью выраженности прослеживается на всех проанализированных сейсмограммах.

Однако использование сигналов условно природного происхождения оставляет открытым вопрос о частотном составе исходного сигнала и возможном влиянии направленности излучения сейсмической волны (механизм очага нам неизвестен). В связи с этим были дополнительно проанализированы записи взрывов, полученные в ходе работ по мониторингу ГРП, а также при изучении сейсмического воздействия взрывов в гипсовой шахте. В случае взрывов, проводимых в плотных породах, мы можем быть уверены, что частотный состав сигналов достаточно широкий, а направленность излучения сейсмической волны практически равномерная.

При мониторинге ГРП проводился подрыв торпеды ТШТ, используемой для калибровки скоростной модели. Для сравнения были взяты записи двух идентичных датчиков, один из которых был расположен на земной поверхности, второй – в скважине глубиной 10 м. Сопоставление амплитудных спектров сигналов показало, что ниже 70 Гц они практически идентичны, но в более высоких частотах амплитуда сигнала на скважинном датчике более высокая.

В ходе регистрации сейсмических сигналов от взрывов в гипсовой шахте датчики располагались на земной поверхности и в горных выработках, на глубине 150 м. Для анализа были выбраны 2 пространственно сопряженных датчика. Сравнение зарегистрированных ими сейсмограмм показало, что на поверхностном датчике наблюдаются интенсивные низкочастотные колебания, ассоциируемые с поверхностными волнами. В частотном интервале 20 – 60 Гц амплитуды сигналов на земной поверхности и в шахте практически совпадают, а начиная с частоты 70 Гц интенсивность колебаний на уровне горных выработок становится значительно выше.

### **Выводы**

Установка сейсмических датчиков в скважины, даже относительно неглубокие, позволяет заметно снизить уровень сейсмических шумов, особенно в высокочастотной части спектра. При этом подавляются поверхностные волны, длина которых составляет менее  $10h$  ( $h$  – глубина установки датчика). Этот факт противоречит теоретическим расчетам и требует дальнейшего изучения.

Установлено, что слабо консолидированные породы верхней части разреза интенсивно поглощают колебания с частотой свыше 70 Гц, что необходимо учитывать при проектировании систем наблюдений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Athanasopoulos G.A. Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements / Athanasopoulos G.A., Pelekis P.C., Anagnostopoulos G.A. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2000. – V. 19, Iss. 4. – P. 277-288.

УДК 550.31+550.34

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.46

Т.С. БЛИНОВА

*Горный институт УрО РАН*

### **ВЫДЕЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИ НЕУСТОЙЧИВЫХ ЗОН ЮЖНОГО ПРЕДУРАЛЬЯ**

Методика выделения геодинамически неустойчивых зон и построения прогнозных карт максимальных магнитуд возможных землетрясений разработана в Горном институте УрО РАН на примере Западно-Уральского региона [1]. Она применена для Западно-Сибирской плиты, Тимано-Североуральского региона, территории Соединённого Королевства Великобритании и Северной Ирландии [1] и восточной окраины Восточно-Европейской платформы [2]. Определены признаки выделения геодинамически неустойчивых зон, в которых состояние, свойства и динамика происходящих процессов таковы, что делают зоны восприимчивыми к дестабилизации под действием региональных и глобальных тектонических сил. Эта дестабилизация проявляется в сейсмичности. Методика применена для Оренбургского региона.

Первым этапом решения задачи выделения геодинамически неустойчивых зон является создание электронной базы геологических, геофизических и сейсмологических данных. При её создании использовались данные, предоставленные лабораторией водных систем и геодинамики Южного Урала отдела геоэкологии ОНЦ УрО РАН, карты, опубликованные в сети Интернет, и карты в графическом виде, опубликованные в различных изданиях [4].

В базу данных вошли следующие карты: карта аномального магнитного поля (<http://www.geomag.us/models/emag2.html>), карта гравитационного поля в редукции Буге (<http://topex.ucsd.edu>), структурная схема поверхности Мохоровичича (Marek Grad (1), Timo Tiira (2) & ESC Working Group, (1) Institute of Geophysics, University of Warsaw, Pasteura 7, 02-093 Warsaw, Poland (2) Institute of Seismology, University of Helsinki, Helsinki, P.O. Box 68, FIN-00014, Finland (<http://www.igf.fuw.edu.pl/mohomap2007/>), карта рельефа земной поверхности (<http://gis-lab.info/qa/srtm.html>), карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным (Л.А. Кашин, 1989), структурная карта-схема Южного Предуралья и схематическая структурно-тектоническая карта поверхности кристаллического фундамента [4]. Часть карт, составляющих базу данных, получена в геоинформационной системе «ГЕО» при помощи подсистемы преобразования знаний и фактов [3]. В данной подсистеме «ГЕО» практически для всех параметров, если это имело физический смысл, были рассчитаны и построены карты горизонтальных градиентов. Составлен каталог землетрясений и построена карта их эпицентров (рис. 1). Каталог создан за период с 1830 по 2017 г. В него вошли землетрясения, предоставленные Геофизической службой РАН с 1830 по 1994 г. (И. П. Габсатарова), и с 2008 по 2017 г. – лабораторией водных систем и геодинамики Южного Урала отдела геоэко-

логии ОНЦ УрО РАН. Он необходим для оцифровки геодинамически неустойчивых зон и расчета прогнозных карт макси-мальных магнитуд возможных землетрясений.

Определены признаки выделения геодинамически неустойчивых зон для Оренбургского региона. Опыт исследований слабоактивных территорий показал, что геодинамически неустойчивые зоны проявляются в уменьшении глубины залегания границы Мохоровичича. В Оренбургском регионе выделено несколько участков, где глубина залегания границы Мохоровичича составляет 38–44 км, при изменении параметра для всего региона от 38 до 51 км. Была изучена глубина залегания кристаллического фундамента. При изменении данного параметра для всего региона от 3000 до 8000 м, в пределах геодинамически неустойчивых зон наблюдается его погружение [4]. Также использованы градиенты глубины залегания границы Мохоровичича, градиенты высоты рельефа земной поверхности, горизонтальные градиенты гравитационного и магнитного поля. Карты этих параметров рассчитаны и построены в геоинформационной системе «ГЕО» [3]. Градиенты глубины залегания границы Мохоровичича в пределах геодинамически неустойчивых зон имеют небольшие значения, на краях зон они повышаются. В пределах намеченных зон горизонтальные градиенты гравитационного поля имеют значения  $(3-100) \cdot 10^{-2}$  мГал/км, при этом на краях зон они повышаются и составляют  $(125-140) \cdot 10^{-2}$  мГал/км. Горизонтальные градиенты аномального магнитного поля ведут себя аналогично. В пределах намеченных зон они имеют небольшие значения 1–6 нТл/км, на краях зон составляют 13–20 нТл/км. Градиенты высоты рельефа земной поверхности впервые были использованы для выделения геодинамически неустойчивых зон такого масштаба. Исследования показали, что данный параметр оказался информативным, в пределах зон он имеет наименьшие значения, а на краях зон повышается.

В результате проведенных исследований Оренбургского региона, выделено четыре геодинамически неустойчивые зоны: Серноводско-Абдулинская, Ольховская, Сакмарско-Оренбургская, Чаганско-Рубежинская (рис. 1). Первые три выделяются по всему набору имеющихся признаков, Чаганско-Рубежинская – по четырем признакам. Самая значительная по площади и количеству сейсмических событий Сакмарско-Оренбургская зона располагается в пределах Урало-Сакмарского прогиба и прилегающего к нему Оренбургского блока, значение наибольшей магнитуды землетрясения, попавшего в эту зону, составляет  $M=2.4$ . На севере области четко выделяется по признакам Серноводско-Абдулинская зона, она располагается в одноименном авлакогене. Землетрясение, которое попало в эту зону одно, имеет магнитуду  $M=2.1$ . На юго-западе региона четко выделена Чаганско-Рубежинская зона, которая имеет наибольшую магнитуду  $M=4.0$ . Зона располагается в пределах Чаганского выступа и Рубежинского прогиба. Наименьшей по площади и величине магнитуды является Ольховская зона, сопряженная с Ольховским грабеном, магнитуда составляет  $M=1.3$ . Вполне вероятно, что при добавлении знаний о сейсмичности региона, вновь произошедшие землетрясения подтвердят или изменят оцифровку геодинамически неустойчивых зон.

Признаки выделения геодинамически неустойчивых зон были изучены для исследуемого региона через половину градуса широты по всем имеющимся данным. В геоинформационной системе «ГЕО» получена региональная модель геодинамически неустойчивых зон Оренбургского региона, которая оцифрована по значениям максимальных магнитуд землетрясений, попавшим в зоны (рис. 1).

Проведено сопоставление модели геодинамически неустойчивых зон с тектоникой Оренбургского региона. Самая северная геодинамически неустойчивая зона располагается в пределах Серноводско-Абдулинского авлакогена. Ольховская геодинамически неустойчивая зона сопряжена с одноименным грабеном. Как показали исследования, проведенные в Западно-Уральском регионе и на территории Западно-Сибирской плиты, такие структуры могут инициировать землетрясения. Также для Ольховской зо-

ны характерно пересечение двух систем разломов, расположенных практически под прямым углом. Такие зоны сочленения разломов или систем разломов являются активными и могут инициировать землетрясения, что показали все предыдущие исследования [1]. Сакмарско-Оренбургская зона подчинена системе разломов первого и второго порядка, которая пересекает регион с востока на запад.

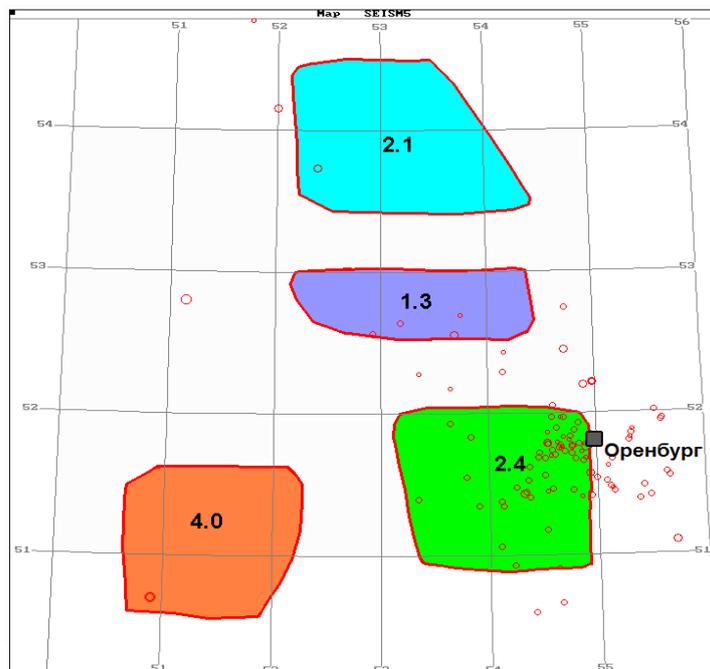


Рис. 1. Региональная модель геодинамически неустойчивых зон Оренбургского региона, построенная в геоинформационной системе «ГЕО» с нанесенными эпицентрами землетрясений. Цифры внутри зон – максимальные значения магнитуд землетрясений, эпицентры которых располагаются внутри зон

Методика прогноза геодинамически неустойчивых зон, разработанная в ГИ УрО РАН, применена в Оренбургском регионе. Полученная региональная модель свидетельствует о различной степени геодинамической активности разных частей региона, что может быть использовано для решения научных и прикладных задач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сейсмичность и сейсмическое районирование слабоактивных территорий / Т.С. Блинова, В.В. Удоратин, Р.А. Дягилев, Ю.В. Баранов, Н.Н. Носкова, Н.В. Конанова; ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2015. – 178 с.
2. Блинова Т.С. Сейсмический потенциал Восточной окраины Восточно-европейской платформы в пределах трапеции  $\varphi N = 56^\circ - 67^\circ - \lambda E = 48^\circ - 60^\circ$  // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. - № 6-5 (48). – С. 122-126. DOI:10.18454/IRJ.2016.48.075. – 1.Режим доступа <http://research-journal.org/wp-content/uploads/2011/10/6-5-48.pdf>.
3. Гитис В.Г. Основы пространственно-временного прогнозирования в геоинформатике [электронный ресурс] / В.Г. Гитис, Б.В. Ермаков. – М.: Физматлит, 2004. – 256 с.
4. Нестеренко М.Ю. Геодинамические процессы в разрабатываемых месторождениях углеводородов (на примере Южного Предуралья) / М.Ю. Нестеренко, Ю.М. Нестеренко, А.Г. Соколов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2015. – 185 с.

Ю.В. БАРАНОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ  
РАЗВИТИЯ ЗОН ТРЕЩИНОВАТОСТИ  
ПРИ ГИДРОРАЗРЫВЕ ПЛАСТА**

Микросейсмический мониторинг развития зон трещиноватости при гидроразрыве пласта (ГРП) является перспективной научной и прикладной задачей, связанной с разработкой месторождений углеводородов и интенсификацией добычи нефти на месторождениях Пермского края.

Лаборатория природной и техногенной сейсмичности «ГИ УрО РАН» проводит работы по мониторингу развития зон трещиноватости с 2015 года. На сегодняшний день такие работы завершены на 9 участках на месторождениях Пермского края, с разными геологическими условиями. Перфорация скважины и гидроразрыв производились на глубинах от 1000 до 1600 метров.

В настоящее время нет регламентированных требований к проведению таких работ, установленных форм отчетов и утвержденных характеристик используемой аппаратуры, все проведенные работы основывались на расчетах и опыте предыдущих исследований на месторождениях углеводородов. При проведении полевых наблюдений приходится искать баланс между регистрационными возможностями сети, уровнем шумов, доступностью территории, конфигурацией скважины и другими параметрами. Опытным путем установлено минимальное расстояние до источника шумов на поверхности при проведении ГРП, которое составило 500 м. Максимальное расстояние выбиралось равным глубине пласта. Расстановка выбиралась исходя из принципа равномерности, датчики по возможности устанавливались вне дорог, вне населенных пунктов, вдали от источников шумов. В работе использовались от 20 до 26 комплектов регистрирующей аппаратуры.

Первоначально при проведении работ применялись сейсмические станции Байкал и Reftek, датчики SeisMonitor, и Mini SeisMonitor, Guralp и HS-1. Опыт исследований выявил недостатки данной аппаратуры, осложняющие её использование при мониторинге, в частности, высокое энергопотребление и большой вес датчиков, проблемой оказалось и обеспечение сохранности дорогостоящих комплектов приборов. С учетом требований к таким исследованиям в лаборатории природной и техногенной сейсмичности был разработан цифровой сейсмический регистратор Ермак-5 (рис. 1). Регистратор удобен в использовании, он компактен и не требует специальных условий для транспортировки. Потребляемая мощность регистратора составляет 350 мВт, что обеспечивает до 14 суток непрерывной работы развернутой полевой системы мониторинга [1]. Также в лаборатории был разработаны легкие и герметичные корпуса для установки сейсмического датчика HS-1 3D на поверхности и в скважине.

Обработка полученного материала включала фильтрацию зарегистрированных сигналов, выявление методом локации источников микросейсмического излучения и визуализацию таких зон.

Наличие трехкомпонентных записей позволило использовать поляризационный фильтр для увеличения соотношения сигнал/шум на вступлениях продольных и поперечных волн.



Рис. 1. Цифровой сейсмический регистратор Ермак-5

Для локации импульсных сигналов с четкими вступлениями волн использовались классические методы определения координат источника. При низком соотношении сигнал/шум положение источника определялось методом эмиссионной томографии, основанной на расчете функции “яркого пятна”, оценивающей коэффициент когерентности между записями в некотором частотном диапазоне для заданной точки пространства, которая может быть источником. Рассчитывая такую функцию внутри интересующей области с некоторым шагом, можно выявить зоны, которые по своей “яркости” отличаются. Наиболее яркие из них будут указывать на наиболее вероятное положение источника [2].

Результатом работ стали полученные картины пространственного распределения зон трещиноватости, а также временная динамика развития таких зон. Отмечается изменение интенсивности и смещение максимумов микросейсмического излучения во время проведения гидроразрыва пласта и наличие взаимосвязи между зонами микросейсмической активности. По всей видимости, такие изменения отражают динамику развития трещин в пласте.

Проведенные работы получили положительную оценку заказчика и будут продолжены на других месторождениях Пермского края.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Опыт разработки и внедрения / Бутырин П.Г., Верховланцев Ф.Г., Верховланцев А.В., Шулаков Д.Ю. // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54, № 2. – С.5-18. DOI: 10.21455/si2018.2-1
2. Dyagilev R.A. Estimation of abilities of surface microseismic monitoring during hydraulic fracturing [Электронный ресурс] / Dyagilev R.A., Shumilov, A.V. // Society of Petroleum Engineers. – Moscow, 2017. – DOI: <https://doi.org/10.2118/187894-MS>. (Дата обращения: 05.05.2018).

П.Г. БУТЫРИН  
Горный институт УрО РАН  
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАКСИМУМ.  
ИТОГИ РАЗРАБОТКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ  
СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕГИСТРАТОРА  
«ЕРМАК-5» ЗА 2017-2018 ГОДЫ**

Сейсмологический мониторинг является одним из основных инструментов для оценки напряженно-деформированного состояния породного массива. Как на территории ВКМКС, так и на других потенциально опасных объектах в настоящий момент активно используются современные цифровые системы сбора и обработки данных [1]. Ключевым элементом таких систем являются цифровые сейсмические регистраторы. В течение 2017 г. проводилось активное внедрение регистратора «Ермак-5», разработанного в «ГИ УрО РАН».

В начале 2017 года были определены основные направления развития проекта:

- снижение потребляемой мощности;
- увеличение точности и достоверности временной синхронизации;
- расширение числа каналов до девяти;
- использование USB-подключения для копирования данных;
- разработка методики испытания.

К декабрю 2017 г. регистратор в исполнении «Поле» активно использовался для проведения геофизических исследований гидроразрыва пласта совместно с ПНГФ (Пермский край), а также при сейсмологическом мониторинге зоны Краснослободского разлома РУ-2 ОАО «Беларуськалий» (Республика Беларусь) [2]. На этих объектах имело большое значения низкое энергопотребление (от 0.32 Вт). Такие результаты были достигнуты благодаря корректировке алгоритма адаптивного управления модулем GPS/GLONASS [3].

В исполнении «Регион» регистратор «Ермак-5» активно используется при сейсмологическом мониторинге ВКМКС (Пермский край). Именно здесь проходят основные этапы полевых испытаний. Анализ многочисленных записей удаленных землетрясений показал достоверность выравнивания времени при использовании GPS/GLONASS системы (рис. 1).

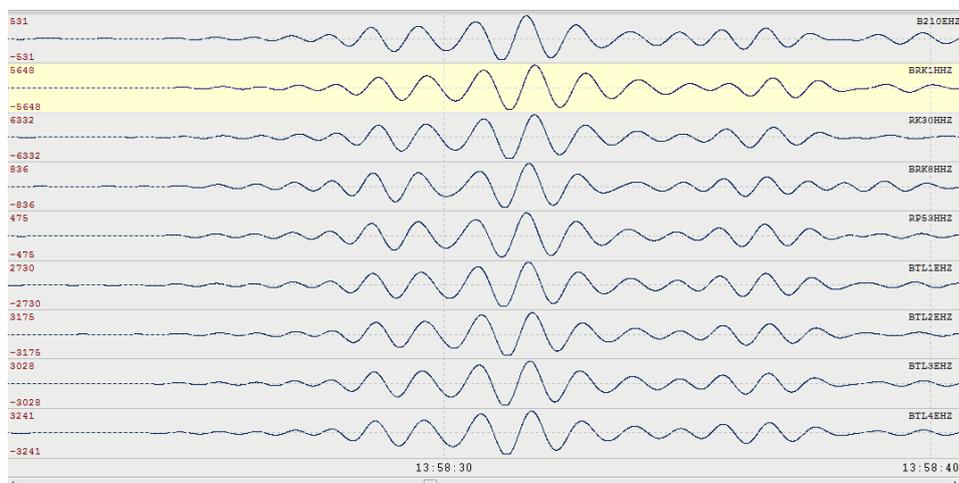


Рис. 1. Пример записи удаленного землетрясения системой сейсмологического мониторинга г. Березники

В начале 2018 г. на 10ЮВП рудника СКРУ-2 была установлена локальная мониторинговая сеть из пяти датчиков. Для передачи данных в центр сбора используется регистратор «Ермак-5» в исполнении «Шахта» с применением встроенного SHDSL-модуля. Цифровые данные передаются на компьютер сбора по телефонной линии длиной более 10 км с использованием регенератора на скорости 1Мбит/с. Эксплуатация регистратора на объекте с такими особенностями потребовала дополнительных исследований и корректировок в части синхронизации времени по протоколу NTP. В результате доработки алгоритма выравнивания времени достигнута достаточная точность для работы прибора при частоте сбора данных до 2000 Гц (рис. 2).

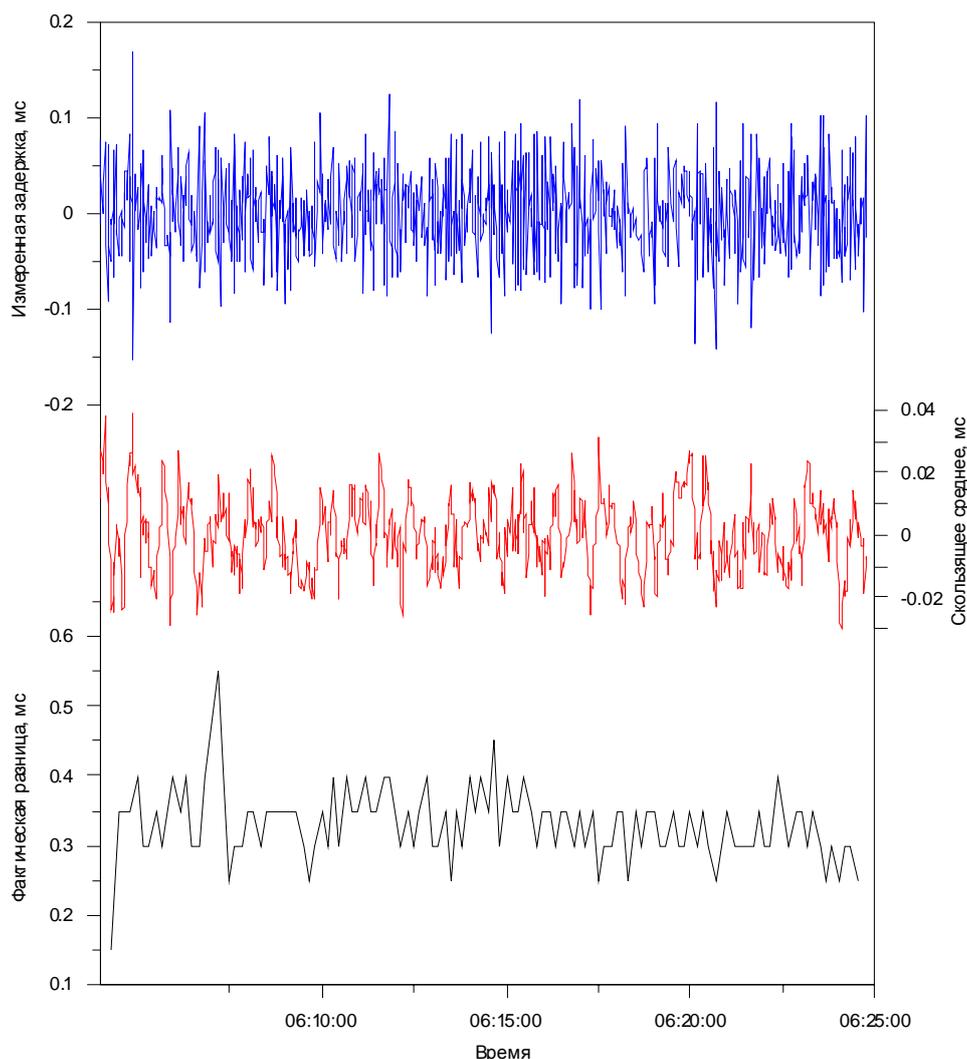


Рис. 2. Изменения хода времени и сопоставление записей двух одинаковых регистраторов при записи на частоте 2000 Гц

Для увеличения числа каналов в конструкции регистратора предусмотрено стекирование плат аналого-цифрового преобразования (АЦП). Платы АЦП нового образца полностью совместимы с процессорными платами основных рабочих версий. Тестирование приборов в различных режимах работы показало предельные технические возможности регистраторов (табл. 1). Величина кода встроенного программного обеспечения составляет 93% от максимума. Анализ предельных возможностей и величины кода указывает на приближение к технологическому максимуму при использовании данной аппаратно-программной платформы.

Таблица 1

Зависимость выбора частоты дискретизации от числа используемых каналов, с учетом сохранения работы различных служб прибора

Частота дискр., Гц	Кол-во каналов	GPS	NTP	SEEDlink	Web	Визуализация
2000	1	1	1	1	1	0
1800	1	1	1	1	1	0
1800	2	1	0	0	1	0
1500	1	1	1	1	1	1
1500	2	1	1	1	1	0
1500	3	1	0	0	1	0
1000	1	1	1	1	1	1
1000	2	1	1	1	1	1
1000	3	1	1	1	1	1
1000	4	1	1	0	1	0
750	5	1	1	1	1	1
500	6	1	1	1	1	1

На данный момент регистраторы в исполнении «Шахта» поддерживают подключение по USB, при этом прибор, подключенный к персональному компьютеру, представляется как съемный диск, полностью доступный для записи и чтения. Регистрация в таком режиме не происходит, но можно манипулировать с данными и управлять конфигурацией, не доставая съемный накопитель из прибора. Использование специального защищенного USB-разъема позволяет полностью герметизировать регистратор.

В течение 2017 г. разрабатывалась методика испытаний, которая в основном ориентирована на оптимальные подходы к быстрому и достоверному тестированию регистраторов в лабораторных условиях. В результате определены методы тестирования при помощи генератора низкочастотных сигналов, GPS/GLONASS систем и NTP-серверов.

На данный момент на различных объектах сейсмологического мониторинга постоянно работает 21 регистратор «Ермак-5»; для полевых работ используются 5 регистраторов в исполнении «Поле». Время постоянной работы на некоторых сейсмопавильонах составляет более 70 дней. По итогам корректировок встроенного программного обеспечения и лабораторного тестирования производится своевременное обновление встроенного программного обеспечения на всех регистраторах в системах сейсмологического мониторинга.

С учетом приближения к технологическому максимуму основное развитие проекта направлено на повышение надежности и удобство пользования прибором.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутырин П.Г. Модернизация систем сейсмологического мониторинга Верхнекамского месторождения калийных солей // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы 6-й Междунар. сейсмолог. шк. / ГС РАН [и др.]. – Обнинск, 2011. – С. 73-76.
2. Дягилев Р.А. Влияние подземной разработки калийного месторождения на активность текущих тектонических нарушений / Дягилев Р.А., Богдан С.И., Барбиков Д.В. // Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории Северной Евразии: материалы Междунар. конф., посвященной 50-летию открытия Центральной геофизической обсерватории в г. Обнинске / отв. ред. А.А. Маловичко; ФИЦ ЕГС РАН. – Обнинск, 2017. – С. 30.
3. Цифровой сейсмический регистратор «Ермак-5». Опыт разработки и внедрения / Бутырин П.Г., Верховланцев Ф.Г., Верховланцев А.В., Шулаков Д.Ю. // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54, № 2. – С.5-18. DOI: 10.21455/si2018.2-1.

А.В. ВЕРХОЛАНЦЕВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ  
НА ВЕЛИЧИНУ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

*Актуальность.* Проблемы безопасности сейсмического воздействия взрывов на различных горнодобывающих предприятиях возникают, когда в относительной близости от карьера располагаются различные здания и объекты гражданского назначения. Изменения горно-геологических условий и расширение фронта горных работ обуславливают актуальность задач как по управлению сейсмическим действием взрывов, так и по выполнению корректного прогноза амплитуды сейсмических колебаний.

*Обзор проблемы.* Общепринятыми нормативными критериями сейсмической опасности взрывов являются величины сейсмически безопасного расстояния и предельно допустимой скорости колебания грунта в основании охраняемых зданий и сооружений. Способ расчета сейсмически безопасных расстояний регламентирован последней редакции «ФНП в области промышленной безопасности "Правила безопасности при взрывных работах"» [9] и базируется на формальном выборе интегральных коэффициентов. Опыт натурных измерений на различных горнодобывающих объектах показал, что данный способ пригоден лишь для первичной грубой оценки. Полученные на основании натурных измерений безопасные расстояния могут значительно (иногда в разы) отличаться от величин, рассчитанных по нормативным требованиям [4].

Таким образом, единственным надежным способом оценки сейсмического воздействия является проведение прямых натурных инструментальных измерений. Результаты таких измерений позволяют получить зависимость амплитуды сейсмических колебаний от расстояния и далее выполнять прогноз сейсмического эффекта. Точность прогноза при этом будет зависеть от степени влияния многообразия влияющих на сейсмический эффект факторов.

И хотя основные факторы, влияющие на интенсивность сейсмического эффекта, выделены и частично раскрыты многочисленными исследователями в этой области [2,6,7], представляет интерес проанализировать влияния отдельных факторов на материалах выполненных научно-исследовательских работ по данной тематике на различных горнодобывающих объектах. Такая обобщающая работа будет полезна для решения задач по управлению сейсмическим действием взрыва, а также для выполнения корректного прогноза амплитуды колебаний.

*Цель работы* заключается в анализе геологических и горнотехнических факторов, влияющие на сейсмический эффект и особенности его распространения по исследуемой территории. Задачи работы состоят в анализе доступной литературы и в обобщении результатов работ по изучению сейсмического воздействия взрывов, выполненных коллективом лаборатории ПТС.

Обобщение накопленных данных позволило выделить и выполнить анализ влияния следующих факторов:

- расстояние от источника до точки измерения;
- максимальный заряд, приходящийся на одну ступень замедления;
- затухание сейсмических волн на пути их распространения от места взрыва к охраняемому объекту;

– условия и способы взрывания (тип ВВ, форма заряда, качество забойки, корректность работы системы инициирования, интервал замедления, количество ступеней замедления, нагрузка на заряд и др.);

- латеральная изменчивость грунтовых условий на охраняемой территории;
- направление инициирования зарядов взрываемого блока;
- геология участка места взрыва;
- рельеф местности.

Основными факторами, определяющими интенсивность сейсмического воздействия взрывных работ, являются *расстояние от источника до точки измерения и максимальный заряд, приходящийся на одну ступень замедления*. Эти факторы учтены при расчете сейсмически безопасного расстояния согласно [9]. Полученные на основании инструментальных измерений данные о амплитуде сейсмических колебаний на разных расстояниях позволяют получить зависимости, характеризующие убывание амплитуды сейсмической волны с расстоянием от источника, следующего вида:

$$V = aRnp^{-b}, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость смещения грунта;  $R_{ПР}$  – приведенное расстояние, которое можно рассматривать через суммарную  $Q_{\Sigma}$  либо максимальную  $Q_{max}$  массу заряда и количество ступеней замедления  $N$  в соответствии с формулами

$$R_{ПР}(Q_{\Sigma}) = R \cdot N^{1/4} \cdot Q_{\Sigma}^{-1/3}, \quad (2)$$

$$R_{ПР}(Q_{max}) = R \cdot Q_{max}^{-1/3}. \quad (3)$$

Как показал опыт натуральных измерений на большом количестве объектов (10 горнодобывающих предприятий), для каждого объекта необходимо анализировать  $R_{ПР}$  как от суммарной, так и от максимальной массы на ступень замедления для выбора наиболее корректной зависимости (1). Коэффициент  $a$  – эмпирический коэффициент, описывающий интегральное влияние грунтов и условий взрывания и обычно его называют коэффициентом пропорциональности (или коэффициентом сейсмичности). Коэффициент  $b$  описывает скорость убывания амплитуды с расстоянием, то есть отвечает за факторзатухания *сейсмических волн на пути их распространения от места взрыва к охраняемому объекту*. Определение сейсмически безопасных расстояний по [9], предполагает прохождение сейсмических волн от места взрыва до защищаемого сооружения по сравнительно однородному и не нарушенному массиву горных пород. Однако каждый конкретный массив горных пород имеет своё напряженно-деформированное состояние, имеет границы раздела, разбит нарушениями различного масштаба, направления и заполнения полостей. В подобной ситуации сейсмические волны при распространении могут образовывать довольно сложную интерференционную картину, что приводит к значительным колебаниям их амплитуды с расстоянием. Несмотря на это, до сих пор в некоторых работах [1,8] используются фиксированные значения того или иного коэффициента. Результаты инструментальных наблюдений выявили не только важность точного определения коэффициентов  $a$  и  $b$ , но и сложный характер пространственной вариации закона затухания сейсмических волн.

Влияние группы факторов, объединяющей *геологию участка места взрыва*, а также *условия и способы взрывания*, можно описать следующим образом. Эффективность взрыва на дробление напрямую зависит от соответствия параметров БВР геоло-

гическим и горнотехническим задачам. Поэтому, чем больше энергии использовано в зоне дробления, тем меньше уровень сейсмического воздействия. Степень трещиноватости, обводненности, физико-механические свойства взрываемого массива (плотность, твердость и др.) также находят отражение в степени влияния на сейсмический эффект. Анализируя данную группу факторов, отметим, что возможности управления сейсмическим эффектом существенно ограничены горнотехническими и экономическими показателями взрыва.

С другой стороны, такие ключевые параметры короткозамедленного взрыва как *интервал замедления* и *количество ступеней замедления* определяют усиление/ослабление сейсмических колебаний, обусловленные синфазным наложением волн от отдельных взрывов. Характер влияния этих факторов определяется частотным составом колебаний, а также особенностями резонансных (спектральных) характеристик грунтов на исследуемом участке. Допустимость использования этих факторов для задачи управления сейсмическим эффектом зависит от *корректности работы системы инициирования* (СИ). Анализ множества сейсмических записей взрывов выявил отклонения фактических времен инициирования от паспортных (проектных) для таких современных СИ как ИСКРА, Коршун и ЭДИЛИН.

Неравномерное распределение уровня сейсмического воздействия на исследуемой территории может быть обусловлено *рельефом местности*. Наличие относительно сложных инженерно-геологических условий, характеризующихся большим разнообразием мезоформ, в определенной мере оказывает влияние не только на амплитуду, но и на спектральный состав приходящих сейсмических волн. Это может приводить к сложному и не прогнозируемому перераспределению частот сейсмических колебаний. Опыт измерения сейсмического эффекта на разных горнодобывающих предприятиях показывает, что нередки случаи, когда на одних и тех же удалениях от взрыва отмечается различное отношение амплитуд объемных и поверхностных волн [5]. В этом случае представляется целесообразным анализировать сейсмическое воздействие для разных типов волн по отдельности.

Разная интенсивность сейсмического воздействия от взрывов на разных *грунтах* объясняется различием их физических свойств, несмотря на то, что согласно классификации ФНП грунты могут быть отнесены к одной категории. Усиление амплитуды колебаний в среде обратно пропорциональна ее сейсмической жесткости, которая является произведением скорости поперечной волны в грунте на плотность грунта. Вместе с этим изменение интенсивности сейсмических колебаний на земной поверхности зависит от глубины залегания грунтовых вод и мощности водонасыщенной толщи. Изменение интенсивности сейсмического воздействия за счет грунтовых условий также связано с эффектами резонансов, которые могут спровоцировать значительное усиление сейсмического эффекта. Опыт измерений сейсмического эффекта БВР на различных горнодобывающих объектах показал [3], что использование спектральных характеристик грунтов вместо интегральных коэффициентов позволяет более детально подходить к изучению распределения уровня сейсмического воздействия по изучаемой территории для решения задачи корректного прогноза.

### **Выводы**

При оценке сейсмического воздействия взрывов на основании инструментальных измерений необходимо учитывать возможное влияние многообразия пе-

речисленных факторов. Выделение и анализ факторов, оказывающих наибольшее влияние на сейсмический эффект на конкретном объекте, дает возможность управлять сейсмическим действием взрыва и улучшить точность прогноза амплитуды сейсмических колебаний. При этом, без существенной потери эффективности дробления управление сейсмическим действием взрыва возможно за счет:

- изменения массы заряда;
- регулирования интервалов замедления;
- изменения количества ступеней замедления;
- обеспечения корректности работы СИ.

Выполнение корректного прогноза амплитуды сейсмической волны невозможно без учета влияния следующих факторов:

- скорость затухания сейсмических волн на пути их распространения от места взрыва к охраняемому объекту;
- латеральная изменчивость грунтовых условий на охраняемой территории.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин А. В. Сейсмическое и акустическое действия буровзрывных работ при строительстве метро /А.В. Адушкин, А.И. Гончаров, В.И. Куликов // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2011. – № 12. – С. 256-266.
2. Адушкин В.В. Подземные взрывы / В.В. Адушкин, А.А. Спивак. – М.: Наука, 2007. – 578 с.: ил.
3. Верхованцев А.В. Методика оценки грунтовых условий // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Десятой Междунар. сейсмологич. шк. / ГС РАН, Респ. Центр сейсмологич. службы при Нац. акад. наук Азербайджана. – Обнинск, 2015. – С. 63-65.
4. Верхованцев А.В. Оценка сейсмического влияния буровзрывных работ на здания и сооружения / А.В. Верхованцев, Д.Ю. Шулаков // Геофизика. – 2014. – № 4. – С. 40-45.
5. Верхованцев А.В. Современный подход к оценке сейсмического воздействия взрывных работ // Четырнадцатая Уральская молодежная научная школа по геофизике: сб. науч. материалов / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2013. – С. 41-45.
6. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. – М.: Недра, 1976. – 271 с.: ил.
7. Садовский М.А. Избранные труды: геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 2004. – 439 с.: ил.
8. Сейсмическая безопасность при взрывных работах: учеб. пособие / В.К. Совмен [и др.]. – М.: Горная книга, 2012. – 228 с.: ил.
9. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах». – М.: Норматика, 2016. – 172 с.

Л.В. НЕКРАСОВА  
*Горный институт УрО РАН*  
**ВЛИЯНИЕ РОТАЦИОННОГО РЕЖИМА ЗЕМЛИ  
НА СЕЙСМИЧНОСТЬ  
НА РУДНИКАХ И ШАХТАХ**

Различные геодинамические процессы, происходящие в земной коре, являются следствием ротационного режима Земли [1]. Нами сделана попытка, выявить количественную связь проявления сейсмоактивности с изменениями скорости вращения Земли. Выполнены исследования сезонных особенностей техногенных сейсмических процессов на примере четырех различных месторождений, три из которых расположены на Урале – Кизеловский угольный бассейн, Верхнекамское месторождение калийных солей, Североуральский бокситовый рудник, и одно, – в Сибири (в Горной Шории) – Таштагольское железорудное месторождение. Благодаря накопленному богатому материалу, который содержат многолетние каталоги сейсмических событий, был проведен детальный анализ сезонной структуры сейсмических процессов на территории месторождений на различных масштабных уровнях.

Исследования показали, что для Таштагольского железорудного месторождения выделяются три энергетических диапазона, по-разному реагирующих на сезонные изменения скорости вращения Земли. События, принадлежащие диапазону энергий от 300 до 10 000 Дж, реагируют на изменение производной скорости вращения Земли (коэффициенты корреляций варьируется от 0,76 до 0,77). События в диапазонах от 30 Дж до 300 Дж и от 30 000 Дж до  $10^9$  Дж – на полугодовую составляющую скорости. Здесь налицо реализация событий по двум временным законам. Цикл активизации событий, очаги которых реагируют на изменение производной скорости вращения, отмечен в апреле-июле. Активное проявление событий, связанных с полугодовой компонентой, имеет место в марте – апреле и в октябре – ноябре, то есть в периоды, когда скорость вращения Земли имеет минимальные значения. Тесная корреляционная связь полугодовой составляющей скорости вращения Земли и проявления динамических явлений двух различных энергетических диапазонов (от 30 до 300 Дж и от 30 000 Дж до  $10^9$  Дж), отражает одинаковые закономерности в проявлении сейсмического процесса на разных масштабных уровнях.

Слабая сейсмичность Североуральского бокситового рудника разделена на три периода, условно названных пассивный, переходный и активный. В фазе пассивного периода, который наблюдается с 1994 по 2004 годы, регистрируется менее 100 событий в год (с энергией от 10000 Дж и более). В данный период события четвертого энергетического класса (от 10000 до 100000 Дж) хорошо реагируют на изменения ускорения вращения Земли, коэффициенты корреляции составляют -0,66. С 2005 по 2008 год отмечено резкое возрастание сейсмической активности. Теперь на шахтах Североуральского бокситового рудника регистрируется от 161 до 229 событий в год, начиная с 10000 Дж. В период перехода события шестого энергетического класса реагируют на изменение скорости вращения Земли и ее полугодовую составляющую (коэффициенты корреляций -0,72 и 0,78, соответственно). С 2009 по 2017 год количество сейсмических событий уже превышает 400 в год. Исключение составляет 2009 и 2014 год, когда было зарегистрировано 386 и 370 событий. Максимальное количество событий приходится на 2012 год – 728, 2011 – 507 и 2013 – 505. Наиболее многочисленные события четвертого энергетического класса хорошо реагируют на изменения годовой состав-

ляющей скорости вращения, коэффициент достигает  $-0,80$ . Для всех событий данного периода коэффициент составляет  $-0,71$ . События шестого энергетического класса реагируют на изменения полугодовой составляющей скорости (коэффициент равен  $0,70$ ).

Слабая сейсмичность Кизеловского угольного бассейна подчиняется определенным временным закономерностям в циклах своей активизации в течение года. Весь энергетический диапазон сейсмических событий (от 100 до 30000 Дж) в Кизеловском бассейне по результатам анализа может быть разделен на две группы: события с энергией менее 1000 Дж и события с энергией более 1000 Дж. События первой группы связаны положительной корреляцией с изменениями ротационного режима Земли (коэффициент корреляции в пределах от  $0,64$  до  $0,69$ ). События второй группы имеют отрицательную корреляционную связь (от  $-0,62$  до  $-0,79$ ). Таким образом, реализация событий первой группы происходит по одному закону, и период их повышенной активности отмечается в октябре – декабре. По обратному закону происходит распределение во времени событий второй группы, наибольшее их количество наблюдается весеннее время.

Слабая сейсмичность Верхнекамского месторождения имеет свой сезонный характер проявления. Для него характерна связь в реализации динамических явлений в энергетическом диапазоне от 3 до 10 000 Дж с годовыми вариациями скорости вращения Земли. Период активизации микросейсмического процесса отмечен в марте – апреле. Выделен также узкий диапазон событий с более высокими энергетическими характеристиками (от 10 000 до 30 000 Дж). Коэффициент корреляции с изменением производной скорости вращения составляет  $0,77$ . Период их активного проявления отмечен с апреля по июнь. Наибольшее их число произошло в первую половину года с февраля по июль месяц.

Итак, выполненные исследования свидетельствуют о существовании четко выраженной сезонной структуры микросейсмического процесса. Важно отметить, что эффект неравномерного вращения Земли наиболее рельефно проявляется для событий определенных энергетических уровней. Если при анализе событий не учитывать их масштабный уровень, то взаимосвязь между двумя процессами в ряде случаев получить весьма проблематично.

Проведенное нами сравнение распределений сейсмичности в течение года для четырех различных месторождений полезных ископаемых Урала и Горной Шории с сезонными вариациями скорости суточного вращения Земли показывает, что сейсмическая активность существенно возрастает в периоды замедления вращения Земли. Поскольку при уменьшении скорости вращения энергия вращающегося тела становится меньше, то разность энергий может высвободиться, в том числе в виде сейсмических событий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли – М.: Наука, Физматлит, 2002. – 380 с.: ил.

И.А. САНФИРОВ, А.В. НЕЖДАНОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ОЦЕНОК  
ТЕХНОГЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПОРОДНОГО МАССИВА**

Направления сейсмических исследований для действующих горнодобывающих предприятий достаточно разнообразны – от прогноза локальных особенностей строения породного массива до контроля изменчивости его строения и свойств. Подобная изменчивость может быть вызвана, как плановой разработкой, так и неплановыми ситуациями вплоть до аварийной. В подобных случаях наиболее актуальными являются вопросы пространственно-временного прогноза возможных негативных тенденций в изменении строения и свойств горных пород в пределах контролируемой территории. Получение решения такого рода вопросов возможно по сейсморазведочным данным. С этой целью наиболее устойчивыми представляются процедуры кинематического анализа волнового поля в интервалах геологического разреза, соответствующих его разрешающей способности.

С целью проверки данного предположения выполнен ретроспективный анализ временной изменчивости кинематических параметров сейсмического волнового поля в пределах участка аварии на шахтном поле СКРУ-2 в течение 2017 г. Сопоставление результатов скоростного анализа с данными сейсмологических и электроразведочных мониторинговых наблюдений показывает наличие определенных пространственно-временных закономерностей. На рис.1,2 представлены примеры оценки временной изменчивости скоростей распространения упругих волн для исследуемых интервалов геологического разреза, кажущихся сопротивлений для разносов питающей линии в 50-100-200 м и распределения эпицентров сейсмических событий для конкретного временного промежутка. Из сопоставления представленных схем очевидно, что положение большинства сейсмических событий для представленных этапов мониторинговых наблюдений хорошо согласуется с участками негативных изменений скоростей распространения упругих волн в интервалах нижней части соляно-мергельной и верхней части продуктивной толщи (ОГ ВС-Ек-Сил).

Для вышележащих интервалов терригенно-карбонатной (ТКТ) и соляно-мергельной (СМТ) толщ отмечается сопоставимость негативной скоростной изменчивости с изменчивостью кажущихся сопротивлений. Наиболее тесная связь отмечается для интервала соляно-мергельной толщи при разносах питающей линии 50м и 100м. Подобное согласование, вероятно отражает усиление негативных гидрогеологических процессов в терригенно-карбонатной толще за счет процессов дезинтеграции породного массива в нижележащем интервале соляно-мергельной толщи.

Представленные результаты доказывают объективность и информативность сейсморазведочных интегральных оценок изменчивости свойств породного массива в пределах аварийного участка в течение 2017 г. Эти данные об изменениях скоростей распространения упругих волн могут быть использованы для количественных прогнозов закономерностей распределения общей пустотности породного массива в пределах исследуемого интервала глубин (рис. 3). С этой целью применяется формула средней скорости для двухфазной модели среды, где одна из фаз – пустота, а вторая нормальный массив.

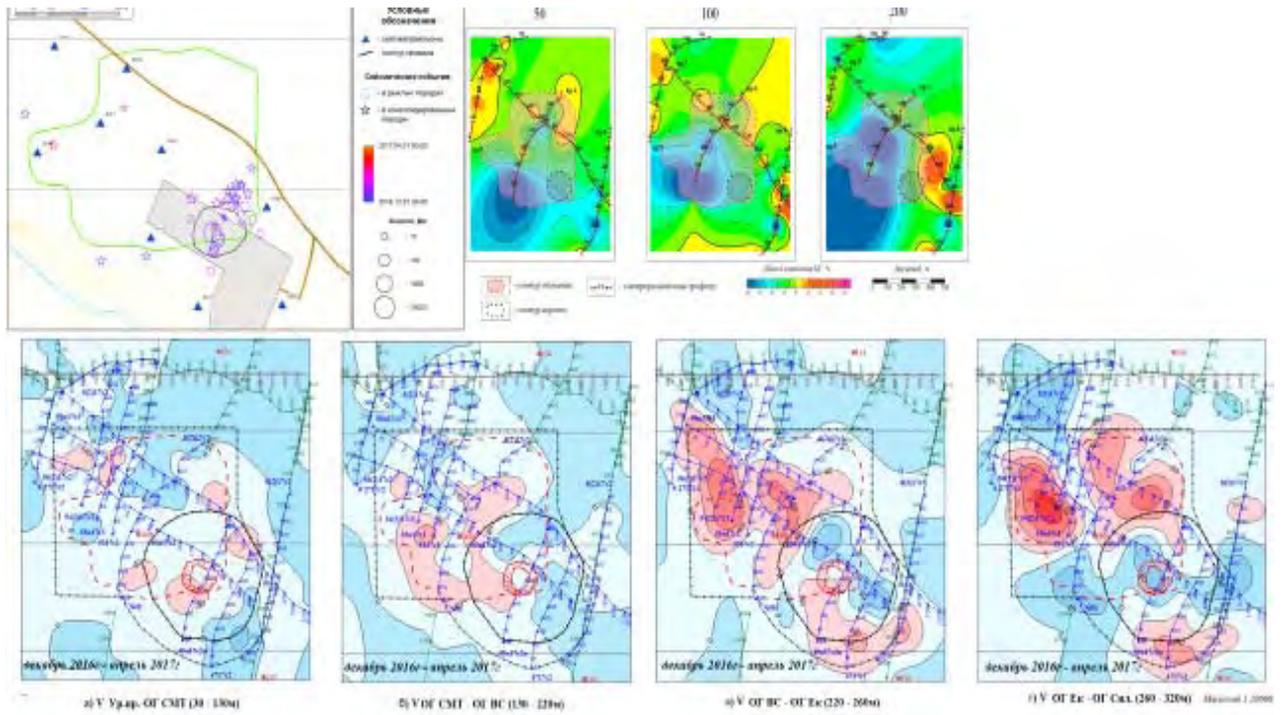


Рис. 1. Декабрь 2016 г. – апрель 2017 г.

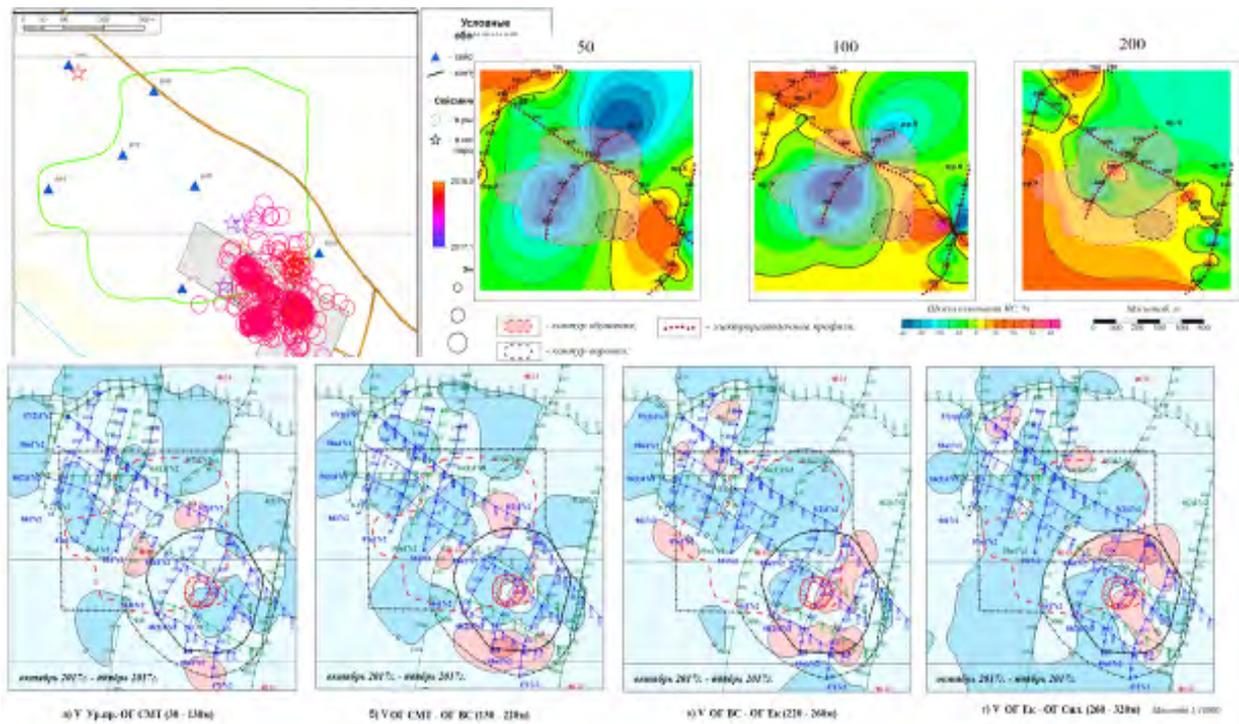


Рис. 2. Октябрь 2017 г. – ноябрь 2017 г.

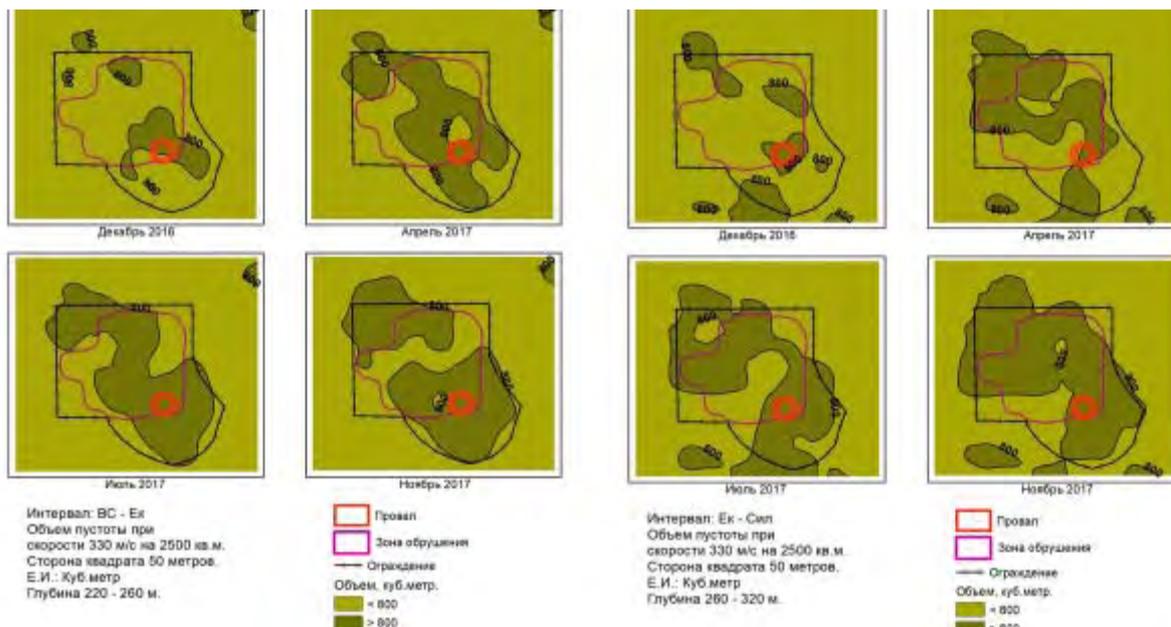


Рис. 3. Распределение вероятной пустотности для интервалов BC-Ек-Сил

Для всех рассматриваемых интервалов развитие вероятной пустотности ориентировано с юго-востока от провальной воронки на северо-запад в район потенциально-опасного участка. Подобное развитие событий предполагалось в [1] при разработке физико-геологической модели аварийного участка, где по кровле СМТ и ВС выделено руслообразное понижение структурных отметок аналогичного простираения

Динамика развития процессов дезинтеграции породного массива в пределах аварийного участка может быть проиллюстрирована с помощью временной изменчивости общего объема вероятной пустотности для всех рассматриваемых интервалов (рис. 4).

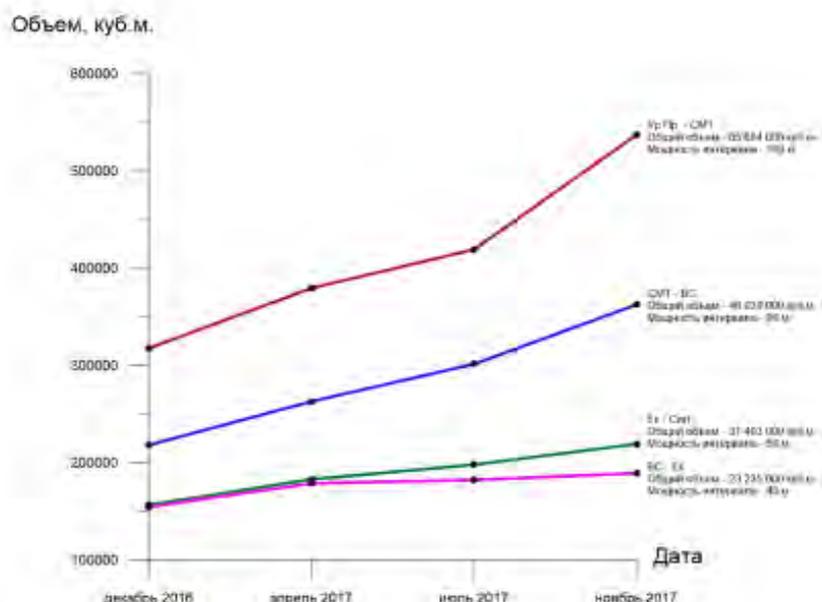


Рис. 4. Изменчивость вероятной пустотности в 2017 г.

Из общей тенденции нарастания рассматриваемого параметра для всего разреза в целом, несколько выпадает интервал BC-Ек, испытывающий наибольшее влияние тампонажа. При этом можно отметить нарастание интенсивности изменений со временем.

В абсолютном исчислении на сегодняшний день общая вероятная пустотность составляет менее 1% от общего объема породного массива в рассматриваемых интервалах геологического разреза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Построение детальной геолого-геофизической модели аварийного участка СКРУ-2: отчет по договору № 108/2014 от 26.12.2014 г. с ПАО "Уралкалий". В 2 кн. и 1 папке. Кн. 1. Текст; Кн. 2. Приложения / ГИ УрО РАН; рук. И.А. Санфиоров. – Пермь, 2015. – 73 с.

УДК 550.834

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.52

А.Г. ЯРОСЛАВЦЕВ

*Горный институт УрО РАН*

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ 3D НА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ УЧАСТКАХ ВКМКС**

Имеющийся на сегодняшний день технический задел и штатная укомплектованность в ГИ УрО РАН, позволяют утверждать о производственной возможности реализации технологий объемной сейсморазведки 3D применительно к условиям ВКМКС практически на любых этапах его освоения.

В предыдущих исследованиях [1, 2] показано, что объемы трудовых затрат на производство полевых работ по технологии 3D в рамках комплекса малоглубинной сейсморазведки, адаптированного для сейсмогеологических условий Верхнекамского месторождения, примерно в 3 раза больше, чем площадные технологии 2D с оптимальной плотностью. Трудозатраты камерального этапа и обработки данных 3D, которые традиционно составляют не менее половины от общих, соотносятся с 2D примерно в той же пропорции.

В итоге общие затраты на проведение 3D сейсморазведки в сравнении с затратами на проведение 2D сейсморазведки с оптимальной плотностью наблюдений на равной по площади территории будут выше минимум в 3 раза. Такая оценка вполне соответствует принятому в нефтегазовой сейсмике, соотношению цены 1 (п.км 2D) к 15 (кв.км 3D). При этом надо понимать, что в пределах урбанизированных территорий Березниковско-Соликамской агломерации, могут возникать объективные затраты, связанные с получением разрешений землепользователей, расчисткой и подготовкой профильных линий с привлечением спецтехники, необходимостью высокоточной топопривязки точек наблюдений специализированными отрядами.

С точки зрения геолого-геофизической эффективности, полученные ранее результаты [2, 3] показывают высокую информативность 3D сейсморазведки при выявлении локально-обособленных неоднородностей геологического разреза, существенно влияющих на основные закономерности в распределении структурно-физических параметров ВЗТ. Данные закономерности успешно определяются и по площадной 2D сейсморазведке при оптимальной плотности наблюдений.

Методика полевых работ 3D адаптированная для сейсмогеологических условий ВКМКС имеет следующие основные параметры: количество активных каналов в шаблоне – 288, шаг дискретизации – 0,5 мс, длина записи – 1500 дискрет, усиление 64 Дб. Расстояние между пунктами приема – 8 м, возбуждения – 16 м. Расстояние между ли-

ниями приема – 64 м, расстояние между линиями возбуждения – 64 м. Размер бина 8x8 м. Преобладающая кратность – 30.

Для сбора сейсморазведочных данных в пределах одного шаблона потребовалось одновременное использование 18 удаленных 16-ти канальных телеметрических модулей «IM 2416 SESMO DAS», что в 4.5 раза больше, чем необходимо для наблюдений 2D. В связи с поверхностными условиями и достаточно большим максимальным удалением ПВ-ПП предпочтительным является использование импульсного порохового источника колебаний.

С методической точки зрения основную сложность при выполнении пространственной сейсморазведки на потенциально-опасных участках представляет нахождение компромисса между требуемой оперативностью получения результата и тщательным и максимально корректным планированием системы наблюдений 3D.

На рисунке 1 приведено распределение кратности наблюдений на двух различных участках сравнимой площади. С точки зрения основных параметров обе системы наблюдений практически одинаковы. Расстояние между пунктами приема – 8 м, возбуждения – 16 м. Расстояние между линиями приема – 64 м, расстояние между линиями возбуждения – 64 м. Размер бина 8x8 м. Основные различия заключаются в обработке единичного шаблона. В 2018 году шаблон обрабатывался в максимально быстром варианте. Смещение линий приема колебаний производилось с наименьшим перекрытием по inline и практически без перекрытия по crossline. При этом при каждом смещении линий приема в шаблоне повторялось до 40 пунктов возбуждения (рис. 2).

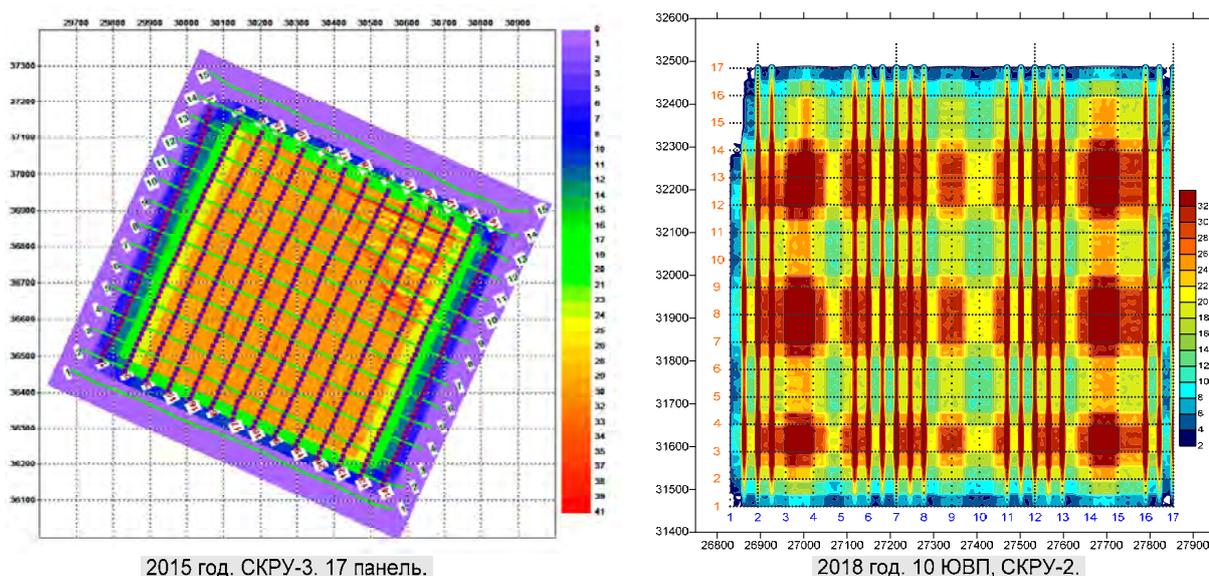


Рис. 1. Распределение по площади кратности наблюдений (бин 8x8 м)

Кроме требуемой оперативности (3 недели на полевой этап) представленная пространственная система наблюдений преследовала цель формирования по результатам работ четырех профилей 2D с оптимальной для данного участка кратностью. Для этого наряду с широтным направлением линии ПП располагались в меридиональном направлении. Данные профильные линии использовались как заверочные при дальнейшей обработке и интерпретации. Также они позволили выполнить разнонаправленный расчет статических поправок и построить более корректную карту их распределения (рис. 3).

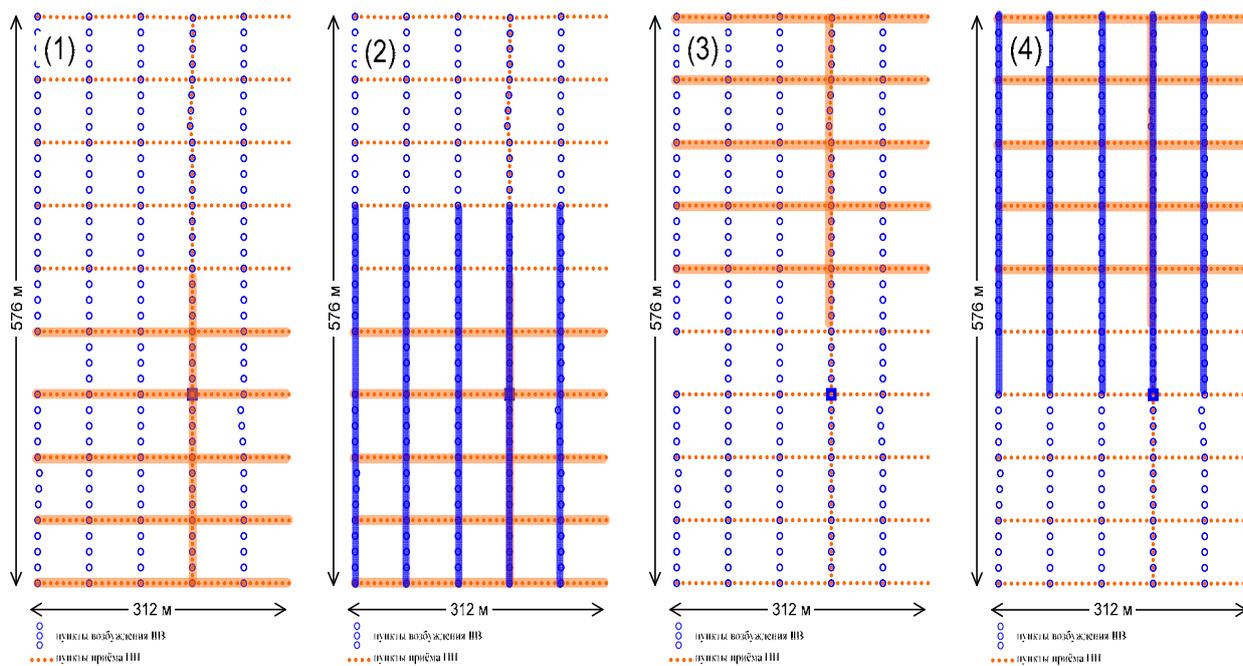


Рис. 2. Последовательность обработки максимального шаблона наблюдений в 2018 году: 1 – активные линии ПП, 2 – обработка линий ПВ, 3 – смещение (перенос) активных линий ПП, 4 - обработка ПВ с частичным повторением

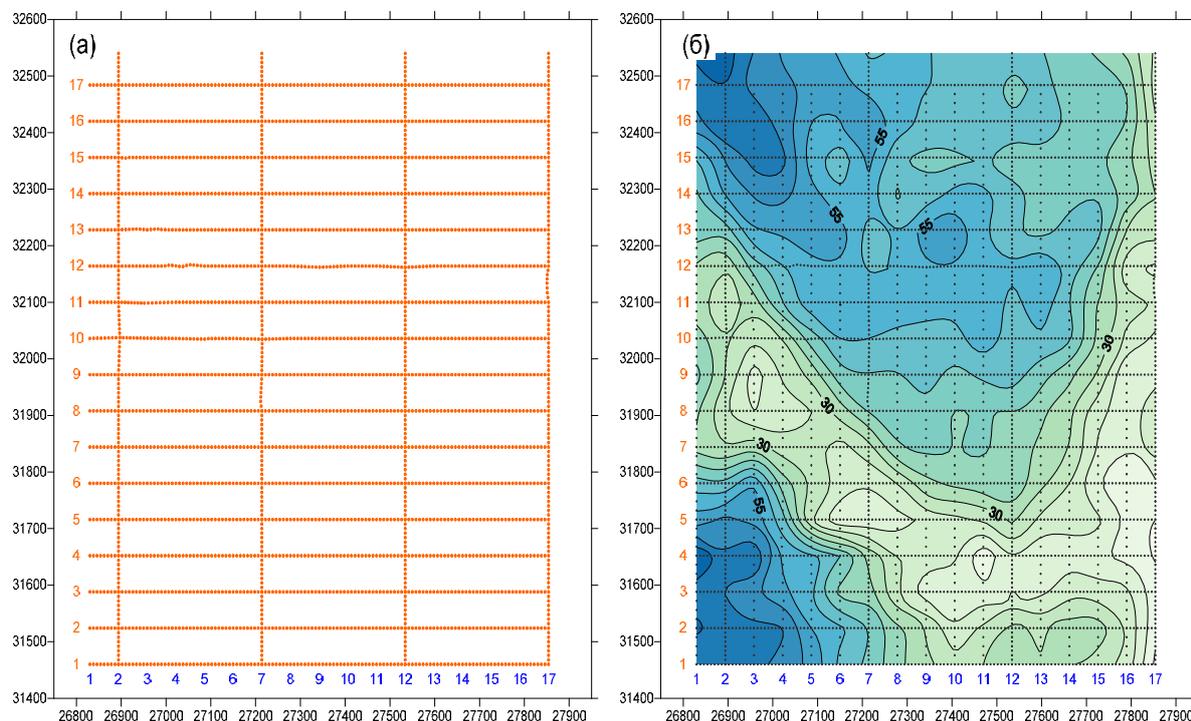


Рис. 3. Расчет статических поправок:  
 а) сформированные линии профилей 2D для расчета статики,  
 б) карта статических поправок

Полученная неравномерная кратность наблюдений по площади обусловила появления артефактов при пространственной фильтрации и предопределила значительные ошибки при скоростном анализе. В связи с этим предложено новое программное решение по расчету скоростных спектров по ансамблям трасс пространственных супербинов в идеологии регулируемого направленного анализа [4].

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы. При постановке малоуглубинных сейсморазведочных работ 3D требуется более тщательное планирование пространственных систем регистрации с учетом сейсмогеологических особенностей каждого потенциально-опасного участка в отдельности. Необходимо повышение кратности наблюдений (до 32-64) на уровне горизонтов ВС, СМТ и выше за счет уменьшения шага наблюдений и увеличения (в 2 раза) плотности профилей ПП и ПВ. В этом случае повышение оперативности обработки площади и равномерности распределения кратности возможно только за счет увеличения числа активных каналов в шаблоне. Это в свою очередь требует приобретения (или разработки) специализированных (не «нефтяных») современных телеметрических систем регистрации и увеличения технического персонала на полевом этапе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ладейщиков С.В. Проектирование системы наблюдений 3D для малоуглубинной высокоразрешающей сейсморазведки // Горное эхо. – 2011. – № 3 (45). – С. 19-22.
2. О перспективах малоуглубинной сейсморазведки 3D на Верхнекамском месторождении солей / И.А. Санфиоров, А.Г. Ярославцев, А.А. Жикин, С.В. Глебов, Герасимова И.Ю. // Геофизика. – 2015. – № 5. – С. 6-11.
3. Ярославцев А.Г. Инженерная сейсморазведка 3D на подработанной территории / А.Г. Ярославцев, В.Ю. Бобров, А.А. Жикин // Инженерная геофизика 2017: материалы 13-й науч.-практ. конф. и выставки. – Кисловодск, 2017. – DOI 10.3997/2214-4609.201700411. – Электрон. изд. режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=88132>
4. Идеи А.К. Урупова в скоростном анализе данных малоуглубинной сейсморазведки / И.А. Санфиоров, А.А. Жикин, А.Г. Ярославцев, А.И. Бабкин // Геофизика. – 2013. – № 5. – С. 12-16.

УДК 550.834

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.53

А.И. НИКИФОРОВА

*Горный институт УрО РАН*

#### **ТОЧНОСТЬ СТРУКТУРНЫХ ПОСТРОЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАЛОУГЛУБИННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Для резервных участков Верхнекамского месторождения калийных солей результаты бурения являются единственным прямым источником информации о строении и свойствах породного массива. Данные геологоразведочных скважин позволяют объективно верифицировать результаты дистанционных методов исследований, таких, как сейсморазведка.

Анализ достоверности малоуглубинных сейсмических исследований выполнен для северо-западной неотрабатанной части месторождения (Половодовский участок). Опорными данными для интерпретации материалов сейсморазведки послужили результаты бурения 145 скважин. Плотность бурения составляла 0.406 скв/км<sup>2</sup>. Среднее расстояние до профиля - 580 м. Согласно имеющейся информации в соляной толще выделяется ряд тектонических элементов. Харюшинский купол с сохранившейся от выщелачивания калийной залежью целиком попадает на площадь участка детальной разведки. Восточнее выделен Осокинский прогиб, включающий Осокинскую и Чуринскую брахисинклинали и граничащий на востоке с Малосурмогским поднятием. К западу от Харюшинского закартировано Клестовское поднятие.

Переходная пачка (ПП) довольно широко развита в пределах Осокинской синклинали и отсутствует на поднятиях. Мощность изменяется от 0 до 80 метров. Покровная каменная соль распространена на большей площади, чем ПП. Мощность её изменяется от 0 до 30 метров. Наибольшая мощность - на территории Осокинской синклинали. Мощность карналлитовой зоны колеблется от 0 до 130 м. Максимальные значения приурочены к северной части Клестовского и Харюшинского куполов, на самих куполах отсутствует. Мощность сильвинитовой зоны колеблется от 0 до 30 м. Максимальная мощность приурочена к Харюшинскому куполу, на остальных куполах отсутствует.

В пределах площади работ в соляных и надсоляных отложениях присутствует разрывная тектоника [2]. На северо-востоке, вкрест простирания Осокинской брахисинклинали в интервале соляно-мергельной толщи предполагается Камынинский сдвиг-надвиг. На западном, более крутом, склоне Харюшинского поднятия, предполагается структурный аналог Троицкого надвига. Южнее прогнозируется прохождение еще двух сдвиговых плоскостей.

Малоуглубинные сейсморазведочные исследования проводились в 2009-2011 гг. В результате - построены структурные, скоростные и интерпретационные схемы, отражающие строение надсоляной и соляной толщ. Выявлены и закартированы зоны, отличающиеся по упругим свойствам от вмещающего массива пород. По комплексу сейсморазведочных параметров выделяется четыре основные группы интерпретационных геологических моделей: зоны интенсивной складчатости; низкоскоростные вертикальные структурные несогласия; локальные структурные и литолого-фациальные неоднородности; горизонтальные структурные несогласия, отражающие участки значимых структурных градиентов отражающих границ.

При последующем геологическом доизучении участка осуществлено бурение еще порядка 30 геологоразведочных скважин, что дало необходимую информацию для оценки характера погрешностей данных сейсморазведки. Сопоставление структурных планов отражающего горизонта (ОГ) Сил, приуроченного к кровле сильвинитовой пачки, до и после бурения новых скважин приведено на рис. 1.

В целом, несмотря на сложные сейсмогеологические условия, значительное расстояние между скважинами и профильными линиями (в среднем - 500 м) строение структур и их морфометрия по опорным отражающим границам изменились незначительно. Понизился гипсометрический уровень структурных поверхностей и увеличилась амплитуды.

Сопоставление абсолютных отметок залегания ОГ по данным сейсморазведки и бурения выполнено на основе теории вариационных рядов [1]. Они построены по распределению погрешностей определения глубины залегания первых пластов каменной соли в подошве соляно-мергельной толщи (BC), карналлитового пласта E (Ек) и сильвинитовой пачки (Сил.) (рис. 2).

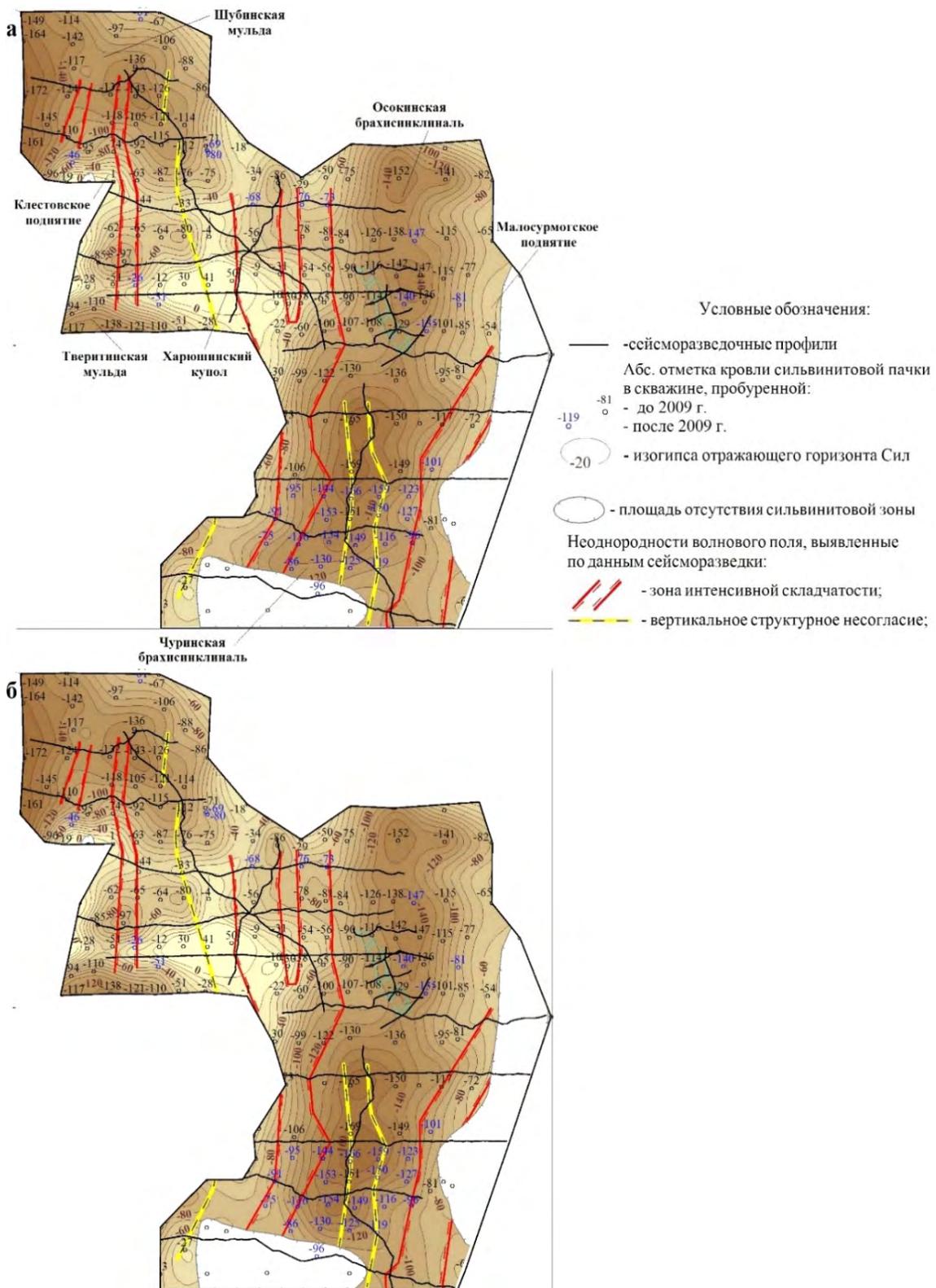


Рис. 1. Сопоставление данных сейсморазведки (ОГ Сил) до(а) и после бурения (б) геологоразведочных скважин

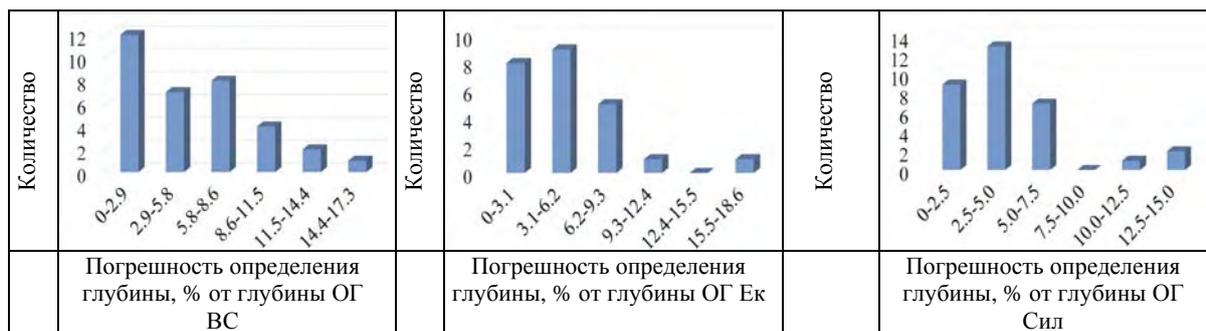


Рис. 2. Погрешность определения глубины залегания отражающих горизонтов по данным сейсморазведки

Как видно из приведенных данных, в основном, значения невязок не превышают 5% от глубины залегания ОГ. Тем не менее, для каждого интервала существуют повышенные значения. Как правило, они обусловлены двумя основными факторами: значительным расстоянием между скважиной и профилем (более 400 м) и литологическими неоднородностями разреза.

Так, в скважине, вскрывшей ОГ ВС на 17% глубже, отсутствует переходная пачка, пласты К-И замещены каменной солью, а Ж-З представлены сильвинитом. 3 скважины, со значениями более 10% удалены от сейсморазведочных профилей на 400 м, 500 м и 1000 м. В них выявлен сильвинитовый состав и замещение каменной солью пластов карналлитовой зоны.

Невязка 17% установлена для ОГ Эк в скважине, пробуренной в 400 м от профиля. Она вскрыла глинисто-гипсовую шляпу (нижняя часть СМТ, ПКС и верхняя часть карналлитовой пачки).

Максимальная ошибка определения глубины залегания ОГ Сил - 15.0 % – в скважине, вскрывшей полное замещение сильвинитовой зоны каменной солью. Она пробурена в 1000 м от ближайшего профиля. В 450 м от профиля пробурена скважина, установившая кровлю сильвинитовой пачки глубже на 14%, чем предполагалось по результатам сейсморазведки. Она вскрыла: глинисто-гипсовую шляпу (нижняя часть СМТ, ПКС); пласты И-К – каменная соль; Б- сильвинитового состава

Таким образом, точность сейсморазведочных структурных построений в целом не превышает 5 %, при этом, если учесть выделенные осложнения волнового поля, связанные с аномальными особенностями геологического разреза, то средняя точность достигает оценок в 3-4%.

Аномальные участки строения соляной толщи, выделенные по данным сейсморазведки, подтверждаются установленными бурением литологическими неоднородностями разреза в 100% случаев. Четыре скважины, пробуренные непосредственно на профильных линиях вскрыли замещение каменной солью пластов калийной залежи и развитие пестрых сильвинитов в карналлитовой зоне.

Локализация негативных структурных и вещественных изменений соляной толщи наиболее достоверна на участках до 200 м длиной с центром на профильных линиях (размер определяется величиной зоны Френеля на глубине продуктивной толщи  $\approx 100$  м). Этот факт делает невозможным оценить точность выявления аномальных особенностей разреза в остальных скважинах, расположенных на значительном удалении от профилей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Венецкий И.Г. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / И.Г. Венецкий, Г.С. Кильдишев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1975. – 264 с.
2. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с.

А.А. ЖИКИН

*Горный институт УрО РАН*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИДЕОЛОГИИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ  
РАЗНООБЪЕКТНЫХ МАЛОГЛУБИННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ТВЕРДЫХ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Диапазон исследуемых с помощью сейсмоакустических методов объектов достаточно широк: от контроля затюбингового пространства до изучения месторождения полиметаллов, от выделения сантиметровых трещин в бетонных конструкциях до выявления разрывных нарушений в массиве горных пород в интервале глубин до 800 метров. Разнообразие объектов исследований определяет различия в методических подходах при регистрации и обработке данных сейсморазведочных исследований.

Изучаемые объекты можно условно разделить на несколько типов, где глубинность является основным критерием отличия (Табл.1). Выделены четыре основных направления: 1) малоглубинные исследования – изучение месторождения полиметаллических руд (Норильск), выделение алмазоносных рудопроявлений на территории Западной Якутии, задачи контроля за состоянием водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных солей, 2) инженерные исследования – изучение пород верхней части разреза в пределах строительных площадок, действующих гидротехнических сооружений, поиск и картирование зон развития карстовых явлений и т.п., 3) шахтные исследования – изучение строения массива горных пород из внутренних точек среды с целью выявления ослабленных зон, зон замещения и складчатости, для оперативного корректирования плана ведения горных работ и обеспечения безопасной разработки залежи, 4) акустические исследования – работы осуществляются для детального изучения физико-механических свойств грунтовых массивов и бетонных конструкций.

Таблица 1

Характеристики сейсморазведочных исследований  
методом отраженных волн в модификации ОГТ

	<b>Малоглубинные исследования</b>	<b>Инженерные исследования</b>	<b>Шахтные исследования</b>	<b>Акустические исследования</b>
<b>Глубинность</b>	до 800 метров	до 100 метров	до 100 метров	Первые метры
<b>Полоса частот полезного сигнала</b>	40-300 Гц	100-500 Гц	100-800 Гц	4-20 КГц
<b>Шаг ПВ-ПП</b>	4-8 метров	1-2 метра	2 метра	4-20 см
<b>Шаг дискретизации</b>	0,2-0,5 мс	0,1-0,2 мс	0,1 мс	33 мкс
<b>Длина записи</b>	до 2000 дискрет	до 2000 дискрет	до 2000 дискрет	1024 дискреты
<b>Источник упругих колебаний</b>	механизированный молот или пороховой источник	механизированный молот, кувалда или пороховой источник	кувалда	кувалда

Кроме глубинности, различия в параметрах систем наблюдения объясняются масштабом поисковых объектов: чем меньше объект, тем более плотная сеть источников и приемников, тем более высокие частоты регистрируются и тем более высокая дискретность данных необходима для получения объективной информации о изучаемой среде.

Справедливость интерпретационных выводов зависит от корректности получения итоговых результатов цифровой обработки данных – суммарных временных разрезов. Поэтому для начала необходимо определиться с моделью исследуемого объекта и подобрать подходящие параметры регистрации данных таким образом, чтобы в получаемом волновом поле отображались целевые особенности объекта исследований.

После регистрации данные поступают в обработку и проходят все стадии преобразования сигнала, представленные в обобщенном графе цифровой обработки (Рис.1), но для каждого конкретного объекта существуют различия на тех или иных этапах обработки.

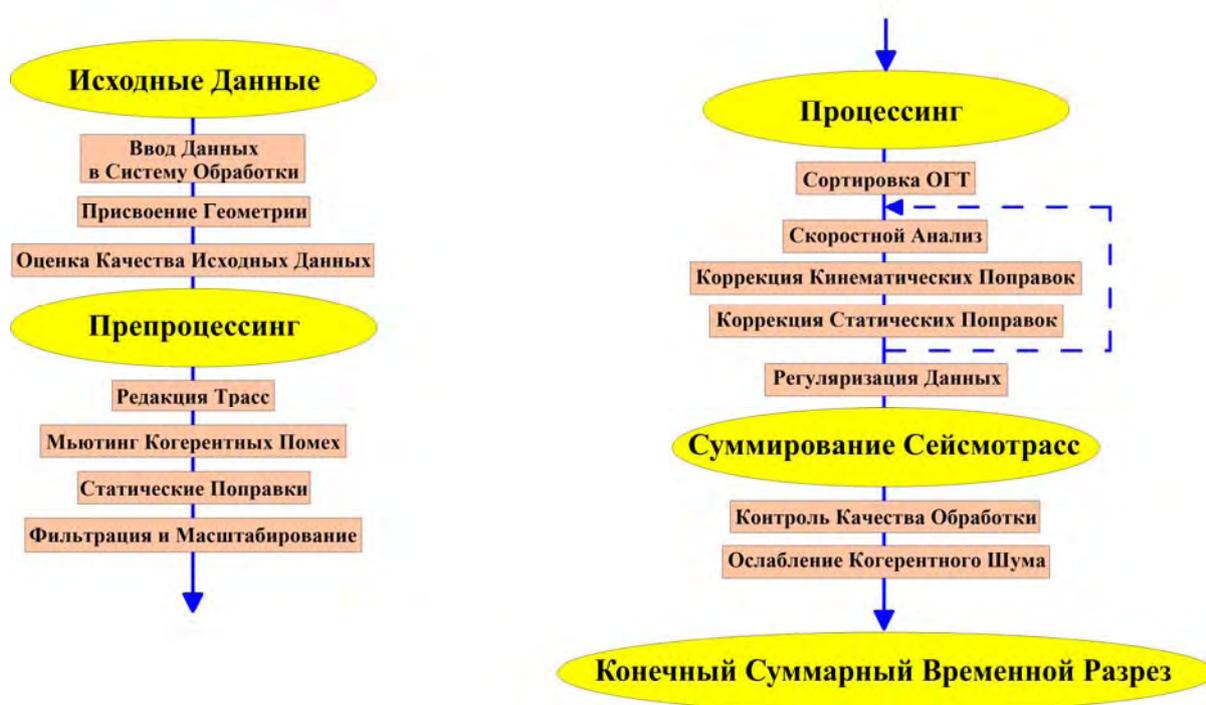


Рис. 1. Обобщенный граф цифровой обработки данных сейсморазведки МОВ ОГТ

Первый этап – ввод данных в систему обработки, основной целью которого является формирование входного потока информации, присвоение геометрии, проверка данных на корректность. Допущение ошибок на данном этапе приводит к полному или частичному обнулению части записи.

Следующий этап – оценка качества исходных данных. Первичная оценка данных выполняется на стадии регистрации, выявляются факторы, препятствующие получению высококачественной информации, будь то некорректные параметры регистрации, неисправность оборудования или неблагоприятные условия возбуждения или приема сигнала. Зачастую представленные виды исследований выполняются в условиях высокого техногенного шума (вибрации от работающих агрегатов, электрические наводки, интенсивное движение транспорта), который не позволяет однозначно оценить качество регистрируемы данных в поле, т.к. для этого требуется определенная предобработка и расчет количественных параметров. К ним относятся регистрируемый уровень амплитуд, час-

тотный состав записи и отношение сигнал-помеха [1]. Кроме того, оператор должен контролировать бракованные записи и по возможности их избегать, наиболее критична отбраковка трасс при инженерных исследованиях с малым набором кратности.

Важным критерием при принятии материалов – является прослеживание преломленной волны на всей длине расстановки, особенно при малоглубинных наблюдениях, так как на основе данных волн рассчитываются статические поправки.

На стадии оценки качества исходного материала строятся разночастотные представления исходного волнового поля с целью выделения целевых отражений, так как в случае работ МОГТ любые волны (поверхностная, звуковая, дифрагированные, обменные, кратные), кроме однократно отраженных, являются помехой и снижают итоговое значение отношения сигнал/помеха. Поэтому визуальный анализ волновой картины на необработанных данных возможно является первоочередной задачей ввиду того, что дальнейшая обработка будет направлена на подавление волн, принятых за помеху, и увеличение когерентности целевых волн, принятых за однократно отражения. В случае рассматриваемых исследований этот процесс разделения является наиболее критичным ввиду высокой степени интерференции всех видов и типов волн в области регистрации целевых отраженных событий [3].

После ввода данных, присвоения геометрии, оценки качества исходного материала и принятия решения о его принятии к дальнейшей обработке переходим к следующим этапам – препроцессингу и процессингу сигнала. На данных этапах появляются существенные отличия в объективности применения тех или иных процедур в зависимости от типа исследования.

Основная задача преобразования сигнала – это увеличение отношения сигнал/помеха, достигается 3-мя основными способами: 1) ослабление энергии помех в области, где сигнал и помеха могут быть разделены (мьютинг, пространственная и частотная фильтрация), 2) коррекция пространственных и временных сдвигов (статические поправки и миграционные преобразования), 3) суммирование по ОГТ.

Теоретически при осуществлении суммирования отношение  $S/N$  увеличивается в корень из  $N$  раз. Это объясняется тем, что каждая трасса в сейсмограмме ОГТ имеет некогерентный шум, который при суммировании ослабляется за счет конструктивной интерференции, а полезный сигнал усиливается в корень из  $N$  раз [2]. Подобное условие выполнимо только в идеальных условиях, когда полезный сигнал во много раз преобладает над помехами, а на практике, зачастую, кроме когерентных отраженных событий на сейсмограммах ОГТ мы так же имеем когерентный шум, который в таком случае при суммировании будет усиливаться с увеличением кратности и деструктивно влиять на целевой отраженный сигнал, что характерно для малоглубинных и инженерных исследований МОГТ.

Особое внимание следует уделять процедурам регуляризации сигнала при обработке данных представленных сейсмических наблюдений, особенно в случае пониженной кратности и малых значений отношения сигнал/помеха исходного волнового поля. Это обстоятельство связано с тем, что когерентные фильтры могут сильно изменить структуру волнового поля, поэтому требуется тщательный подбор параметров в зависимости от объекта изучения, наличия характерных особенностей волнового поля (прерывистость осей синфазности, их выдержанность по интенсивности и наклону), характеристик малых глубин и специфики шахтных наблюдений.

Таким образом, выполняя обработку данных сейморазведочных исследований МОГТ, невозможно выделить универсальных граф цифровой обработки исходного сигнала и каждый конкретный этап требует пообъектной адаптации согласно конкретным условиям регистрации и приёма, уровня помех и модели изучаемого участка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности цифровой обработки в инженерной сейсморазведке МОГТ / И.А. Санфилов, А.Г. Ярославцев, А.А. Жикин, А.И. Никифорова, Т.В. Байбакова // Геофизика. – 2012. – №5. – С. 35-41.
2. Степанов А.В. Обработка сейсмических данных: учеб.-метод. пособие. – Казань: Казанский университет, 2013. – 24 с.
3. Gregory S. Baker. Processing near-surface seismic-reflection data: a primer. – Society of Exploration Geophysicists, 1999. – 77 p.

УДК 550.834

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.55

И.Ю. ГЕРАСИМОВА  
*Горный институт УрО РАН*  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ  
ДЛЯ УСЛОВИЙ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

Методы математического моделирования для решения прямых задач сейсморазведки широко применяются примерно с середины 60-х годов 20 в. Синтетические сейсмограммы, являющиеся результатом решения одномерной задачи, используются для изучения процессов формирования однократных волн различных классов и определения эффектов, связанных с изменениями структуры и/или свойств толщ горных пород.

К концу 80-х годов 20 в. в практику интерпретации вошло двумерное сейсмическое моделирование, позволяющее синтезировать временные разрезы, что позволило воспроизводить реальную траекторию пробега сейсмических волн и понимать причины отображения определенных структурных форм (структурное моделирование), получать оценку влияния различных факторов, связанных с изменениями свойств пород, на динамические характеристики сейсмической записи (стратиграфическое моделирование), а также оценивать влияние изменения кривизны границ и градиентов скоростей в многослойных средах (моделирование сейсмических скоростей).

Современные системы моделирования являются многопараметрическими и позволяют с высокой степенью точности имитировать дополнительные сейсмические эффекты распространения волновых полей для максимально приближенных к реальности глубинных моделей. Вычислительный модуль "Tesseral-2.5D-3C" (Tesseral Technologies Inc., Канада) позволяет моделировать сложные сейсмогеологические условия на основе решения конечно-разностных 3D уравнений в предположении постоянства параметров среды вдоль одной из осей.

Рассмотрим в качестве примера результаты использования вычислительного модуля, полученные с целью изучения особенностей распространения сейсмических волн в условиях Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей.

Осадочная толща месторождения по вертикали характеризуется чередованием тонкослоистых прослоев, залегающих в разных интервалах разреза, с относительно мощными однородными пластами. В латеральном направлении области крайне сложного залегания слоев чередуются с участками более выдержанного горизонтально-слоистого строения. Неоднородность структуры и состояния месторождения определяется наличием различных природных (неполный или переходный типы ВЗТ, зоны деформаций, трещиноватость, дробление, зоны замеще-

ния, др.) и техногенных (отработка продуктивных пластов, нагрузка сооружений на недра, др.) особенностей. Указанные факторы сложным образом интегрируют между собой, изменяя параметры проходящих сейсмических волн, и влияют на волновую картину в целом.

Временной разрез, представленный на рис. 1, сформирован для модели с плоскопараллельными границами раздела между слоями с однородным и градиентным распределением скоростей продольных и поперечных волн в толщах пород. Интервал продуктивной толщи (глубины 200 - 286 м от дневной поверхности) характеризуется тонкой слоистостью пластов, наличие которых приводит к регистрации устойчивых интерференционных волн (рис. 1). В реальных условиях явление интерференции в интервале продуктивных пластов осложняется влиянием большого количества дополнительных факторов, что значительно затрудняет корреляцию целевых горизонтов. Границы вышележающих и подстилающих толщ пород характеризуются на временном разрезе устойчивыми контрастными осями синфазности.

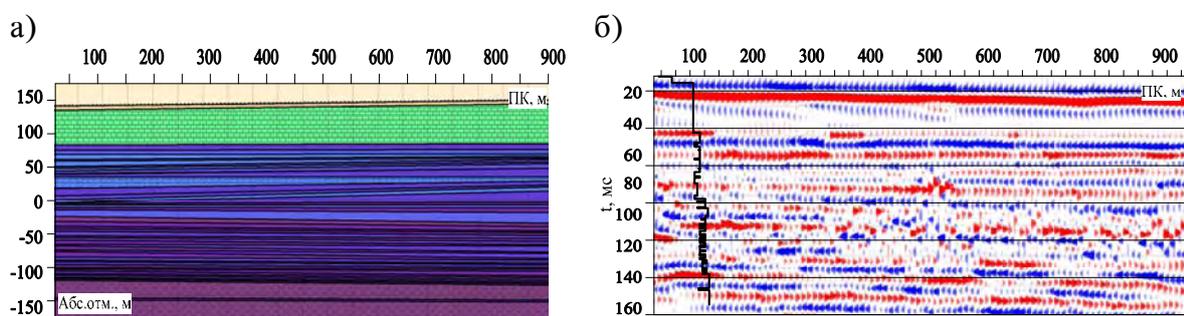


Рис. 1. Сейсмогеологическая модель разреза с интервалом тонкослоистых пластов (а), синтетический временной разрез (б)

Как указывалось ранее, для разреза Верхнекамского месторождения солей типично присутствие неоднородностей различной природы, размеров, формы и свойств. Многопараметрическое полноволновое моделирование использовано в целях формирования наглядного представления волновых картин "базовых объектов" (рис. 2).

Полученные материалы позволяют сделать вывод о значительно более сложном отображении неоднородностей в синтетических полях, сформированных на основе решения системы конечно-разностных уравнений, приближенной к реальным условиям, с учетом эффектов обмена, поглощения, затухания, перераспределения энергии на границах и т.д. Общая черта разрезов, полученных с использованием полноволнового уравнения - слабая контрастность и интерференция отражений непосредственно в области неоднородности и в зоне ее влияния. Объединение воздействий различных факторов затрудняет конкретизацию проявлений локальных объектов в сейсмической картине даже на этапе решения прямой задачи сейсморазведки. С другой стороны, моделирование при условии распространения в разрезе только энергии однократных монотипных волн позволяет сформировать набор признаков наличия в синтетическом поле локальных неоднородностей (своеобразие формы проявлений, изменение динамической выразительности, разрывы и скачки осей синфазности волн). Подобные признаки свойственны и временным разрезам, при расчете которых учитывалось значительное количество параметров. Именно совокупность указанных характеристик требует повышенного внимания при интерпретации реальных данных.

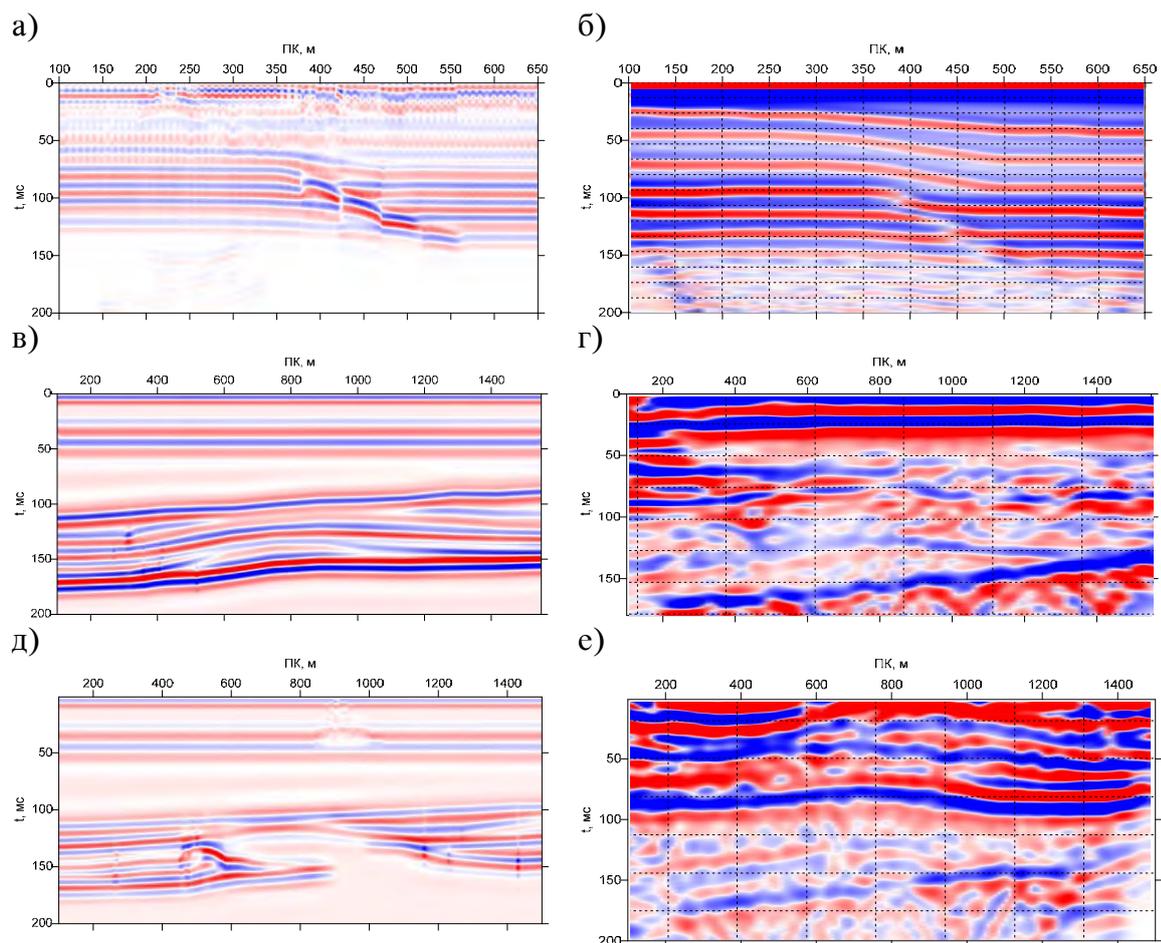


Рис. 2. Синтетические временные "образы" моделей борта прогиба (а, б), зон замещения экранированного (в, г) и сквозного (д, е) типов, сформированные для условий распространения однократных монотипных волн (а, в, д, [3]) и полноволнового моделирования (б, г, е)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с.
2. Комплекс программ Tesseral Geo Modeling: Руководство пользователя. – [www.tesseral-geo.com](http://www.tesseral-geo.com).
3. Фатькин. К.Б. Локализация и идентификация физико-геологических неоднородностей соляной толщи методами сейсмического амплитудного анализа (на примере ВКМКС): автореф. дис. ... канд. техн. наук. 25.00.16: защищена 20.11.08 / Фатькин Константин Борисович. – Пермь, 2008. – 22 с.

В.В. НИКИФОРОВ  
Горный институт УрО РАН  
**ДЕТАЛИЗАЦИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ  
НА УЧАСТКЕ УСКОРЕННЫХ ОСЕДАНИЙ**

На территории одного из соляных рудников ВКМКС в 2014 г произошел провал грунта. В районе провала выполнен комплекс разнообразных исследований. По результатам геофизических наблюдений в пределах исследуемой территории выделены ряд участков с аномальным строением верхней части разреза [4]. Для заверки и уточнения, пробурены скважины с отбором проб на физико-механические исследования. Во время бурения проведены геофизические исследования скважин и опытно-фильтрационные работы в скважинах.

На рисунке 1 представлена схема, на которой можно видеть провал грунта и положение исследуемых скважин.

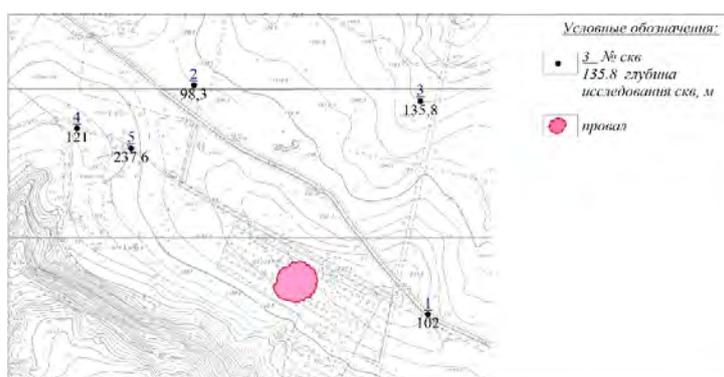


Рис. 1 Схема расположения скважин

Всего на исследование поступило 188 образцов грунта, для которых определялись физические свойства, 112 проб обломочного грунта, определены влажность и гранулометрический состав и 66 проб скального грунта, для которых определены влажность, плотность и сопротивление одноосному сжатию в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии.

**Скважина 1** пробурена в юго-восточной части исследуемой площади до глубины 100,2 м. Пробы в основном представлены дресвой и щебнем известняка и мергеля, на глубине 52,7 м дресва и щебень аргиллита и алевролита. Скальный грунт встречается относительно редко, имеет мощности слоев до 1 м. В целом можно заключить, что вскрытые скважиной породы подверглись весьма значительному техногенному воздействию, что подтверждается сравнительно небольшими суммарными мощностями скального грунта и наличием глинистого заполнителя в обломочных грунтах.

**Скважина 2** пробурена до глубины 98,3 м в северной части исследуемой площади и расположена между скважинами 3 и 4 в непосредственной близости к провалу. Разрез скважины представлен в основном обломочным материалом – щебнем и дресвой известняков и мергелей. Обломочный грунт переслаивается скальными и полускальными известняками и мергелями небольшой мощности (2-3 м). Встречены две пачки скального малопрочного и пониженной прочности известняка и мергеля на глубине 52,8-62,0 м. В целом можно заключить, что породы, вскрытые скважиной 2, а, как и породы скважины 1, подверглись весьма значительному техногенному воздействию, что

подтверждается сравнительно небольшими суммарными мощностями скального грунта, прочность и плотность которого с глубиной уменьшается и наличием глинистого заполнителя в обломочных грунтах.

**Скважина 3** находится на северо-востоке площади, пробурена до глубины 135,8 м. Разрез скважины представлен глинистым грунтом с небольшими прослоями песка мелкого и средней крупности до глубины 19,3 м, далее наблюдается разрез, представленный обломочным материалом, чередующийся со скальными слоями известняков. На глубинах с 19,3 в до 135,8 м четко выделяются 4 пачки известняков. Предварительный анализ разреза этой скважины позволяет сделать заключение о наиболее благоприятной ситуации по сравнению со скважинами 1 и 2. Это обусловлено сравнительно большой долей в разрезе скального грунта, который характеризуется более высокими значениями сопротивления одноосному сжатию.

**Скважина 4** расположена на северо-западе площади и пробурена до глубины 121 м. Исследование проб скважины 11, а позволяет охарактеризовать разрез с глубины 15,3 м до 121,0 м как чередование скальных и обломочных грунтов. Глинистые грунты в разрезе практически отсутствуют за исключением глубины 35,4 -37,3 м, где пробы представлены туго и мягкопластичными суглинками и глинами. Скальные грунты представлены известняками и мергелями. Происходит снижение прочности скального грунта с глубиной. Однако частое переслаивание скального грунта с обломочным по всему разрезу в значительно большей степени характеризует прочностные свойства массива в целом, чем прочность отдельных слоев. По степени ослабленности терригенно-карбонатной толщи разрез этой скважины может быть отнесен к средним показателям между скважинами 2 и 3.

Методика экспертной оценки подработанной территории, более подробно рассмотрена в работах [1,2,3].

На рис.2 представлено распределение мощности обломочного грунта по скважинам. Как уже отмечалось выше, обломочный грунт, представленный дресвяными и щебенистыми разностями, имеет весьма значительные мощности во всех скважинах. По сути общая мощность крупнообломочного грунта в каждой скважине составляет около половины глубины скважины.

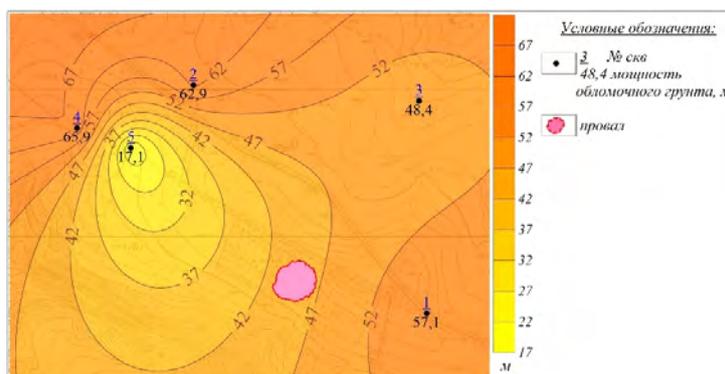


Рис. 2. Распределение мощностей обломочного грунта по скважинам, м

Верхняя часть разреза, представленная глинистыми, иногда песчанистыми разностями, изменяется в пределах 14-31м. Как было отмечено ранее физические свойства этой толщи определены не во всех скважинах.

Определены мощности скальных грунтов, в которых наблюдается частое переслаивание с обломочным грунтом. На рис. 3 представлено распределение мощностей скального грунта по скважинам.

Мощность скального грунта по абсолютной величине не позволяет сравнивать скважины разной глубины. Поэтому введен параметр относительной мощности – выраженное в процентах отношение суммы мощностей скального грунта к общей глубине скважины.

Глубина скважины 3 – 135,8 м. Мощность скальной толщи в разрезе 62,4м, соответствует 45,9% от общей глубины скважины. Мощность скального грунта является самой высокой из четырех исследованных скважин. Наиболее близкие значения 36,9 м соответствуют скважине 4. Естественно ожидать, что массив грунта, вскрытый этими скважинами, более устойчив к возможным деформациям, чем в скважинах 2 и 1, где скальный грунт составляет 22,0 и 11,2% соответственно.

Поскольку прочность толщи во многом определяется сопротивлением одноосному сжатию в водонасыщенном состоянии, то по результатам лабораторных испытаний были определены его средневзвешенные значения

$$R_{c\text{ mt}} = \frac{\sum R_{ci} \cdot h_i}{\sum h_i}$$

где  $R_{ci}$  – сопротивление одноосному сжатию каждого образца скального грунта мощности  $h_i$ .  $R_{c\text{ mt}}$  является более объективным показателем, чем отдельно взятые характеристики прочности.

Средневзвешенное значение предела прочности  $R_{c\text{ (mt)}}$  в водонасыщенном состоянии составляет 6,64 мПа в скважине 3– является наивысшим показателем. Наиболее близкие значения  $R_{c\text{ (mt)}}$  отмечаются в скважине 4 – 6,42мПа. Мощность нескального грунта в толще скального составляет в скважине 3 – 34% что, по нашему мнению, ставят разрез этой скважины в ряд наиболее прочных, не измененных подработкой.

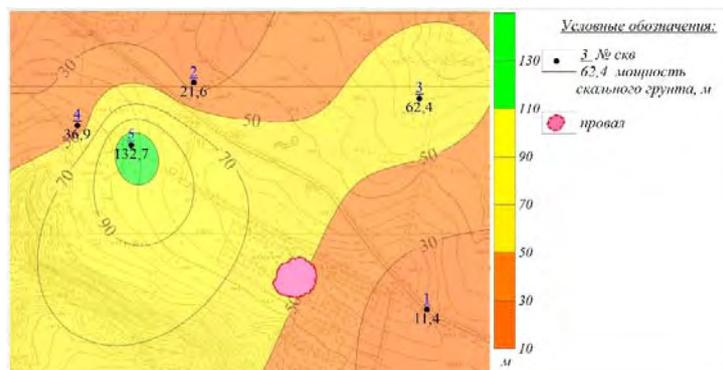


Рис. 3. Мощности скального грунта: песчаника, известняка, алевролита, м

На рисунке 4 приведены изолинии этого параметра, анализ которых позволяет заключить, что наиболее проблемным для верхней части разреза является участок скв.1, а в северо-западном направлении в сторону скв.2 – выделяется ослабленная зону в створе этих скважин. В скв. 5 предел прочности определен в сухом состоянии, для всех остальных в водонасыщенном. Нельзя сопоставлять эти параметры, но был интерес получить результат для методики.

Поскольку состояние терригенно-карбонатной толщи определяется как качественными параметрами (литологическими особенностями разреза), так и количественными, к которым можно отнести мощности отдельных слоев и характеристику прочности скального грунта, введена балльная оценка этих параметров. При мощности скальной толщи 90-100% – 10 баллов, далее уменьшение мощности на 10% соответствует уменьшению на 1балл. Значению  $R_{c\text{ mt}} - 10$  мПа, – 10 баллов, поэтому интервалу 6-7 мПа соответствует 7 баллов, далее уменьшению на 1 МПа соответствует уменьшению на 1 балл.

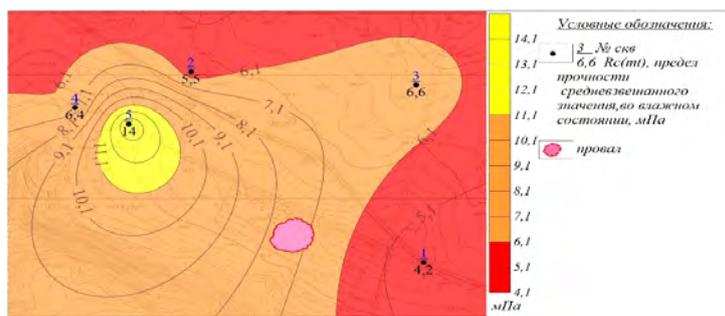


Рис. 4.  $R_c(mt)$ , предел прочности средневзвешенного значения в водонасыщенном состоянии, мПа

Наиболее ослабленные участки характеризуются значениями от-3 до 3 баллов. Как и следовало ожидать из ранее проведенного анализа наиболее устойчивыми являются участки скважин 3 и 5, а наиболее проблемными – участки скважин 1 и 2.

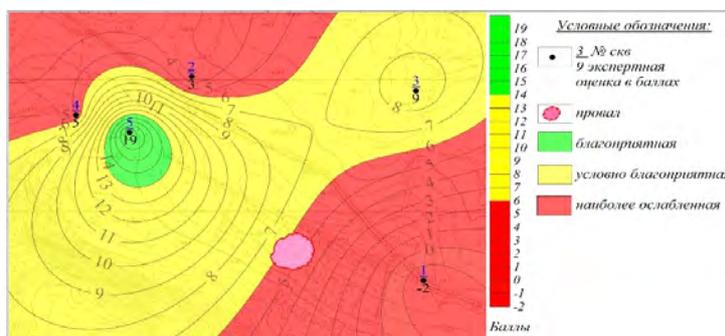


Рис. 5. Экспертная оценка в баллах

На рисунке 5 приведены изолинии количественной экспертной оценки по четырем исследованным скважинам. Выделена зона в створе скважин 1 и 2, проходящая через провал с юго-востока на северо-запад. Следует отметить, что зона на юго-западе территории практически не исследована и положение проведенных изолиний в дальнейшем может быть скорректировано.

Полученные результаты позволяют предположить, преобладающее юго-восточное, северо-западное направления техногенных деформационных процессов в верхней части разреза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березнев В.А. Инженерно-геологические критерии выявления потенциально опасных участков подработанной территории / Березнев В.А., Никифоров В.В. // Проблемы и опыт инженерной защиты урбанизированных территорий и сохранения наследия в условиях геоэкологического риска: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Киев, 2013. – С. 205-216.
2. Никифоров В.В. Инженерно-геологические исследования негативных последствий техногенных процессов // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2013. – № 4. – С. 390-396.
3. Никифоров В.В. Уточнение пространственных закономерностей распределения физико-механических свойств в центральной части г. Березники // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 212-215.
4. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН; [отв. ред. В.М. Новоселицкий]. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.

А.И. БАБКИН

*Горный институт УрО РАН*

**ПРИМЕНЕНИЕ РАЗНОУРОВЕННЫХ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ И ШАХТНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ НА УЧАСТКАХ УСКОРЕННЫХ ОСЕДАНИЙ  
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Основопологающим условием безопасной эксплуатации месторождений калийных солей является сохранность водозащитной толщи (ВЗТ) в качестве надёжного барьера проникновению подземных и наземных вод в горные выработки. Контроль состояния ВЗТ строится на периодических инструментальных измерениях величин оседаний земной поверхности по сети маркшейдерских профильных линий над шахтными полями рудников. Потенциально опасными для целостности ВЗТ являются выявленные участки ускоренных оседаний. Прогнозные оценки развития негативных процессов в пределах данных участков при фактических условиях ведения горных работ базируются на геомеханических расчётах. При этом для адаптации расчётных геомеханических моделей трансформации породного массива к реальной горно-геологической обстановке используются данные малоглубинных сейсморазведочных исследований [1].

Точность задания расчётных схем математического моделирования, учитывающих влияние очистных работ на деформирование пород под нагрузкой, зависит от детальности исходной физико-геологической модели разреза, включая инженерно-геологический интервал. Максимально детальная сейсмогеологическая информация об изменениях в свойствах горных пород на «проблемных» участках шахтных полей возможна при организации комплекса многоуровневых и разночастотных сейсмических исследований, проводимых на земной поверхности и из горных выработок. Для этого применяются соответствующие системы регистрации, построенные на интерференционных системах сбора сейсмоакустических данных и обеспечивающие необходимую разрешающую способность [2]. Разноуровневые модели реальных сред согласуют по эффективным кинематическим параметрам, включающим времена регистрации и скорости распространения упругих волн до целевых отражающих горизонтов (ОГ).

На одном из участков шахтного поля Верхнекамского месторождения, в пределах которого отмечено увеличение скоростей оседания земной поверхности (рис.1) реализован комплекс наземных и шахтных сейсмоакустических наблюдений.

На первом этапе комплекса проведены малоглубинные наблюдения, направленные на оценку состояния ВЗТ. По их результатам выделены зоны ухудшения упругих параметров, проявляющиеся изменением характера сейсмической записи, нарушением корреляции отражающих горизонтов (рис.2.б) и снижением значений скоростей распространения сейсмических волн (рис.3.а). Недостаточная сходимость измеренных величин оседаний с расчётными геомеханическими значениями после внесения в модель малоглубинных сейсморазведочных данных потребовала проведение детализации верхней части геологического разреза. Для этого проведены инженерные сейсморазведочные работы, результаты которых позволяют оценить «вклад» пород верхней части разреза в степень техногенной нарушенности ВЗТ в целом. Пространственно совмещённые малоглубинные и инженерные сейсморазведочные наблюдения в пределах одной профильной линии с частичным перекрытием охватывают интервал от земной поверхности до подстилающей соли (рис.2.а,б). Выделяемые в инженерно-геологическом интервале «ослабленные» по прочностным и деформационным свойствам зоны согласуются с данными малоглубинной сейсморазведки и дают более полные представления о физико-геологической модели, закладываемой в геомеханические расчёты.

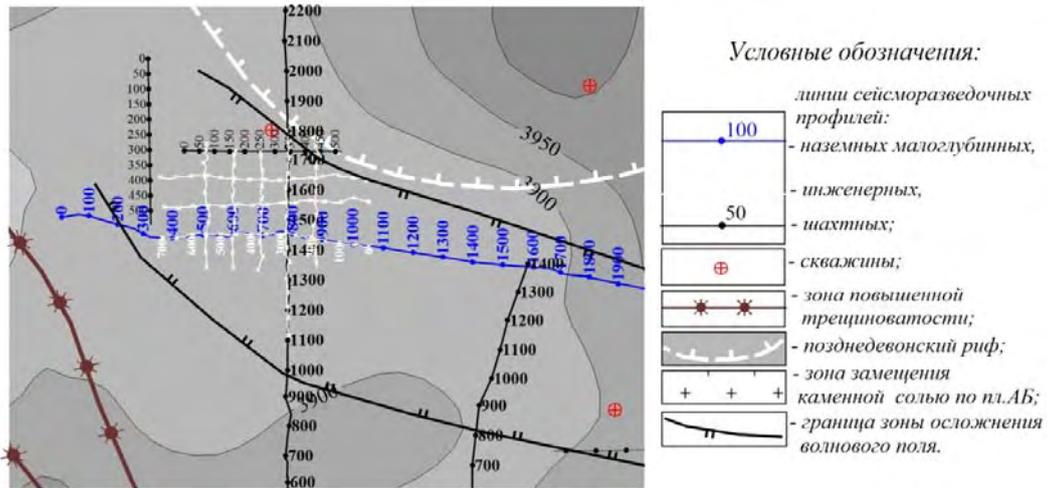


Рис. 1. Обзорная схема района работ с особенностями геологического строения

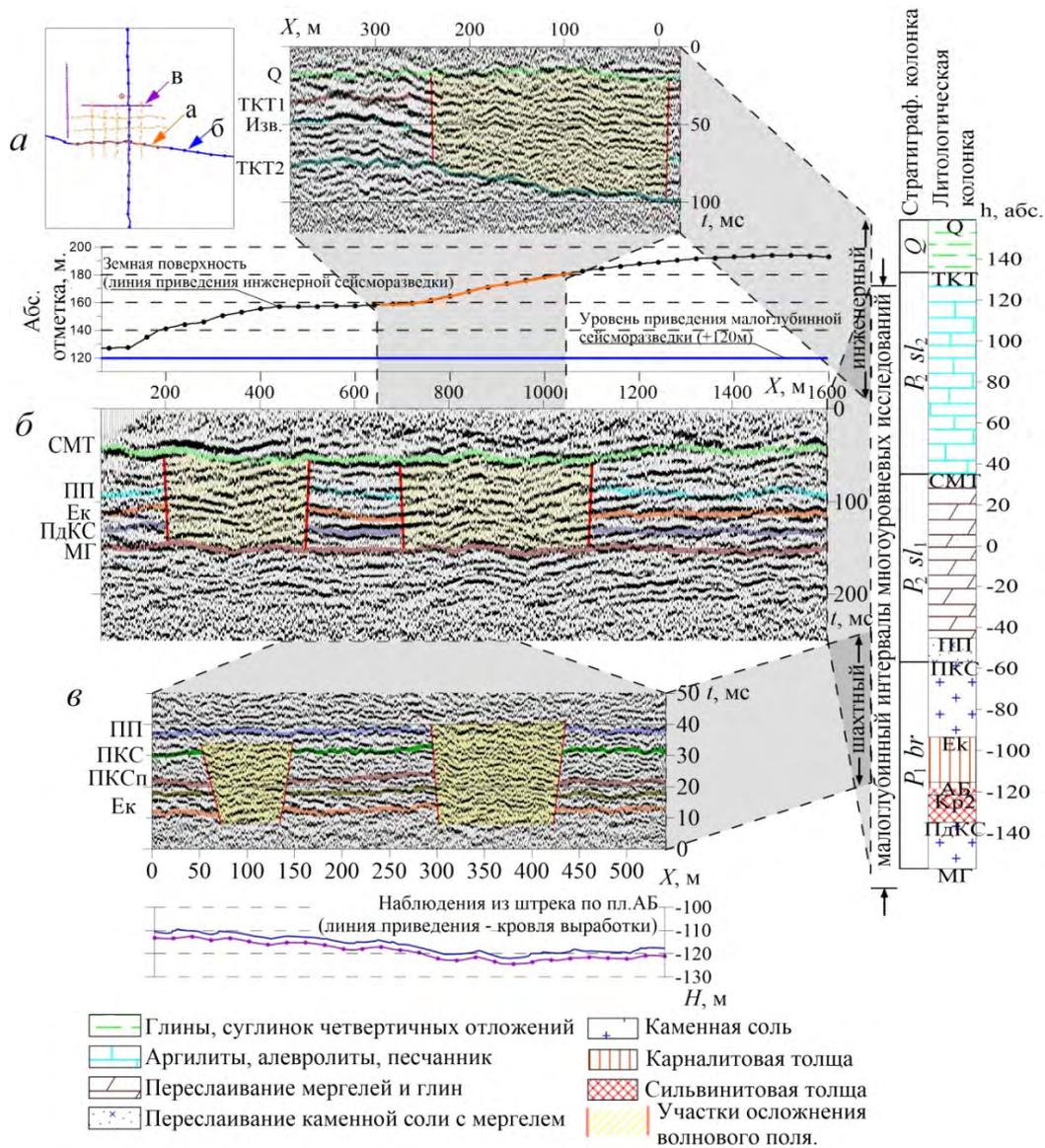


Рис. 2. Пространственно совмещённые временные разрезы сейсмических исследований: а) инженерных; б) малоглубинных; в) шахтных

Дальнейшая детализация и оценка состояния породного массива на уровне продуктивной толщи и прилегающих к ней пластов выполнена с помощью высокочастотных сейсмоакустических наблюдений из горных выработок в направлении залегания ВЗТ, т.е. в верхнее полупространство (рис.2.в). Комплексование разнонаправленных наблюдений повышает точность вертикальной локализации геологических неоднородностей, а более высокая разрешающая способность шахтных данных – детальность изучения примыкающих к выработанному пространству пластов. Негативные изменения физических свойств породного массива на различных уровнях и с различной степенью детализации отмечены в физико-геологических моделях (рис.3), где в координатах профильных линий и глубин представлено распределение значений интервальных скоростей распространения упругих волн.

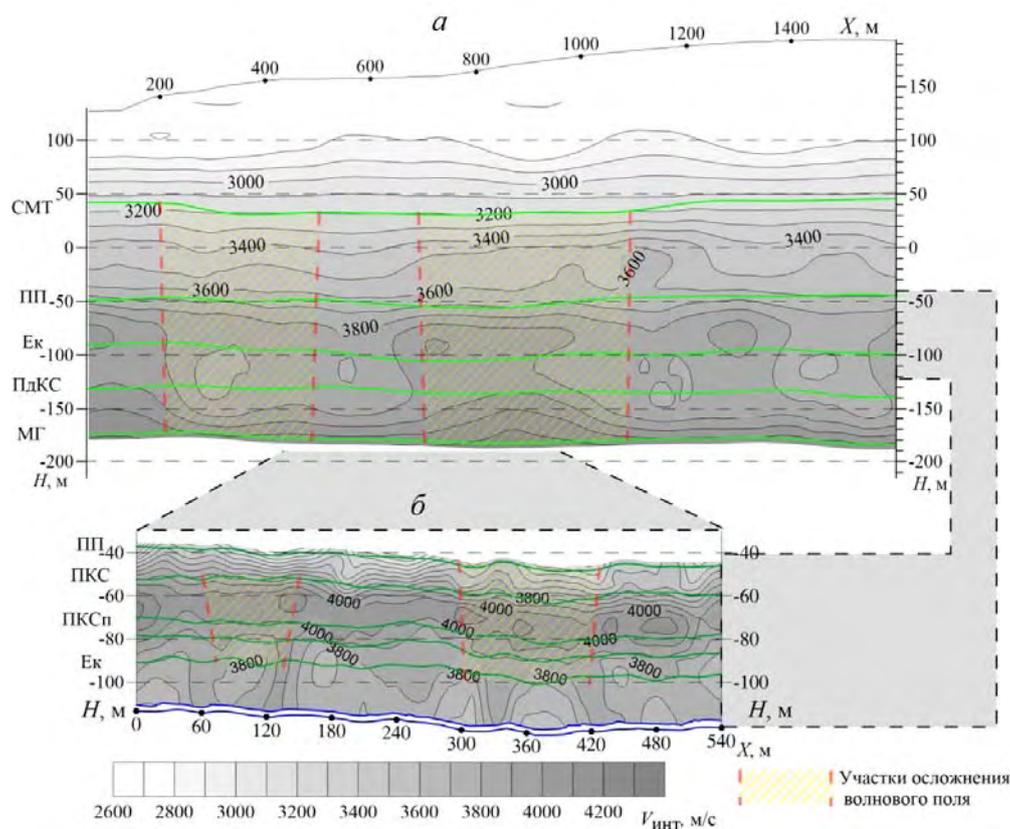


Рис. 3. Разноуровневые физико-геологические модели малоглубинных (а) и шахтных (б) исследований

Физико-геологические модели повышенной детальности, построенные по результатам полномасштабного комплекса сейсморазведочных исследований, являются исходной информацией для текущих и прогнозных геомеханических оценок состояния ВЗТ на потенциально опасных участках шахтных полей калийных рудников.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сейсморазведочные исследования условий разработки калийной залежи / И.А. Санфиров, А.И. Бабкин, А.Г. Ярославцев, Г.Ю. Прийма, К.Б. Фаткин // Геофизика. – 2011. – № 5. – С. 53-58.
2. Новые методические решения малоглубинной сейсморазведки на месторождениях водорастворимых полезных ископаемых / И.А. Санфиров, А.И. Бабкин, А.В. Чугаев, С.В. Ладейщиков // Горн. журн. – 2013. – № 6. – С. 17-22.

И. И. СЕМЕРИКОВА

*Горный институт УрО РАН***ИЗУЧЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В МАССИВЕ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД  
СЕЙСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

В настоящее время в сейсморазведочных кругах, как в научных, так и в производственных, возвращается дискуссия, затеянная еще в [1, 3], о том, что сейсморазведка развивается в двух формах: классической и технологической. Первая идейно стара как сейсмология, вторая появилась в связи с появлением мощной оснащенной электронно-измерительной и вычислительной аппаратуры, в связи с желанием упрощения интерпретационных моделей, позволяющего и упрощение обработки массовых сейсмических данных. Всякая интерпретация геофизических данных модельна [2]. Это следует из того, что любая интерпретация производится по экспериментальным данным в рамках принятых модельных представлений о среде (геологической), физическом поле, физическом процессе или явлении. Таким образом, ее результаты полностью определяются этими представлениями. По В. Н. Страхову «моделью (среды, поля, явления, процесса) называем совокупность представлений и допущений ..., которые возникли как результат предыдущих исследований ..., либо как результат теоретического обобщения, либо по аналогии.... указанные факторы определяют существо модели...совместно» [6]. Задачи классической сейсморазведки всегда сводились к выяснению и оценке тех или иных параметров характеристик модели среды, согласующихся с принятыми в исследованиях априорными представлениями об их сущности [3]. По мнению Петрашени Г. И. и Рудакова А. Г., на основании таких представлений формировалось некоторое множество моделей сред, из которых в конкурентной борьбе отбиралась оптимальная модель среды, наилучшим образом согласующаяся с зарегистрированными экспериментальными данными в конкретном случае и условиях. В [1] Денисов М. С. определяет, что технология же отличается от классики тем, что всегда довольствуется исключительно результатом, игнорируя способ, которым этот результат получен. Для научного же системного подхода при решении данных задач, важен не только результат, но и сам метод его получения. Лишь на его основе осуществляется проверка степени абстракции, корректности используемых алгоритмов и математических аппаратов моделям среды, физического поля, физических процессов [1]. Системное моделирование позволяет выявить закономерности развития конкретных систем, осуществить синтез частичных представлений, отражающих отдельные стороны сложного объекта, и на этой основе получить целостное представление об объекте и выполнить научный прогноз [5]. В основе системного подхода лежат представления о целостности, сложности и организованности объекта. Сложность объекта определяется комплексом составляющих его взаимодействующих и взаимозависимых элементов с внутренними процессами и преобразованиями. Под геологической системой принято понимать пространственную совокупность взаимосвязанных геологических тел и процессов. Главной целью изучения геологической системы является установление формы связи взаимодействующих элементов, их зависимости в процессе развития.

Занимаясь исследованиями отклика трещиноватой среды в сейсмическом волновом поле, нам стало очевидно, что происходящие волновые процессы в однородном массиве и массиве трещиноватом будут отличаться, и прежде всего по типам образующихся в массиве волн, обусловленных структурой трещин и зон их развития [8]. Наши исследования проводим, применяя специализированную интерпретационную методику прямого распознавания трещиноватых сред [4, 7]. Эта методика базируется на напрямую выявленных и установленных поисковых признаках трещиноватых геобъектов в амплитудных и спектральных

параметрах отраженных продольных волн. Для всех идентификационных поисковых признаков оценивались устойчивость, статистическая значимость, выявлялись закономерности изменчивости в зависимости от изменчивости параметров трещин. Алгоритм конструирования из идентификационных поисковых признаков позволяет рассчитать эффективный параметр, который характеризует вероятность наличия трещиноватого объекта того или иного класса. Результаты применения данной методики позволяют получать информацию для анализа закономерностей изменчивости сейсмического волнового поля, и, соответственно, геологической системы массива трещиноватых пород, и осуществить синтез результатов этого анализа, и на этой основе получить новые модельные представления о системе трещиноватого породного массива и волновых процессов в нем.

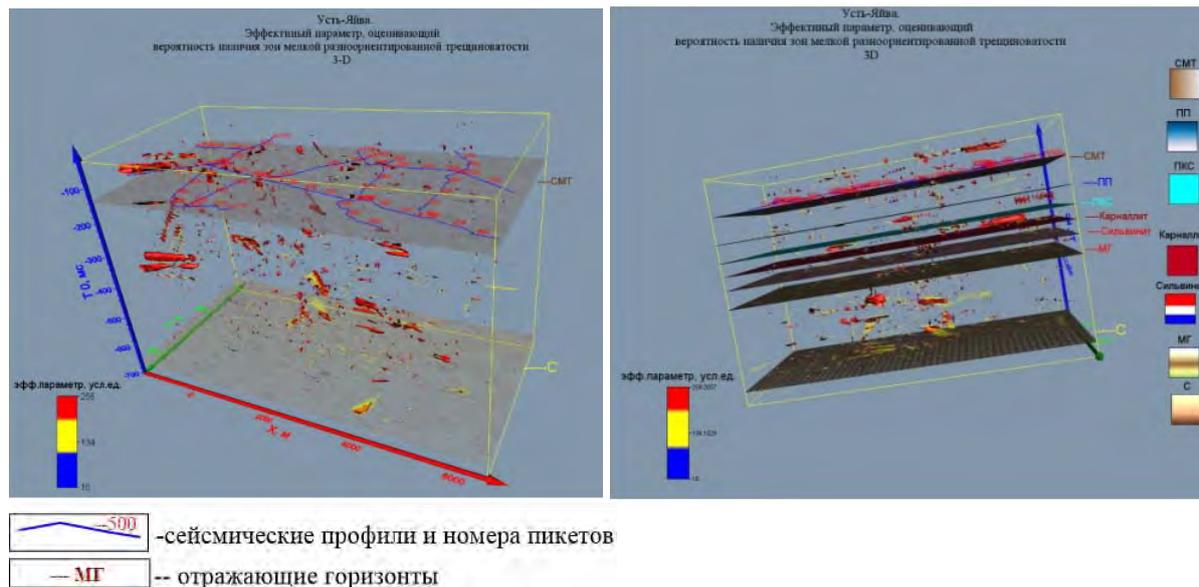


Рис. 1 . Пространственное 3D распределение эффективного параметра, оценивающего вероятность наличия зон мелких разноориентированных трещин, на Усть-Яйвинском участке. Показаны толща от кровли СМТ до подошвы подстилающей соли «С» без и с промежуточными отражающими горизонтами

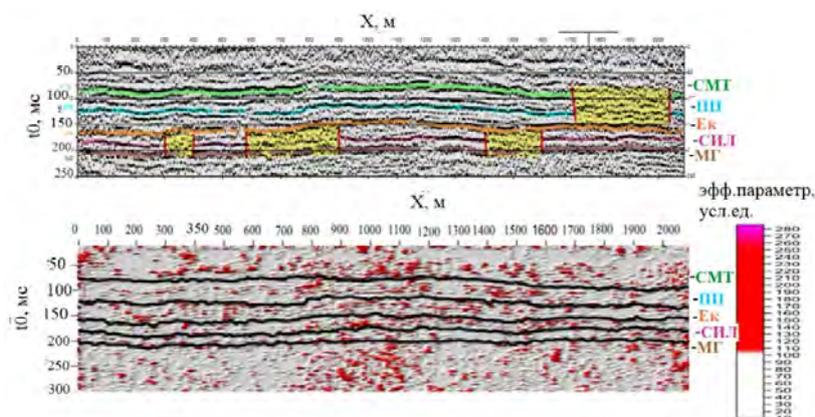


Рис. 2. Временной разрез и разрез эффективного параметра, характеризующего вероятность наличия зон мелких разноориентированных трещин

Рассмотрим результаты эксперимента, выполненного в условиях естественного залегания. По методике распознавания трещиноватых сред обработаны временные разре-

зы, полученные на территории Усть-Яйвинского участка Верхнекамского месторождения калийных солей по сети профилей методом малоуглубинной сейсморазведки ОГТ в Отделе активной сейсмоакустики. В результате интерпретации удалось построить трехмерную модель распределения зон мелких разноориентированных трещин (рис. 1). На рисунке два изображения: показан объем пород от кровли соляно-мергельной толщи (отражающий горизонт «СМТ») до подошвы подстилающей каменной соли (отражающий горизонт «С») и тот же объем пород, но с представленными промежуточными основными отражающими горизонтами. В основном такие трещиноватые зоны малых размеров развиты вне водозащитной толщи. Для анализа выделим наиболее развитую зону, расположенную ниже отражающего горизонта маркирующей глины «МГ», т.е. ниже по разрезу водозащитной толщи и карналлит-сильвинитовой зоны, - в толще подстилающей каменной соли. На рис.2 представлен традиционный временной разрез, полученный по профилю пересекающий данную зону. Желтым цветом окрашены зоны нарушения регулярной волновой картины. Природа этих нарушений неоднозначна, они могут быть обусловлены структурным фактором, литологическим и др. Здесь же сопоставлен и разрез эффективного параметра, характеризующего вероятность наличия зон мелких разноориентированных трещин, полученный по методике распознавания трещиноватых сред. Зоны трещиноватости с высокой степенью вероятности обозначены красным цветом. Все зоны имеют малые размеры, изолированно разбросаны по разрезу до уровня МГ. Они не представляются как водопроницаемые каналы, опасные для водорастворимых руд. Ниже МГ (ниже времени 250 мс) в толще подстилающей каменной соли скопление зон в центре профиля выглядит как единая трещиноватая зона (рис. 3).

В состав эффективного параметра, оценивающего вероятность наличия трещиноватого геобъекта, входит комплекс амплитудных и спектральных параметров. Исследования показали, что в зонах развития мелких трещин происходят аномальные увеличения значений частотной координаты центроида по сравнению со значениями в однородном массиве [8]. Смещение центроида в область более высоких частот может происходить при различных смещениях левой и правой граничных частот. Например, значение частоты центроида увеличивается в случае, когда и левая и правая граничные частоты смещаются по оси частот в сторону увеличения на одинаковое расстояние, ширина спектра при этом не меняется. На рис. 3 представлены разрезы некоторых отдельных составляющих эффективного параметра: частотной координаты центроида  $F_C$ , левой граничной частоты  $F_L$ , правой граничной частоты  $F_R$ . На всех разрезах в области зоны трещиноватости наблюдаются аномальные повышенные значения параметров.

Повышение частотной координаты центроида зависит от характера изменений значений граничных частот, следовательно, между этими величинами существует причинно-следственная связь. Так как факторы-причины имеют разное направление и характер влияния, и одна причина может усиливать или ослаблять, а кроме того, причины имеют разную силу или степень воздействия, то если рассматривать только парную корреляцию между признаками-факторами, то причинно-следственный комплекс будет сильно упрощен. Чем шире охватывается причинно-следственный комплекс, тем глубже вскрываются связи. Это дает возможность всесторонне изучать причинные отношения между явлениями, устанавливая существенные в данных условиях причины и второстепенные. Исходя из данных рассуждений, будем исследовать множественную регрессию: зависимость  $F_C$  от двух объясняющих переменных  $F_L$  и  $F_R$ , а также ширину спектра  $W$ . Будем рассматривать не сами значения параметров, а используем параметр, характеризующий статистическую значимость аномалий этих параметров. В качестве такого параметра используем среднее квадратическое отклонение значений параметров  $\sigma$ . Будем строить регрессию между количествами  $\sigma$  в отклонении значений этих параметров от своего фона. На рис. 4 представлено поле корреляции данной регрессии по выборке, взятой на участке зоны трещиноватости. Ширина спектра

W выступает как диаметр шарика, которым представлен каждый отдельный элемент выборки. В поле выделяются «оси», каждой из которых соответствует нулевая координата одного из параметров («кол-во  $\sigma(F_C)$ » = 0, либо «кол-во  $\sigma(F_L)$ » = 0, либо «кол-во  $\sigma(F_R)$ » = 0). «Оси» разбивают поле корреляции на области, каждой из которых присущ свой характер изменчивости параметров, а, следовательно, и свой волновой процесс. В области, лежащей выше «оси» «кол-во  $\sigma(F_C)=0$ », и, правее «оси» «кол-во  $\sigma(F_L)=0$ », частота центроида увеличивается, левая и правая граничные частоты смещаются в сторону увеличения частот на одинаковое расстояние, ширина спектра не меняется. Можно выделить область, где  $F_R$  смещается на большее расстояние, чем  $F_L$ , тогда W увеличивается. В области, лежащей выше «оси» «количество  $\sigma(F_C)$ » = 0 и левее «оси» «количество  $\sigma(F_L)$ » = 0, значение  $F_C$  увеличивается, значение  $F_R$  увеличивается на расстояние большее, чем расстояние, на которое уменьшается значение  $F_L$ , W при этом увеличивается. Выделяются области с разными вариантами изменения частотных параметров, что представлено на рис. 4. Вследствие этого, в каждой области правомерно предположить свой волновой процесс. Например, обогащение спектра высокими частотами может происходить за счет образования сложной интерференционной отраженной волны, состоящей из отдельных наложенных волн, отразившихся кратно от кровли и подошвы внутри трещины, и обладающей более высокой частотой, чем падающая волна. Смещение  $F_L$  в область низких частот может быть обусловлено образованием дифрагированных волн. Период дифрагированной волны больше падающей, преобладающая частота ее ниже. Могут образовываться и другие типы волн, частотный состав которых отличен от состава падающей волны [8]. Образование разных типов волн обусловлено внутренней структурой зоны трещиноватости. Динамические особенности дифрагированных волн зависят от формы и размеров элементов зон трещиноватости, которые могут явиться дифракторами, различия упругих свойств. Таким образом, можно судить, в ряде случаев, о внутренней структуре трещиноватой зоны, о параметрах трещин.

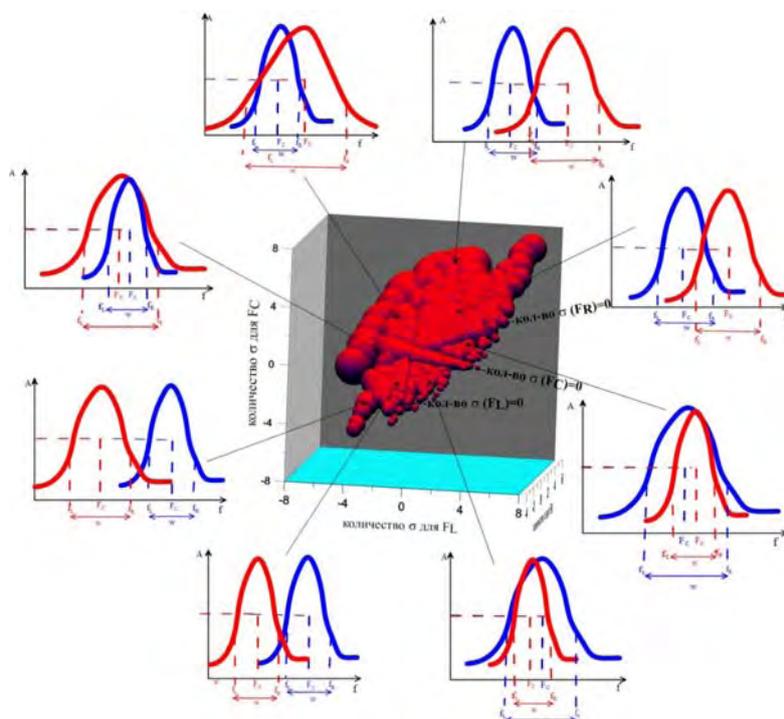


Рис. 4. Поле корреляции и распределение спектральных кривых по различным областям поля.

Синяя кривая – спектр сейсмозаписи в однородном массиве.

Красная кривая – спектр сейсмозаписи в зоне мелких разноориентированных трещин

## **Выводы**

Изучение волновых процессов совершенствует модельные представления о них. Исследование причинно-следственных связей позволяют глубже понимать волновые процессы в трещиноватом массиве, дает возможность изучать причинные отношения между явлениями, устанавливать существенные в данных условиях причины и второстепенные. Выдвигать гипотезы о внутреннем строении трещиноватой среды, и, таким образом, расширять множество моделей геологических сред.

## **Благодарности**

Автор приносит благодарность профессору кафедры разведочной геофизики и компьютерных систем РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина Шнеерсону М. Б. и директору по науке ООО «ГЕОЛАБ», д.ф.-м.н. Денисову М. С. за частные беседы и дискуссии, определившие направления исследований.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Денисов М.С. Где живут дифракторы? // Технологии сейсморазведки. – 2008. – №2. – С. 97-101.
2. Долгаль А.С. Комплексование геофизических методов: учеб. пособие / ПГНИУ. – Пермь, 2012. – 167 с.
3. Петрашень Г.И. О недопустимых искажениях законов природы в фундаментальных задачах технологичной сейсморазведки / Петрашень Г.И., Рудаков А.Г. // Технологии сейсморазведки. – 2008. – №2. – С. 86-94.
4. Семерикова И.И. Методика распознавания трещинных сред в сейсмических волновых полях. / И.И. Семерикова // Геомодель – 2005: тез. докл. VII-й Междунар. науч.-практ. конф. – Геленджик, 2005. – С. 111-114.
5. Скважинная и шахтная рудная геофизика: справ. геофизика. в 2-х кн. / под ред. В.В. Бродовского. – М.: Недра, 1989. – Кн. 1. – 320 с.: ил.
6. Страхов В.Н. Основные направления теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. Ч. II // Геофизика. – 1995. – № 4. – С. 10-20.
7. Semerikova I.I. Technique for Recognizing of Fractured Zones Based on the Analysis of Amplitude and Frequency Attributes of the P-P Reflections // 74th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2012 Incorporating SPE EUROPEC 2012: Responsibly Securing Natural Resources. – Copenhagen, Denmark, 2012. – W044.
8. Semerikova I.I. Studying of wave processes in a rock mass by technique for recognizing fractured zones in fields of seismic waves // Geomodel 2017 – 19<sup>th</sup> Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development. – Gelendzhik, 2017. – код 135105 – DOI: 10.3997/2214-4609.201702274.

М.В. ТАРАНТИН  
*Горный институт УрО РАН*  
**О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ СКОРОСТНОГО АНАЛИЗА  
ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

Одним из основных этапов обработки сейсмических материалов, является скоростной анализ [1]. Цель этого этапа состоит в получении системы параметров, связанных со скоростями распространения упругих волн, которые позволяют описать наблюдаемые на сейсмограммах их годографы.

Обычно применяется прямой перебор возможных вариантов значений скоростей для всех времен регистрации сигнала и поиска наилучшего, по заранее выбранному критерию, среди них. Очевидно, что даже в случае разумных пределов такого перебора эта процедура для вычислительной машины становится ресурсоемкой: требует большого объема памяти и значительного количества времени. Существенно ускорить процесс можно при использовании начального приближения – так называемого априорного скоростного закона – характерной для исследуемой территории зависимости скорости упругих волн от глубины. В этом случае наиболее вероятные, физически приемлемые, значения искомым скоростей находятся в заранее известном интервале. Очевидно, однако, что подобные средние значения никак не могут отразить возможных и вполне вероятных вариаций, которые и представляют основной интерес для поисковых работ – необходимо их обнаружить и интерпретировать.

С развитием вычислительной техники проблемы ресурсов постепенно отходят на второй план, однако, при переходе от двумерных моделей к трехмерным, вновь проявляются.

В этой связи актуальным представляется поиск компромисса между шириной охвата, точностью вычислений и скоростью обработки сейсмических данных при скоростном анализе. Решением мог бы стать итеративный процесс подбора скоростей волн, наиболее адекватно описывающих зарегистрированные сигналы, когда найденное распределение скоростей используется как априорное для повторной (последующей), более точной, вычислительной обработки. В этом случае возможно постепенно сгущать сеть тестовых значений скоростей, задавая каждый раз небольшое их количество на некотором интервале. Необходимое для этого условие – гладкость получаемой функции когерентности – соблюдается практически для всех материалов (рис.1).

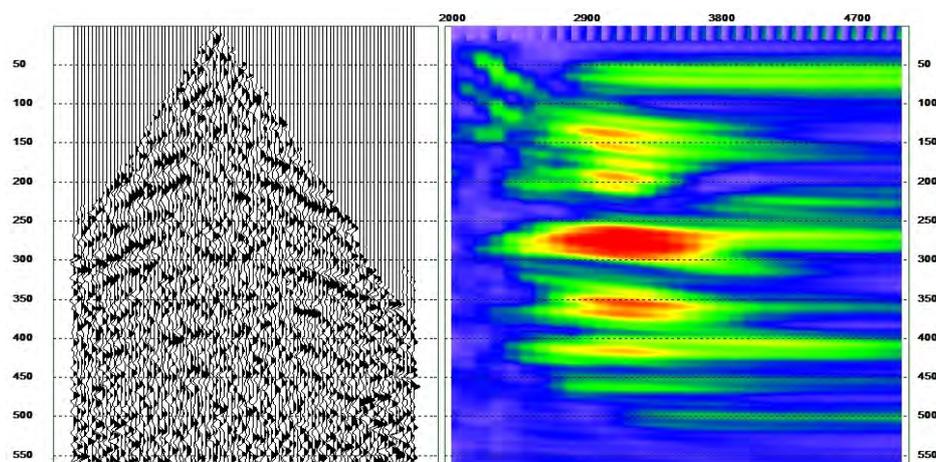


Рис. 1. Сейсмограмма и ее функция когерентности  
(синим цветом обозначены минимальные значения, красным – максимальные)

Обработка полевых данных малоуглубинной сейсморазведки при исследованиях водозащитной толщи проводится по устоявшейся методике, при этом каждый шаг выполняется отдельным вычислительным модулем собственной разработки. Накопленный опыт и сложившаяся технология работы с материалами предполагает стандартизацию не только операций над данными, но и самих данных, в том числе промежуточных, на каждом этапе обработки. Для обобщения и унификации используемых алгоритмов часть вычислительных модулей подверглась модернизации (рис. 2). Наряду с расширением списка поддерживаемых файлов можно отметить добавление пространственных параметров профиля.

С одной стороны, это позволило уменьшить количество выполняемых операций, повысив производительность работ, с другой – расширило их возможный перечень путем согласования с некоторыми известными разработками, в частности, с SPS-PC [2] (автор Н.А. Голярчук).

Поскольку скоростной анализ проводится для каждой сейсмограммы отдельно, он позволяет получать информацию о латеральной изменчивости скорости упругих волн вдоль исследуемого профиля. Адекватность этой информации напрямую определяет качество последующих операций, в частности, вводимых в волновую картину кинематических поправок.

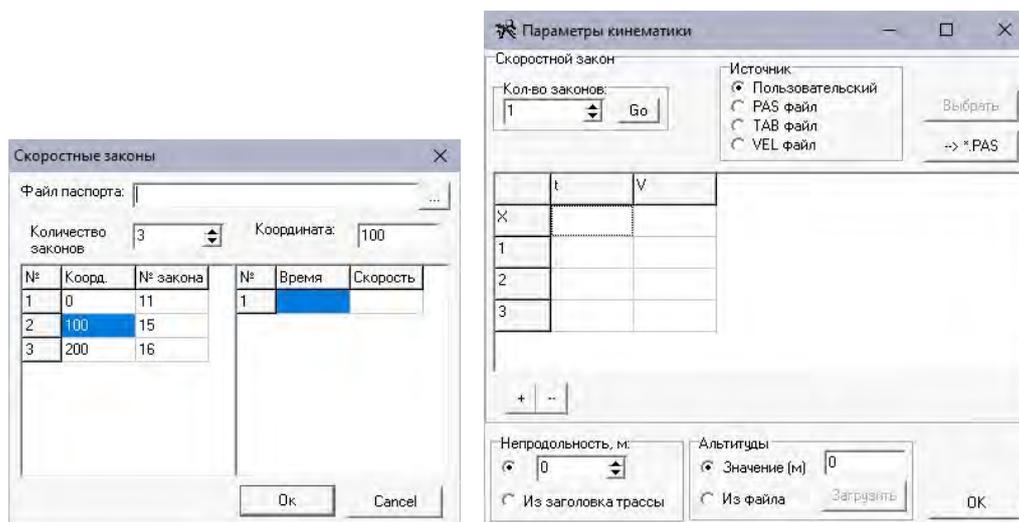


Рис. 2. Форма задания скоростных законов до (слева) и после (справа) модернизации модуля

В качестве примера рассмотрим сравнение точности определения глубин отражающих горизонтов на сейсмических профилях Половодовского участка Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. В качестве точных данных о положении границ примем результаты бурения. Сравним построения с учетом единого для всего профиля закона изменения скорости с глубиной и построения в случае изменяющихся вдоль профиля скоростных законов. Как видно из рис. 3, практически во всех случаях уточнение скоростного закона не приводит к уменьшению погрешности структурных построений. Однако, следует учесть, что в данном случае использовался один общий вариант прослеживания отражений, то есть одинаковое суммарное время, изменялись лишь применяемые для пересчета скоростные законы. В действительности же при изменении скоростного закона картина временного разреза слегка изменяется: возможны сдвиги осей синфазности волновых форм отражений на величину до половины видимого периода. Вероятно, это связано с качеством конкретного исходного сигнала.

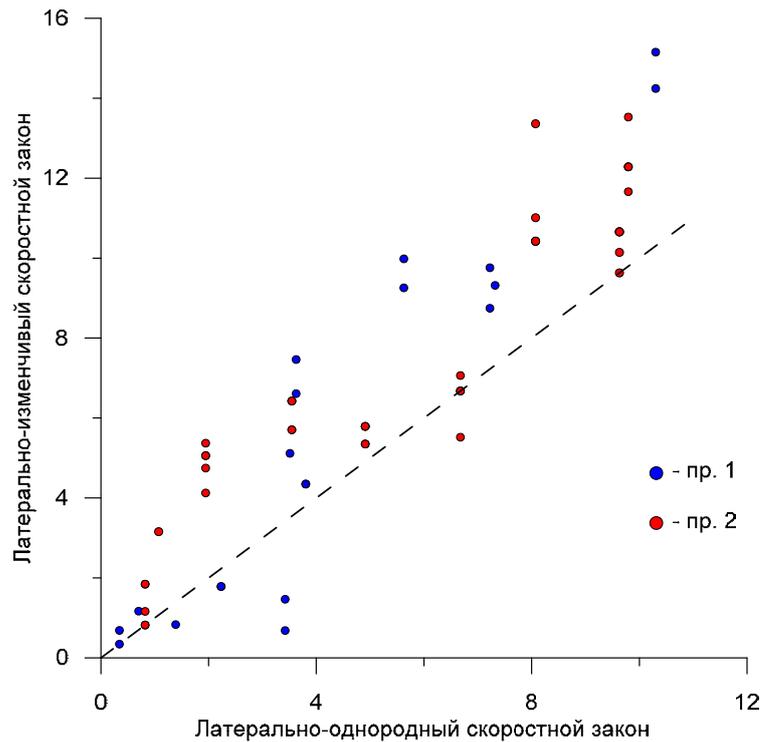


Рис. 3. Сравнение относительных погрешностей (%) определения положения отражающей границы при различных скоростных законах

Получаемая для сейсмограммы скоростная характеристика по способу вычисления должна обеспечивать максимальную когерентность сейсмограммы после введения кинематических поправок, что обеспечивает получение наиболее адекватной суммотрассы. От этого напрямую зависит временное положение и форма волновых пакетов на трассе, поэтому результат прослеживания отражений на суммарном временном разрезе зависит от данных скоростного анализа. А так как в данном случае использовались одни и те же результаты прослеживания, проведенное сравнение может быть не вполне корректным.

Учитывая сказанное, для более правильного сравнения представляется необходимым использовать полученный «подробный» скоростной закон при обработке волновых материалов с самого начала графа обработки, образуя таким образом итеративный процесс.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бляс Э.А. Новый взгляд на скорости ОГТ в слоистых латерально-неоднородных средах: аналитическое и численное исследование // Технологии сейсморазведки. – 2005. – № 3. – С. 7-25.
2. SPS-PC. Система цифровой обработки и интерпретации: Рук-во пользователя / Голярчук Н.М. – Норильск, 2003.

К.Б. ФАТЬКИН

Горный институт УрО РАН

## ПРОГНОЗ ТИПА НАСЫЩЕНИЯ НАРУШЕННЫХ ЗОН ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ AVO-АНАЛИЗА

Изучение динамических «образов» типовых горно-геологических неоднородностей в волновом поле отраженных волн показало, что их обнаружение наиболее вероятно по изменению амплитуд волн, отраженных от границ вмещающих интервалов [1]. Основанием для этого служат особенности строения физико-литологических моделей типовых неоднородностей, характеризующихся высокой контрастностью отражающих горизонтов и тонкой слоистостью. Анализ параметров Шуе и их комбинации в виде разрезов *AVO-произведения*, представляющих комбинацию *AxB*, совместно с разрезами *A+B* позволяет выделять нарушенные зоны в водозащитной толще. Дополнительно поставлена задача определения типа насыщения порового пространства нарушенных зон – либо это газонасыщенные области, либо флюидонасыщенные.

Поскольку влияние поровых флюидов на скорость больше для относительно неконсолидированных пород, то эффект аномального изменения амплитуд лучше проявляется при относительно молодых отложениях и поэтому методика яркого пятна особенно хорошо применима, например, к третичным терригенным бассейнам, которые располагаются, главным образом, в прибрежной полосе и по периферии континентов [1]. Каждый из трех типов амплитудных аномалий обычно проявляется в определенных диапазонах глубин – яркие пятна на относительно небольших глубинах, аномалии в виде обращения фазы на больших глубинах и труднее определяемые тусклые пятна на еще больших глубинах.

В качестве исследуемого материала взяты данные детального анализа особенностей геологического строения массива и степени их возможного влияния на безопасность ведения горных работ в пределах СКРУ-2. Здесь для достижения поставленной цели в пределах выделенного участка шахтного поля проведен комплекс геологических и геофизических исследований (рис. 1).

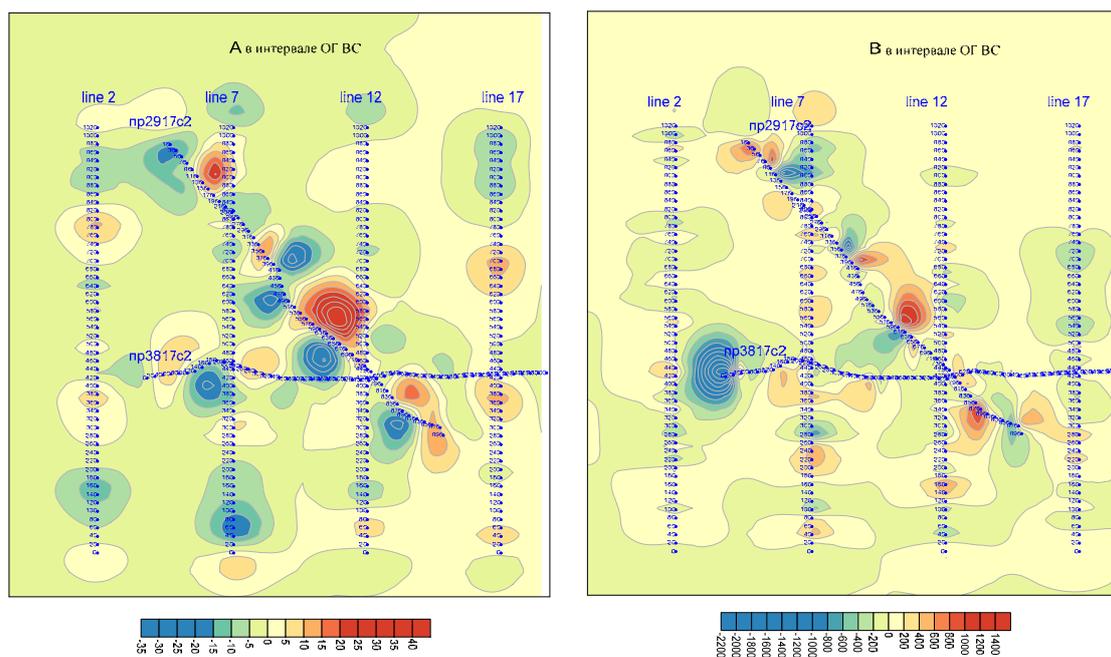


Рис. 1. Схема распределения коэффициентов А и В в интервале отражающих горизонтов ВС

Согласно ранее выполненным исследованиям в пределах шахтного поля СКРУ-2 на временных разрезах отмечается ряд наиболее динамически выраженных осей синфазности, которые соответствуют целевым сейсмическим отражающим горизонтам (ОГ), приуроченным к литофизическим границам. Выделенные отражающие горизонты по глубинным отметкам привязаны: к интервалу нижней части соляно-мергельной толщи, где возможно наличие первых выдержанных пластов каменной соли (ВС\*)-соляное «зеркало», к местоположению кровли пласта Е (Ек) и силвинитовой зоны (Сил), а также к маркирующей глине (МГ) [2].

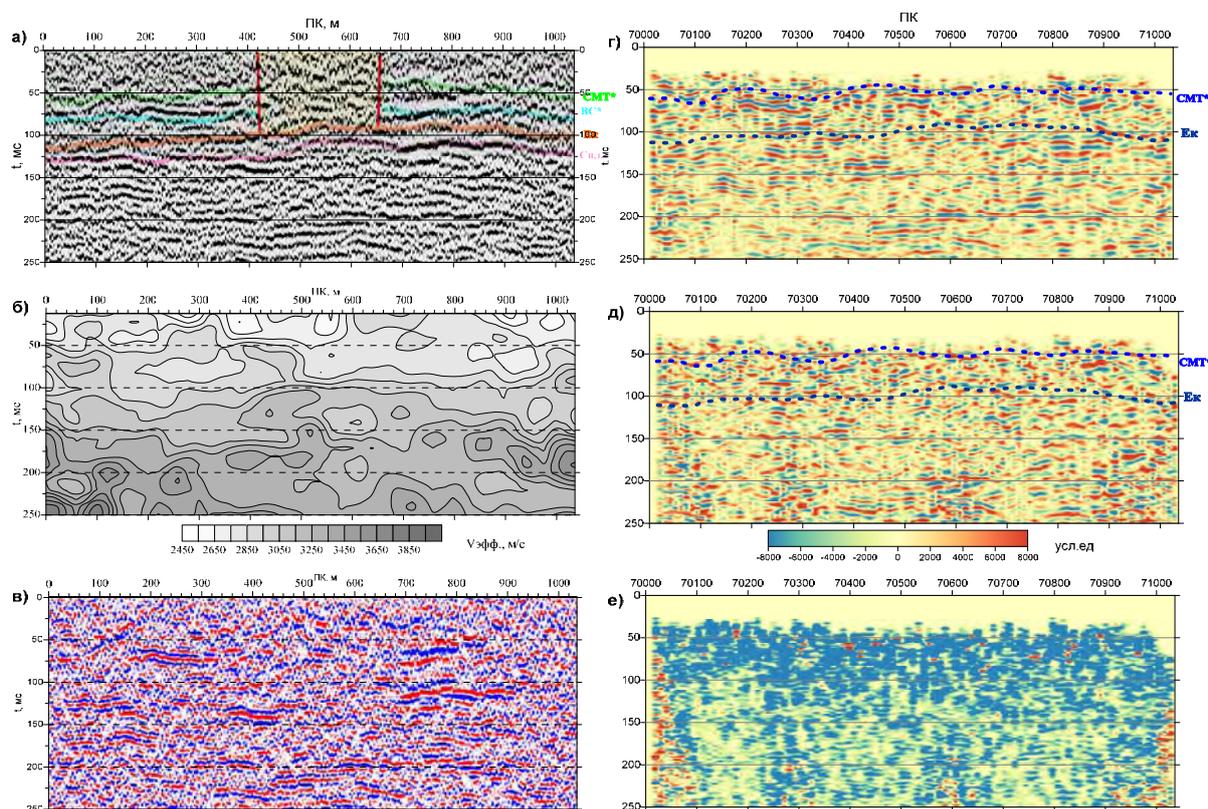


Рис. 2. Результаты интерпретации по профилю line 7: а) временной разрез ОГТ, б) скоростная характеристика, в) динамический временной разрез, г) разрез коэффициента А, д) разрез коэффициента В, е) разрез произведения АхВ

По результатам 2Д профилирования с учетом ранее полученных данных и дополнительной информации по рассмотренным линиям пунктов возбуждения из пространственной системы выполнены структурные построения и оценка пространственных закономерностей в распределении интервальных скоростей упругих волн (рис.2). По всем отражающим границам в районе «купола» выделяется положительная структурная форма, которая имеет преимущественно широтное простирание и наиболее ее высокая часть по ОГ ВС\* и ОГ Ек.

При анализе осложнений волновой картины для наземных сейсморазведочных наблюдений выделено две основные группы интерпретационных геологических моделей: 1) «ослабленные» зоны, обусловленные возможно повышенной трещиноватостью и заполнением менее прочными, «рыхлыми» отложениями, 2) высокоскоростные «уплотненные» участки, обусловленные вероятно литологическим фактором. Наибольший интерес для определения наиболее вероятных направлений развития негативных гидрогеологических процессов представляет первая группа.

Далее, в рамках работы, построены разрезы  $A$  и  $B$ . Расчет значений и построение разрезов зависимостей происходит в автоматическом режиме в программе SPS-PC. На основе сейсмограмм ОГТ и данных скоростного анализа можно получать до 5 различных атрибутов. При этом предлагается два способа расчета – на основе двучленной аппроксимации Шуэ и по уравнению Аки-Ричардса [4], позволяющей рассчитывать коэффициенты с максимальным углом падения (отражения) до  $90^\circ$ . Мы использовали уравнение Шуэ, так как применяемая система наблюдений подразумевает наибольший угол падения волны на отражающую границу –  $25^\circ$ .

Анализ пространственной изменчивости амплитудного параметра, отражающего скоростную дифференциацию по разрезу относительно ОГ ВС\* [3] показывает наличие аномальных знакопеременных значений по периферии структуры. Причем на востоке преобладают положительные (уменьшение скоростных свойств с глубиной), а на севере отрицательные (увеличение скоростных свойств с глубиной). На основании подобных пространственных закономерностей в распределении полного комплекса параметров волнового поля в рамках интерпретационной модели, формируемой по 2Д наблюдениям с учетом результатов шахтных сейсмоакустических наблюдений и данных электро-разведочных исследований, наиболее ослабленным в интервале СМТ\*-ВС\*-Ек представляется участок на севере структуры в определенной полосе.

Следует отметить, что на исследуемом участке выполнены сейсморазведочные работы формата 3Д. Что касается анализа зависимостей  $B(A)$ , построенных по данным 3Д сейсморазведки, оказывается, что такие зависимости могут быть трудно интерпретируемыми из-за большого количества наносимых на графики точек. Необоснованное удаление точек или уменьшение их количества путем фильтрации может повредить четкость графиков, но привести к потере геологической информации. Чтобы не удалять эти точки, предложено [5] использовать принципы 3Д визуализации, когда зависимости строятся для каждой из вертикальных плоскостей (обычно, продольной или поперечной) изучаемого объема. Следовательно, третьим, вводимым в зависимости  $B(A)$  измерением, является номер линии. «Пошаговое проникновение» в такой сейсмический объем, когда высвечиваются плоскости, соответствующие номерам последовательных линий, четче показывает, как фоновый тренд и выделяемые относительно его группы аномалий изменяются в пространстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воскресенский Ю.Н. Атрибутный AVO-анализ для разделения угольных и УВ-аномалий / Воскресенский Ю.Н., Иноземцев А.Н., Резванов Р.А. // Технологии сейсморазведки. – 2005. – № 12. – 24 с.
2. Санфиоров И.А. «Сейсмоизображение» гидрогеологической аномалии / И.А. Санфиоров, Г.Ю. Прийма // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 9. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2011. – С. 152-153.
3. Фатькин. К.Б. Локализация и идентификация физико-геологических неоднородностей соляной толщи методами сейсмического амплитудного анализа (на примере ВКМКС): автореф. дис. ... канд. техн. наук. 25.00.16: защищена 20.11.08 / Фатькин Константин Борисович. – Пермь, 2008. – 22 с.
4. Rutherford S.R. Amplitude-versus-offset variations in gas sands / Rutherford S.R., Williams.S.H. // Geophysics. – 1989. – V. 54, № 6. – P. 680-688.
5. Ross C.P. Improved crossplot analysis using visualization techniques / Ross C.P., Sparlin M.A. // The Leading Edge. – 2000. – V. 19, № 11. – P. 1188-1199.

Т.В. БАЙБАКОВА  
Горный институт УрО РАН  
**ПРИМЕРЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ  
ПРИ ИЗУЧЕНИИ СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ  
В ПРЕДЕЛАХ ВКМКС**

Одним из сложных геологических объектов Верхнекамского месторождения является Поповское поднятие на руднике СКРУ-2. В пределах поднятия (рис. 1) отсутствует верхняя часть карналлитовой зоны местами до пласта Е с замещением на вторичные сильвиниты. Могут отсутствовать переходная пачка и покровная каменная соль (скв.637, скв.267). В центре и на северо-западе установлены зоны замещения сильвинитовой пачки каменной солью. На западе прогнозируется область развития Соликамского надвига, а в центре вся площадь с севера на юг «разбита» линейными тектоническими нарушениями по кровле и подошве калийной залежи типа: сдвиг, надвиг, сброс [2].

Мощность ВЗТ определяется наличием переходной пачки (ВЗТ<sub>1</sub>), покровной каменной соли (ВЗТ<sub>2</sub>) и верхней частью Карналлитовой зоны (ВЗТ<sub>3</sub>) в геологическом разрезе. Отсюда и выделяют полный (ВЗТ<sub>1</sub>+ВЗТ<sub>2</sub>+ВЗТ<sub>3</sub>), неполный (ВЗТ<sub>1</sub>+0+0) и переходный между ними (ВЗТ<sub>1</sub>+ВЗТ<sub>2</sub>+0) типы разрезов. Неполный тип разреза ВЗТ относится к аномальным особенностям и расположены всегда на сводах крупных поднятий (Поповского, Рудничного, Харюшинского и т.д.). Они имеют карстогенно-тектоническое происхождение и субвертикальную ориентировку в разрезе.

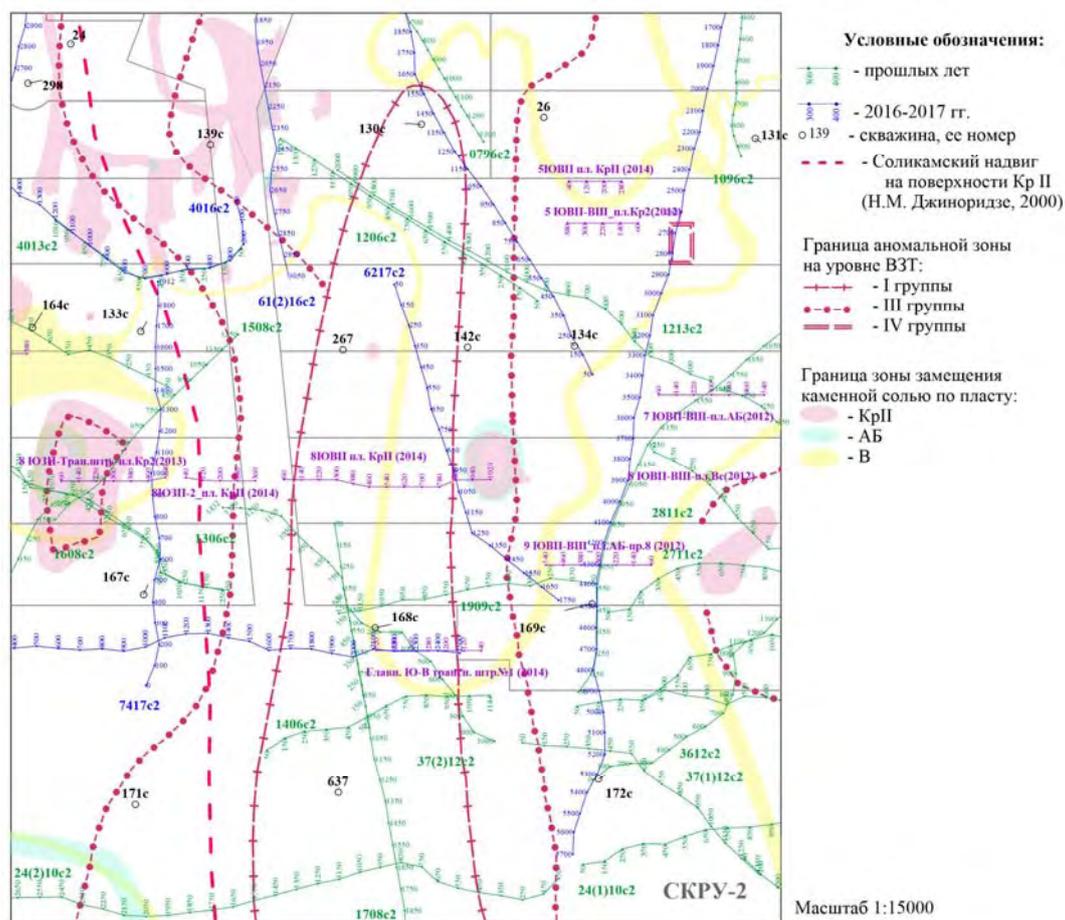


Рис. 1. Обзорная схема района работ

В связи со сложными геологическими условиями и, исходя из решаемой геологической задачи, рассмотрим профили, которые располагались в крест исследуемым геологическим неоднородностям. С севера на юг секущие профили: №1213, 6217, 1909, 37(2)12, 1406 (рис. 2), 7216, 24(2)10.

На окончательных временных разрезах выделен ряд отражающих горизонтов (ОГ), которые приурочены к кровле: верхних пластов каменной соли в надсоляной толще (ВС), карналлитового пласта Е, сильвинитовой пачки (Сил.) и подстилающей каменной соли (ПдКС).

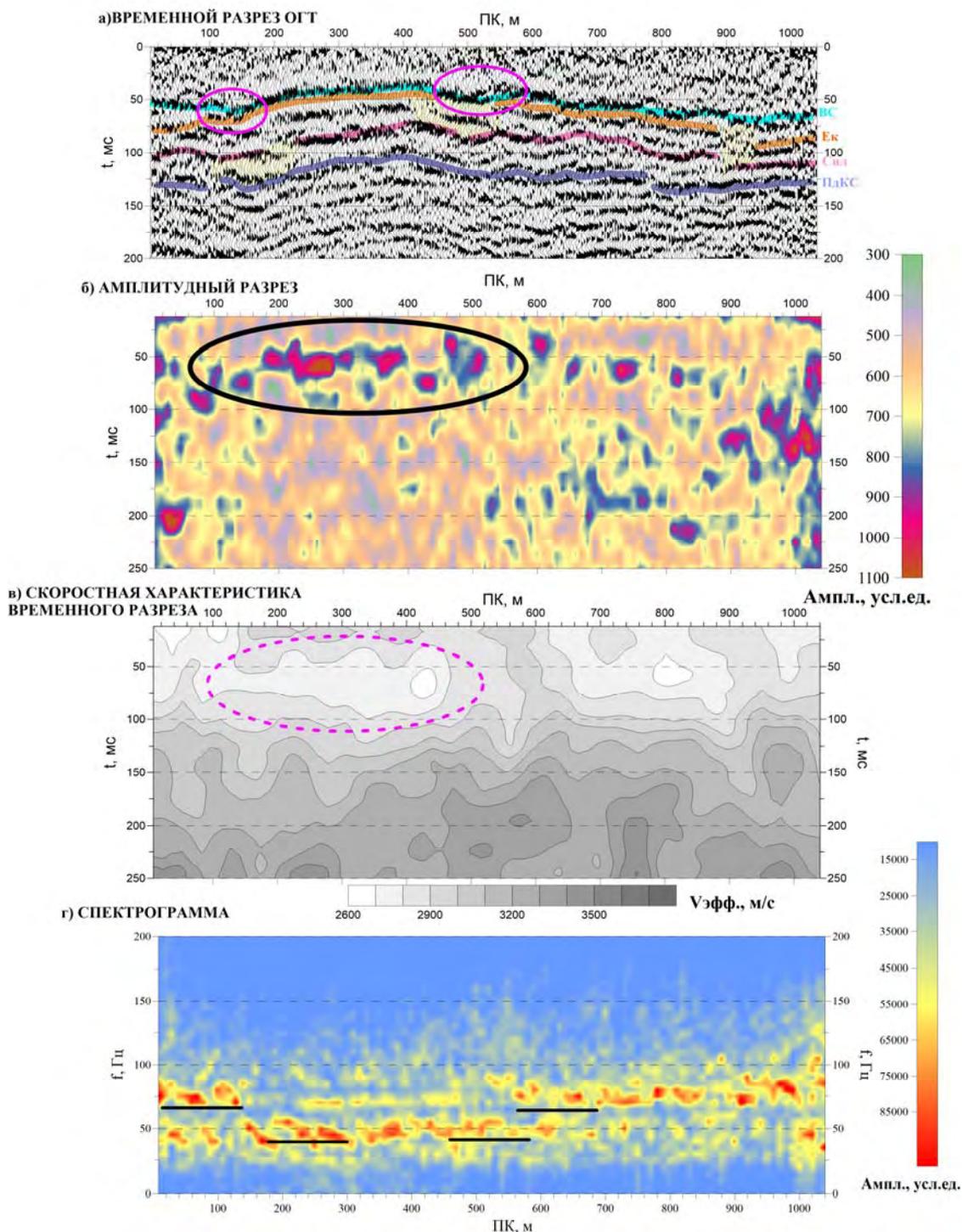


Рис. 2. Результаты цифровой обработки по профилю 1406с2

По особенностям структуры волновой картины (рис. 2а) в исследуемом интервале разреза можно отметить: нарушения в прослеживании отражающих границ, связанными с резкой изменчивостью их гипсометрии. Кроме того, в интервале временного разреза от ОГ ВС до ОГ Е выпадает целый ряд осей синфазности и отмечается сближение данных отражений, почти до их слияния.

Отмеченные особенности волновой картины по-разному выражены и в динамическом временном разрезе (рис. 2б). При уменьшении мощности пластов (до полного выклинивания слоя) суммирование происходит как в фазе, так и в противофазе. Это приводит, в свою очередь, к резкой смене высоких амплитуд на низкие. Как мы можем наблюдать, на амплитудных разрезах максимальные значения сконцентрированы как раз в зонах выклинивания. Области затухания сейсмической записи могут быть отнесены к тектоническим нарушениям - интенсивная складчатость (область влияния предполагаемого Соликамского надвига).

Зона измененной структуры ОГ ВС, связанная с уменьшением мощности соляных пластов и выклиниванием, подтверждается и на спектрограмме, представляющей распределение амплитудных спектров, рассчитанных в исследуемом интервале временного разреза (от 50 до 150 мс). В пределах предполагаемой области уменьшения мощности соляных пластов наблюдается повышение частотного состава от 45-60 гц до 80-90 гц (рис. 2г). Иногда повышение носит ступенчатый характер. Подобные резкие изменения спектрального состава обычно отмечаются для зон выклинивания [3]. Можно предположить, что первая ступень вызвана выпадением из разреза пластов покровной каменной соли. А в пределах второй изменения касаются уже верхов карналлитовой зоны.

На скоростной характеристике ко всем рассмотренным профильным линиям приурочены пониженные значения эффективных скоростей (рис. 2в). Наибольшее снижение значений скоростной характеристики отмечается в зоне слияния ОГ Е и ВС. Снижение значений эффективных скоростей характерно в основном зонам выклинивания на западном фланге Поповского поднятия. В значениях интервальных скоростей западный фланг Поповского поднятия характеризуются более выраженными отрицательными тенденциями [1].

По совокупности рассмотренных параметров волнового поля и степени их аномальности можно предположить геологическую природу выделенных участков: 1) зона галитизации, 2) интенсивная складчатость (область влияния предполагаемого Соликамского надвига), 3) выпадение структурных элементов в перекрывающих продуктивную толщу отложениях. Спектральный анализ в большей степени помогает определить границы выклинивание пластов. Резкие изменения эффективных скоростей могут быть связаны как с выклиниванием, так и со складчатыми зонами (влияние Соликамского надвига). Сильный контраст амплитуд наблюдается на сводах поднятий, где выклиниваются пласты в ВЗТ, а затухание амплитуд – в зонах замещения и тектонических нарушениях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байбакова Т.В. Информативность динамических и кинематических параметров отражённых волн при выделении контрастных скоростных неоднородностей // Современные проблемы геофизики: седьмая Урал. молодёжная науч. шк. по геофизике: сб. материалов. / ГИ УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2006. – С. 14-17.
2. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с.
3. Санфиоров И.А. Интерпретация спектральных характеристик отраженных волн в зонах выклинивания / Санфиоров И.А., Погребинский М.С. // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: межвуз. сб. науч. тр. / ПГУ. – Пермь, 1986. – С. 86-92.

В.Ю. БОБРОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ОЦЕНКА ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ  
ПРОЦЕДУР ГРУППИРОВАНИЯ  
В МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКЕ**

Малоглубинные сейсморазведочные работы хорошо зарекомендовали себя при мониторинге потенциально опасных участков в пределах подработной территории Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) [1,2].

Приоритетными задачами при мониторинге являются качество сейсморазведочных результатов и оперативность получения информации, которые в свою очередь зависят от нескольких аспектов. Одним из главных являются правильный выбор источников упругих колебаний и подбор сейсмоприемников.

Выбор источника упругих колебаний при малоглубинной сейсморазведке напрямую зависит от технологических, экономических, экологических, а также ряда других факторов [2]. При мониторинге потенциально опасных территорий ВКМКС применяется два типа источника – механизированный молот типа AWD-40 и импульсный пороховой источник 12 калибра. Данные источники идентично обеспечивают генерацию волнового поля частотного диапазона с интенсивностью, достаточной для регистрации отражённых волн в интервале исследуемых глубин [3].

Проведение малоглубинных сейсморазведочных работ в пределах градо-промышленных агломераций, исключает применение импульсного порохового источника. Однако, применение механизированного молота в условиях плохой проходимости, связанной с тяжелыми рельефными условиями, исключается, в связи недостаточной мобильностью установки [4]. Следовательно, выбор источника упругих колебаний непосредственно зависит от ландшафтных условий исследуемой территории.

Не менее важным аспектом, является выбор сейсмоприемников. На вооружении полевого отряда имеются одиночные сейсмоприемники GS-ONE (USA) и Sunfull PS-10R (China), а также группы из 5 сейсмодатчиков с интервалом 4 метра GS-20DX (USA). Для создания оптимальной системы наблюдений, существует необходимость в сравнительном анализе информационных возможностей одиночных и групп приемников.

Учитывая технические характеристики одиночных датчиков американского [5] и китайского производства [6], произведен сравнительный анализ сейсмограмм, полученных с использованием вышеперечисленных, можно сделать вывод, что данные сейсмоприемники практически идентичны и отвечают заявленным требованиям (Рис. 1).

Произведен сравнительный анализ по полученным сейсмограммам одиночных и групп датчиков. Для сейсмограмм, полученных одиночными датчиками, применено цифровое группирование на базе 5 трасс через 4 метра (Рис. 2).

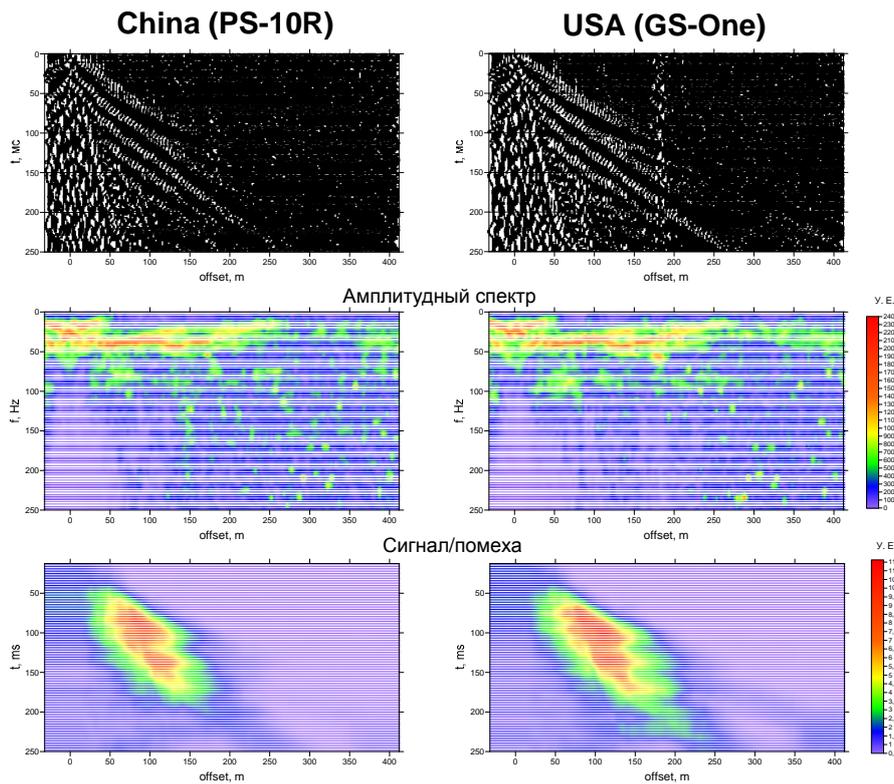


Рис. 1. Сравнительный анализ сейсмограмм одиночных датчиков

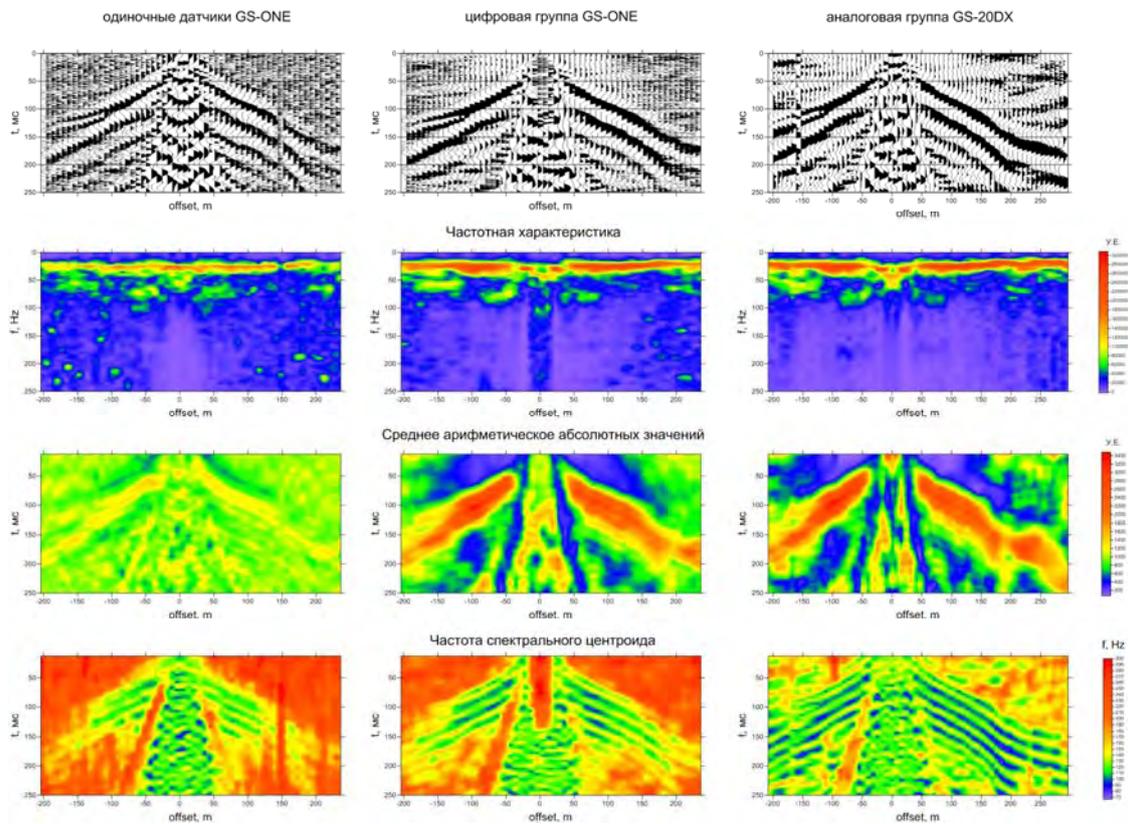


Рис. 2. Сравнительный анализ сейсмограмм одиночных датчиков, цифровой группы, группы датчиков

Цифровое группирование привело к увеличению энергетических показателей сейсмической записи и сглаживанию помех.

При рассмотрении временных разрезов (Рис. 3), полученных по сейсмограммам с использованием рассматриваемых способов регистрации и в рамках одинакового графа обработки, можно сделать вывод, что цифровая группа менее информативна в верхней части разреза (ВЧР), по сравнению с одиночными датчиками.

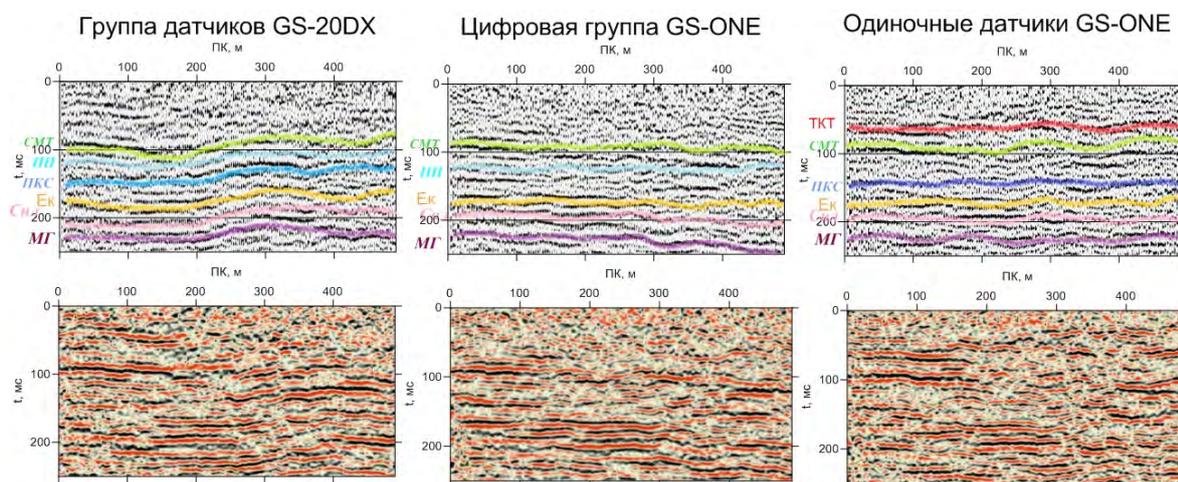


Рис. 3. Временные разрезы

ВЧР (0-100 мс) лучше детерминируется одиночными датчиками, в то время как с помощью группы приемников, которая является более низкочастотной, хорошо прослеживаются более глубокозалегающие отражающие горизонты.

Исходя из этого, можно рекомендовать применение группы приемников при систематическом мониторинге потенциально опасных участков ВКМКС, а одиночные датчики использовать на территориях повышенной опасности с целью повышения оперативности полевых работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О перспективах малоглубинной сейсморазведки 3D на Верхнекамском месторождении солей / И.А. Санфиров, А.Г. Ярославцев, А.А. Жикин, С.В. Глебов, Герасимова И.Ю. // Геофизика. – 2015. – № 5. – С. 6-11.
2. Санфиров И.А. Опыт применения сейсморазведки ОГТ для решения инженерно-геологических задач / И.А. Санфиров, А.Г. Ярославцев // Геофизика. – 2004. – № 3. – С. 27-30.
3. Санфиров И.А. Сравнительный анализ различных типов невзрывных источников для малоглубинной сейсморазведки / И.А. Санфиров, К.Б. Фатькин // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. конф. / ПГУ. – Пермь, 1997. – С. 1-10.
4. Бобров В.Ю. Сравнительный анализ источников упругих колебаний для инженерных сейсморазведочных работ // XIX Уральская молодежная научная школа по геофизике: сб. науч. материалов / ИГФ УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2018. – С.27-29.
5. <http://geospace-ufa.ru/catalog/geofony/gs-one.html>.
6. <http://www.sunfull.com/ru/content/?96.html>.

А.А. ТАЙНИЦКИЙ  
Горный институт УрО РАН  
**РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВЭЗ  
МЕТОДОМ МИНИМИЗАЦИИ ЭМПИРИЧЕСКОГО РИСКА  
ДЛЯ ГРУППЫ ЗОНДИРОВАНИЙ**

Метод ВЭЗ является одним из наиболее распространенных из методов сопротивлений. Это обусловлено его простотой при реализации полевых измерений, высокой оперативностью и относительно небольшой экономической стоимостью работ. Перечисленные факты позволяют при сравнительно небольших трудозатратах получить ценную информацию о распределении электрических свойств в зависимости от глубины, а так же вдоль исследуемого профиля.

Однако сегодня большая часть геофизических наблюдений выполняется в пределах действующих промышленных объектов, городских агломераций в сложных геологических условиях, что накладывает отпечаток на качество получаемого материала. Интенсивные помехи становятся неотъемлемой частью получаемых полевых данных, поэтому остро встает вопрос о разработке методов и алгоритмов способных выделять полезную информацию из «зашумленного» сигнала.

Как было показано ранее [1, 2] на модельных примерах метод МЭР позволяет получать относительно достоверные результаты, при интерпретации данных осложненных помехой. При этом отсутствует необходимость знания закона распределения помехи в интерпретируемых значениях поля, достаточно выполнения предположения о близости к нулю медианного значения помехи. На основе данного подхода успешно были реализованы алгоритмы решения ОЗ с подбором параметров вектора сопротивлений при фиксированных значениях мощности слоев, а так же подбора полного вектора параметров разреза [3].

В реальных условиях приходится иметь дело не с единичной кривой зондирования, а с серией кривых вдоль профиля. Таким образом, в рамках данного подхода предпринята попытка реализовать алгоритм, когда подбирается одновременно несколько кривых ВЭЗ. В качестве априорной информации выступают обобщенные параметры разреза, что в реальных условиях может соответствовать наличию данных бурения по скважине расположенной, где то вблизи профиля.

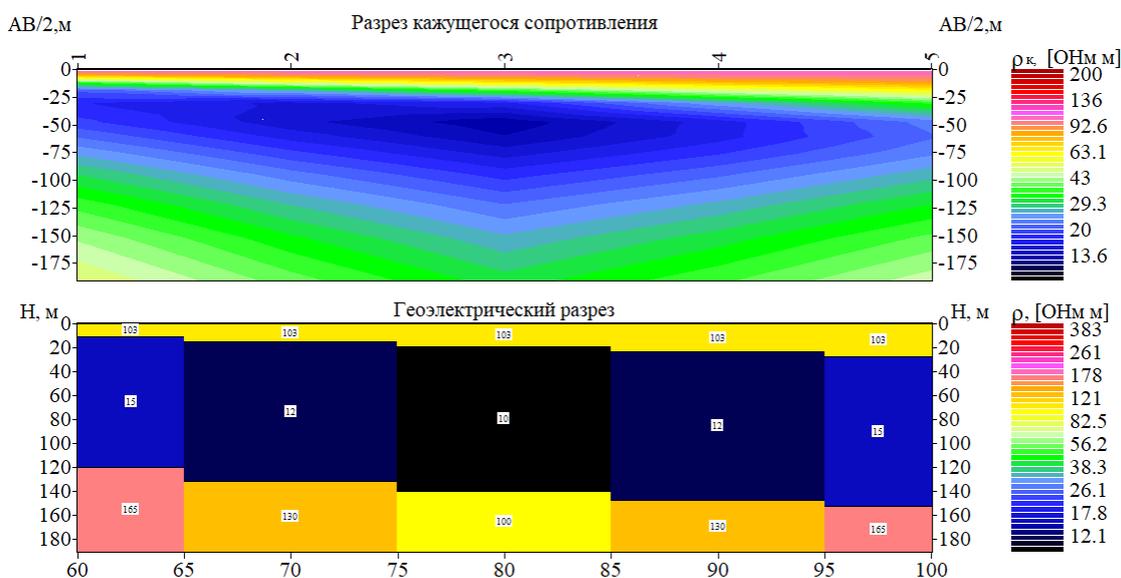


Рис. 1. Модельный разрез кажущегося сопротивления и геоэлектрический разрез

В качестве примера использована трехслойная модель типа  $H$ , в которой проводящий слой постепенно погружается. Для данной модели рассчитана одномерная прямая задача ВЭЗ в пяти точках (рис.1). Рассчитанные кривые осложнены случайно сгенерированной помехой.

В ходе эксперимента выполнены расчеты для 100 вариантов решения обратной задачи, для каждого варианта генерировалось  $10^5$  случайных комбинаций вектора параметров разреза принадлежащих области допустимых значений  $\{\rho^{min}_i < \rho_i < \rho^{max}_i, h^{min}_i < h_i < h^{max}_i\}$ , процедурами типа Монте-Карло [2].

Для уменьшения количества возможных комбинаций в заданном коридоре значений параметров использован общий критерий отбора, отсекающий варианты заведомо «далекие» от искомого решения. В качестве такого критерия выступает относительное среднеквадратичное отклонение (СКО) кривой рассчитанной для параметров случайного вектора значений от среднегеометрической кривой по профилю (для данной задачи принято, что  $СКО \leq 100\%$ ). Если условие выполняется, то рассчитанная теоретическая кривая сравнивается уже с каждой кривой ВЭЗ вдоль профиля. В противном случае попытка не засчитывается и генерируется новый вектор случайных параметров разреза.

При сравнении теоретической кривой, рассчитанной для параметров случайного вектора, с конкретной кривой ВЭЗ, так же в качестве критерия отбора используется СКО (для данной задачи  $СКО \leq 50\%$ ). При выполнении условия, значения параметров случайного вектора относятся к одному из подмножеств множества  $D$  допустимых решений для данной кривой зондирования, в противном случае, данное решение отбрасывается и впоследствии не учитывается.

В конечном итоге рассчитывается функция плотности вероятностей на структурированном множестве допустимых вариантов решения обратной задачи для каждой кривой ВЭЗ и выбирается наилучшее решения по минимуму математического ожидания его погрешности[1, 2].

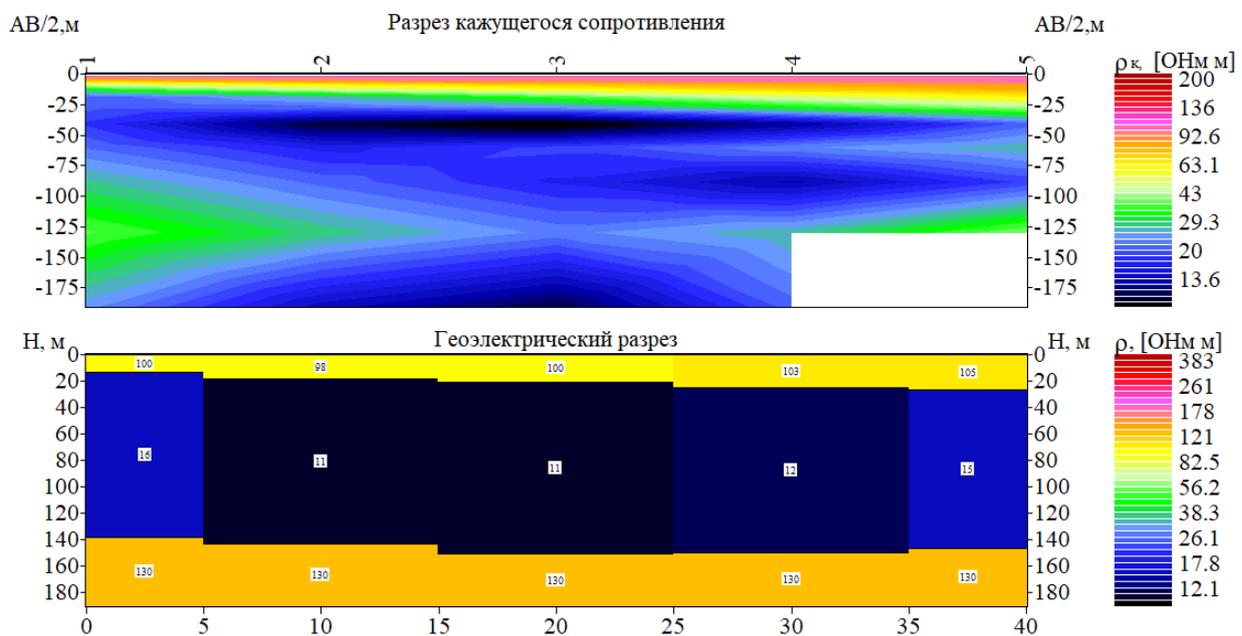


Рис. 2. Разрез кажущегося сопротивления, осложненный помехой и геoeлектрический разрез, полученный в результате решения обратной задачи

Обобщенные результаты расчета 100 вариантов решения обратной задачи, сведены в таблицу 1, а так же представлены в виде геoeлектрического разреза на рисунке 2.

В таблице 1, так же отражены численные среднеквадратичные отклонения полученных параметров разреза от модельных по формуле (1):

$$\delta_{\text{отн}} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_{\text{мод}} - q_i}{q_{\text{мод}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} * 100 \quad (1)$$

где  $q$  – параметры разреза (сопротивление, мощность). Максимальное отклонение составило 15,11 % на пикете 1, а минимальное – 3,7% (пк 4), при условии, что исходные параметры разреза были наиболее близкими к значениям сопротивления и мощности на пикете 4.

Таблица 1

	1		2		3		4		5	
	модель	решение								
$\rho_1$	103	100	103	98	103	100	103	103	103	105
$\rho_2$	15	16	12	11	10	11	12	12	15	16
$\rho_3$	165	130	130	130	100	130	130	130	165	130
$h_1$	11	13	15.2	18	19.3	21	23.1	25	27.1	27
$h_2$	109	125	116	125	121	130	124	125	125	120
$\delta_{\text{отн}}, \%$		14.48		9.93		15.11		3.7		9.69

Таким образом, показано метод минимизации эмпирического риска позволяет получать относительно достоверные результаты даже при наличии помех в исходном поле. Кроме того, реализуемый подход позволяет проводить одновременный подбор серии кривых ВЭЗ вдоль профиля, что позволяет снизить затраты времени на количественную интерпретацию.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-35-00320).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балк П.И. Смешанный вероятностно-детерминистский подход к интерпретации данных гравиразведки, магниторазведки и электроразведки / П.И. Балк, А.С. Долгаль, А.В. Мичурин // Докл. Акад. наук. – 2011. – Т. 438, № 4. – С. 532-537.
2. Подавление знакопеременных помех при инверсии данных вертикального электрического зондирования / Балк П.И., Долгаль А.С., Мичурин А.В., Тайницкий А.А., Христенко Л.А. // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. – 2016. – Вып. 2 (31). – С. 55-63.
3. Тайницкий А.А. Интерпретация данных электроразведки методом минимизации эмпирического риска / А.А. Тайницкий А.В. Кичигин // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию Первой Всесоюз. геофизич. конф. / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2017. – С. 191-195.

Л.А. ХРИСТЕНКО

*Горный институт УрО РАН***МЕТОД ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ  
ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ИНФОРМАТИВНЫХ КОМПОНЕНТ  
РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ**

Графики геофизических полей отражают взаимодействие большого количества разнообразных процессов или факторов. Поэтому возникает закономерное желание разделить график на различные по спектру составляющие и анализировать каждую из компонент по отдельности.

Задача разделения наблюденного поля на составляющие не является оригинальной, т.к. исследования связанные с этим проводятся на протяжении ни одного десятилетия. Оригинальными являются идеи или их реализация. Ими можно воспользоваться для решения практических задач, что в свою очередь, требует проведения некоторых вычислительных экспериментов. В статье представлены результаты вычислительных экспериментов по разложению данных электрометрических наблюдений на эмпирические моды с помощью программы EMD, реализованной А.С.Долгалем [3].

Эмпирическая модовая декомпозиция (EMD) является важнейшей составляющей преобразования Гильберта-Хуанга (Huang–Hilbert Transform – ННТ) [1]. Преобразование ННТ производится в два этапа. Сначала при помощи алгоритма EMD находятся эмпирические моды или внутренние колебания (Intrinsic Mode Functions, IMF). На втором этапе при помощи преобразования Гильберта на их основе определяется мгновенный спектр исходной последовательности данных. Преобразование Гильберта-Хуанга позволяет находить мгновенный спектр нелинейных нестационарных последовательностей данных. Соответственно и эмпирическая модовая декомпозиция предназначена для работы с нелинейными нестационарными последовательностями данных, к которым относятся геофизические данные.

В отличие от вейвлет-преобразования в процессе эмпирической модовой декомпозиции производится разложение на некоторое число функций (IMF), которые не заданы аналитически и определяются исключительно самой анализируемой последовательностью данных. При этом базисные функции преобразования формируются адаптивно, непосредственно из входных данных. Вейвлет-преобразование, так же как и преобразование Фурье, производит разложение в фиксированном базисе функций. Этот базис должен быть предварительно задан, то есть должна быть выбрана конкретная вейвлет-функция, используемая в процессе преобразования.

В основе предложенного Хуангом алгоритма EMD лежит построение гладких огибающих по максимумам и минимумам последовательности, вычисление средних значений и дальнейшее вычитание среднего этих огибающих из исходной последовательности.

В результате перечисленных шагов в первом приближении находится искомая эмпирическая функция. Для полноценного выделения IMF необходимо вновь найти максимумы и минимумы у этой оценки IMF, и повторить изложенные ранее действия. Этот повторяющийся процесс называется просеиванием (sifting). Процесс просеивания продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная погрешность или осуществлено требуемое число итераций.

В процессе декомпозиции получается семейство IMF функций, упорядоченных по частоте. Каждая последующая IMF имеет более низкую частоту, чем предыдущая. Ис-

пользование термина "частота" по отношению к IMF не совсем корректно, хотя, наверное, наилучшим образом подходит для определения ее характера.

На рисунке 1 приведены результаты работы программы EMD на примере графика значений кажущегося сопротивления (КС). КС были получены в результате съемки методом срединного градиента с шагом 10 метров, выполненной в пределах шахтного поля ВКМКС. В результате вычисления по исходному графику были выделены 6 IMF и остаток  $r$ . На рисунке все графики представлены в едином масштабе, что позволяет оценить вклад каждой из найденных IMF в исходный график. Но при таком построении недостаточно отчетливо видны особенности каждой из IMF. Чтобы отразить эти особенности можно использовать при построении индивидуальный масштаб для каждой IMF.

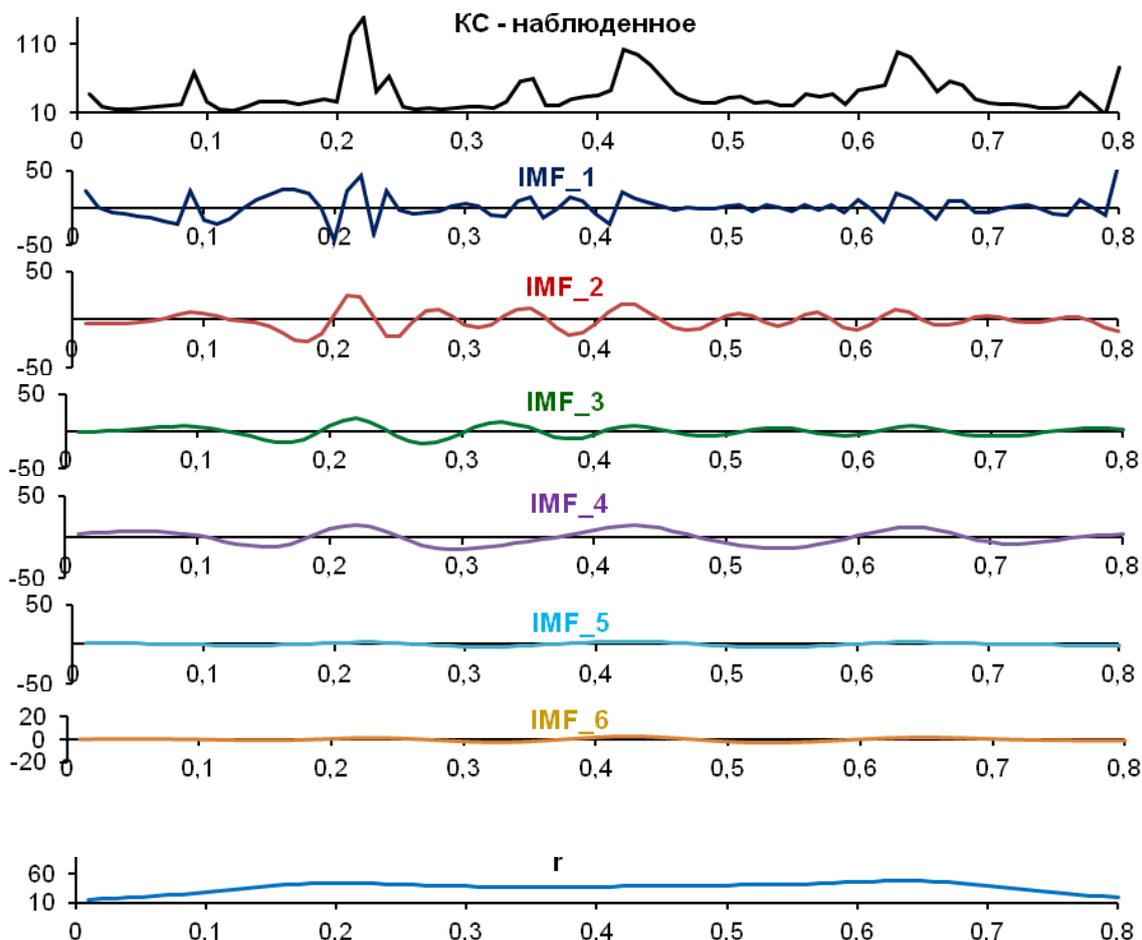


Рис. 1. Разложение графика значений кажущегося сопротивления на функции IMF и остаток  $r$

На примере этого же графика наблюдаемых значений КС на рисунке 2 показан процесс получения первого приближения IMF\_1: огибающая по максимумам (пунктирная линия зеленого цвета); огибающая по минимумам (пунктирная линия бардового цвета); средняя (сплошная линия красного цвета); первое приближение для IMF\_1, как результат вычитания средней из наблюдаемого графика (сплошная линия голубого цвета).

Кроме разложения на составляющие, алгоритм EMD может быть использован для сглаживания графиков наблюдаемых параметров. Для этого можно просуммировать полученные в процессе декомпозиции пять IMF (начиная со 2-ой) и остаток  $r$ . Из ис-

ходной последовательности значений КС в этом случае будет исключена самая высокочастотная из найденных составляющих IMF 1, ассоциирующаяся с помехой. Если при суммировании исключить две первые компоненты: IMF 1 и IMF 2, то результирующая кривая будет еще более гладкой.

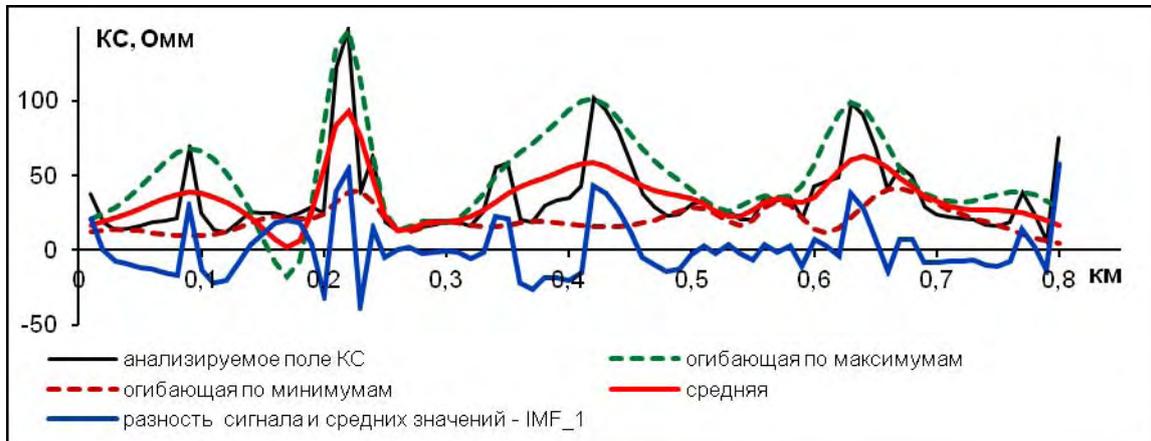


Рис. 2. Построение первого приближения IMF 1\_1 графика КС

Кроме того, после получения отдельных компонент, можно организовать достаточно гибкий алгоритм снятия фоновой составляющей. За фоновую компоненту можно принять остаток  $r$  от декомпозиции или остаток, просуммированный с одной или несколькими последними IMF. Количество IMF, участвующих совместно с остатком в формировании фоновой составляющей, может варьироваться в зависимости от имеющихся у нас представлений о ней.

Процедуру снятия фона очень легко совместить со сглаживанием полученного результата, если из процесса суммирования исключить самую высокочастотную IMF\_1. На рисунке 3 в качестве примера получения фоновой составляющей показаны 3 варианта, использующие этот прием: сумма IMF\_2 – IMF\_6 (линия зеленого цвета); сумма IMF\_4 – IMF\_6 и остатка  $r$  (линия красного цвета); сумма IMF\_5, IMF\_6 и остатка  $r$  (линия голубого цвета).

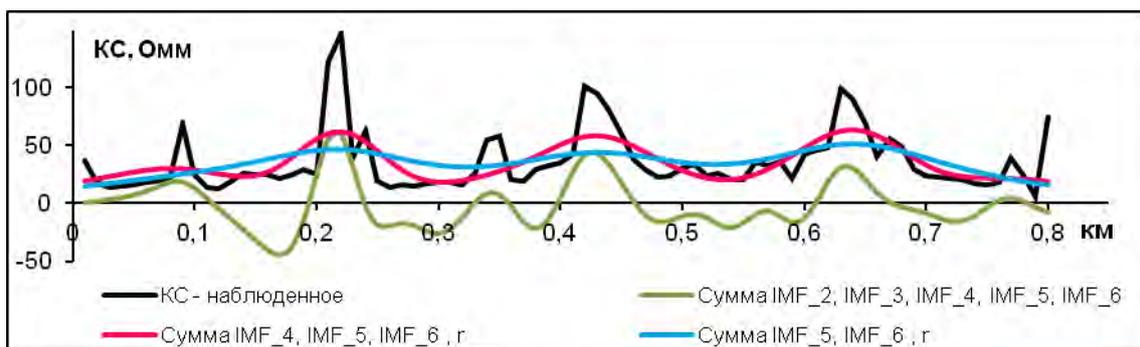


Рис. 3. Варианты формирования фоновой компоненты графика КС

Определенные сложности при применении EMD на практике связаны с появлением в ряде случаев коррелирующих между собой IMF. Это так называемый эффект микширования мод. Для подавления этого эффекта предлагается вычислить значения парных коэффициентов корреляции между всеми IMF и проанализировать их. Затем просуммировать составляющие, имеющие тесную корреляционную связь (табл.). Из таблицы видно, что IMF\_4,

IMF\_5 и IMF\_6 тесно связаны между собой, поэтому наиболее достоверный результат формирования фоновой составляющей получен при их суммировании.

Таблица

Парные коэффициенты корреляции IMF функций разложения графика КС

	IMF_1	IMF_2	IMF_3	IMF_4	IMF_5	IMF_6
IMF_1	1					
IMF_2	-0.079	1				
IMF_3	-0.075	0.5201	1			
IMF_4	0.0025	0.183	0.4405	1		
IMF_5	0.0354	0.0846	0.1086	0.8923	1	
IMF_6	0.0042	0.1123	0.0799	0.8528	0.9765	1

Для более отчетливого выделения скрытых закономерностей изменения амплитуды поля КС ранее [5] предварительно выполнялось быстрое вейвлет-преобразование (БВП) дискретных значений кажущегося сопротивления с помощью программы HAAR\_2 [2]. Программа реализует сжатие сигнала, представленного в виде значений амплитуд, с использованием разложения в базисе Хаара. Выполнение БВП для сглаживания графиков наблюдаемых значений потенциала ЕП не давало желаемого результата. Программа EMD позволила выполнить разложение графика ЕП на 5 IMF и остаток, из которых можно сформировать фоновые составляющие или просто очистить от помех график наблюдаемых значений потенциала ЕП (рис. 4).

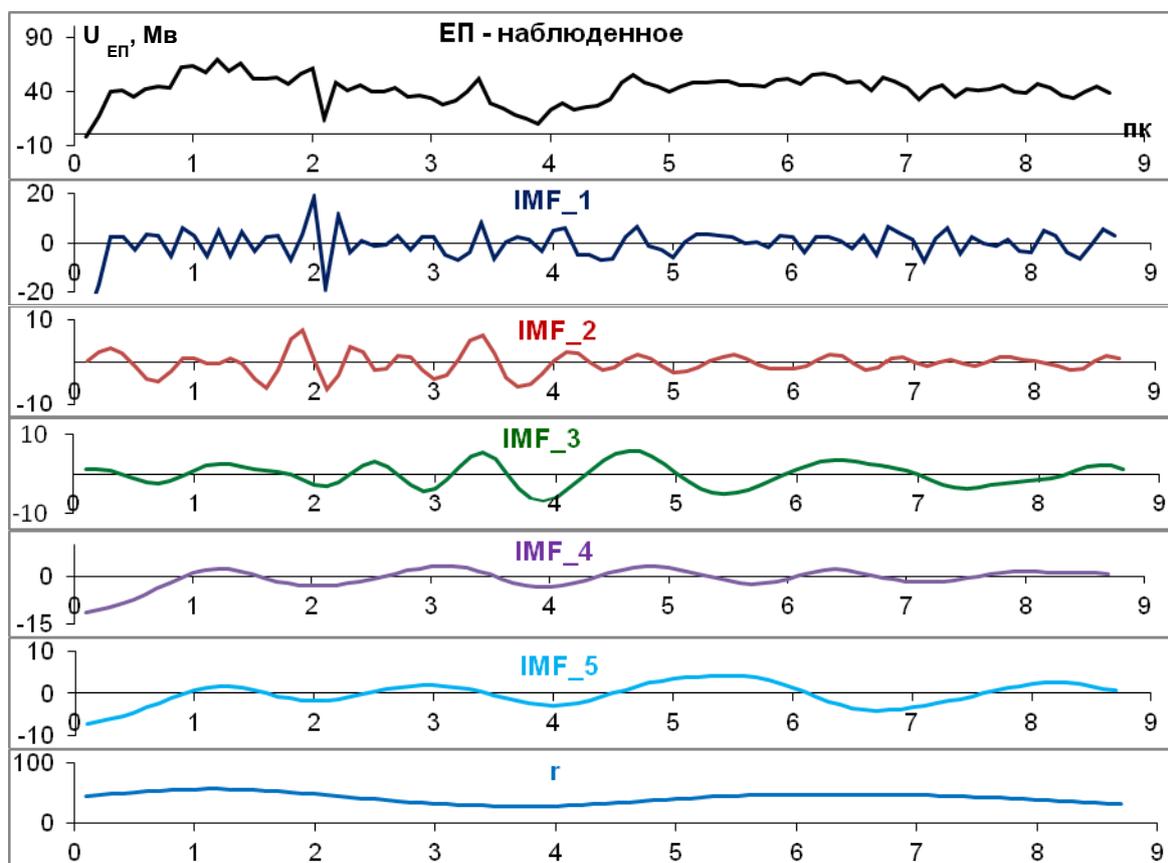


Рис. 4. Разложение графика значений потенциала естественного поля на функции IMF и остаток r

В связи с полученными результатами, в дальнейшем видится целесообразным отказаться от быстрого вейвлет-преобразования с базисной функцией Хаара и перейти к эмпирической модовой декомпозиции.

Большинство алгоритмов производят разложение последовательности данных на составляющие, не являющиеся в действительности исходными процессами, из которых реально была сформирована исследуемая последовательность данных. Это как бы синтетические компоненты, выделение которых просто помогает лучше понять структуру входной последовательности и во многих случаях позволяет упростить ее анализ. Метод EMD не является исключением. Ни в коем случае не следует считать, что полученные при помощи этого метода компоненты отражают реальные физические процессы, из которых были первоначально сформированы исходные анализируемые данные. Любые преобразования требуют проверки на соответствие содержательному смыслу.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-45-590046.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C.C., Liu H. H. // Proceedings of the royal society A-Mathematical physical and engineering sciences. – 1998. – V. 454, № 1971. – P. 903-995. – DOI: 10.1098/rspa.1998.0193
2. Долгаль А.С. Применение кратномасштабного вейвлет-анализа при аналитических аппроксимациях геопотенциальных полей / А.С. Долгаль, А.А. Симанов // Докл. Акад. наук. – 2008. – Т. 418, № 2. – С. 256-261.
3. Долгаль А.С. Применение эмпирической модовой декомпозиции при обработке геофизических данных / Долгаль А.С., Христенко Л.А. // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 100-108.
4. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации: учеб. пособие / А.А. Никитин, А.В. Петров. – М.: Центр информ. Технологий в природопользовании, 2008. – 112 с.: ил.
5. Совершенствование интерпретации данных мониторинговых электроразведочных наблюдений с помощью аппарата теории оценок / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов, А.В. Кичигин, Е.И. Паршаков, А.А. Тайницкий, К.Н. Ширяев // Инженерная геофизика 2017: материалы 13-й науч.-практ. конф. и выставки. – Кисловодск, 2017. – DOI 10.3997/2214-4609.201700419. Электрон. изд. режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=88140>. Code 129037.
6. Христенко Л.А. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи / Христенко Л.А., Степанов Ю.И. // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.
7. Христенко Л.А. Интерпретация геоэлектрических данных с использованием и вероятностно-статистических характеристик при решении инженерно-геологических задач / Христенко Л.А., Степанов Ю.И. // Геоинформатика / НАН Украины. – 2015. – № 4 (56). – С. 29-34.

Е.И. ПАРШАКОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И МЕТОДОВ БЕЗЭТАЛОННОЙ КЛАССИФИКАЦИИ  
ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЯ**

Для повышения достоверности и информативности результатов интерпретации естественных и искусственных электрических полей можно использовать вероятностно-статистический подход.

Получаемые в результате геолого-геофизических исследований данные можно считать выборкой одной или нескольких случайных величин. Это позволяет анализировать их статистические характеристики с помощью аппарата теории оценок. Такой анализ существенно увеличивает объем полезной информации, содержащейся в наблюдениях, позволяет подчеркнуть особенности изменения геополей, оценить закономерности распределения изучаемого параметра, а это, в свою очередь, повышает эффективность процесса геологической интерпретации и качество конечных результатов в целом.

Основополагающая идея многомасштабного вейвлет-представления сигналов заключается в разбивке имеющихся цифровых значений на 2 составляющие: "грубую" (аппроксимирующую) и "уточненную" (детализирующую), с последующей их детализацией итерационным методом. Для выполнения прямого и обратного вейвлет-преобразования, особенно с применением быстрых алгоритмов преобразований, используют вейвлеты на основе ортогональных базисных функций, функция Хаара - простейшей пример ортогонального вейвлета.

Процедура БВП ранее уже была апробирована на участке ВКМКС. Значения КС были разложены на 2, 3, 4 и 5 уровней, при заданной погрешности 1 и 2 Ом, где наиболее предпочтительными оказались значения КС на 4-м уровне разложения при пороговой погрешности в 2 Ом [4, 5].

Использование вейвлетов позволило выявить и описать скрытые особенности сигналов, получить удобные для анализа представления графики электрических параметров при различной детальности их рассмотрения. Было высказано предположение о том, что вейвлет-преобразование дискретных значений кажущихся сопротивлений (КС) позволит получить более достоверные результаты.

Электроразведочные работы проводились на подработанных площадях шахтного поля СКРУ-2. Исследования выполнялись трехразносным симметричным электропрофилеированием (СЭП) по 9 профилям на трёх разносах питающей линии АВ\2(50,100 и 160 м) с шагом 25 м. На рис. 1. представлена схема выполненных электроразведочных работ.

Для того чтобы отчетливо выделить скрытые закономерности изменения амплитуды поля КС предварительно проведено быстрое вейвлет-преобразование (БВП) дискретных значений кажущегося сопротивления с помощью программы HAAR\_2 [1]. Программа производит сжатие сигнала, представленного в виде значений амплитуд, с использованием разложения в базисе Хаара.

Восстановленные после применения процедуры БВП значения КС интерполировались в узлы регулярной сети. Методом скользящего окна, реализованного в программном комплексе «КОСКАД», с размером окна 5\*5 шагов сети, рассчитывались статистические характеристики значений КС [2]. Статистические характеристики КС

анализировались с помощью метода безэталонной классификации (общего расстояния). На рис. 2 представлены результаты классификаций по статистическим характеристикам СЭП с  $AB/2=50\text{м}$  в окне  $5*5$  шагов сети.

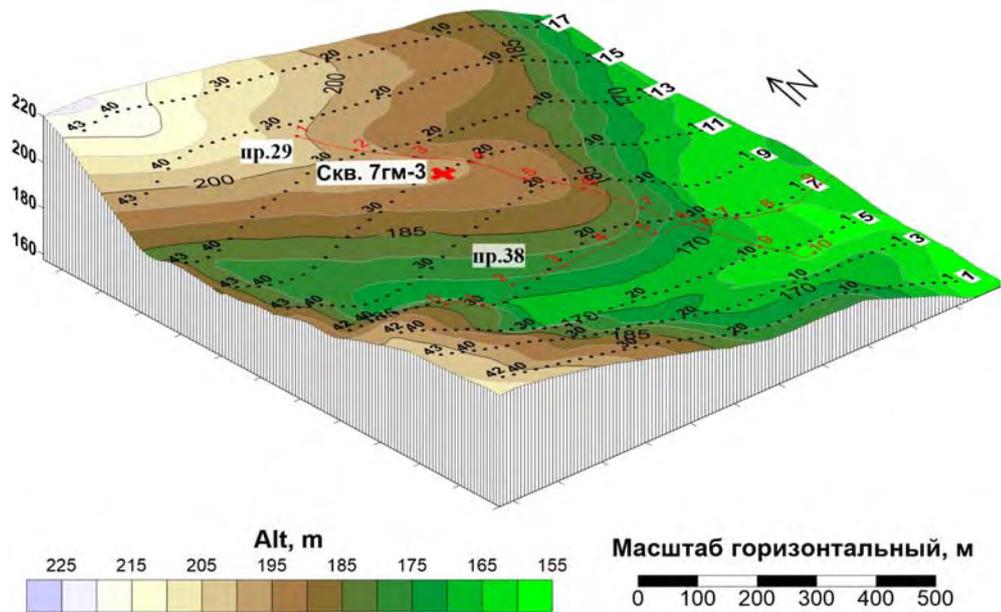


Рис. 1. Схема электроразведочных профилей

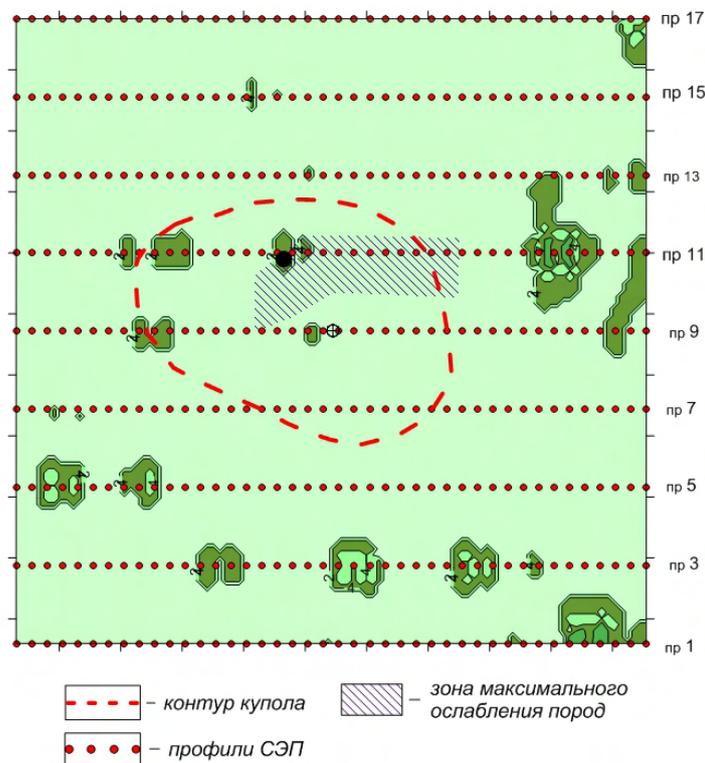


Рис. 2. Результаты классификаций СЭП  $AB/2=50$  и элементы интерпретации сейсморазведки

Анализ результатов показал, что контуры аномальных классов попадают за пределы положительной структурной формы (купол), выделенной по данным сейсмических исследований (Рис. 2). Эти классы более четко, чем средние значения поля, отражают контрастные по физическим свойствам зоны, расположенные на флангах положительной структуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгаль А.С. Использование быстрого вейвлет-преобразования при решении прямой задачи гравиразведки / А.С. Долгаль // Доклады академии наук. – 2004. – Т. 399, № 8. – С. 1177-1179.
2. Долгаль А.С. Применение кратномасштабного вейвлет-анализа при аналитических аппроксимациях геопотенциальных полей / А.С. Долгаль, А.А. Симанов // Докл. Акад. наук. – 2008. – Т. 418, № 2. – С. 256-261.
3. Петров А.В. Технология анализа геополей в скользящих окнах / Петров А.В., Солоха Е.В. // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 33-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / Ин-т геофизики УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2006. – С. 272-275.
4. Христенко Л.А. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи / Христенко Л.А., Степанов Ю.И. // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.
5. Христенко Л.А. Интерпретация геоэлектрических данных с использованием и вероятностно-статистических характеристик при решении инженерно-геологических задач / Христенко Л.А., Степанов Ю.И. // Геоинформатика / НАН Украины. – 2015. – № 4 (56). – С. 29-34.
6. Совершенствование интерпретации данных мониторинговых электроразведочных наблюдений с помощью аппарата теории оценок / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов, А.В. Кичигин, Е.И. Паршаков, А.А. Тайницкий, К.Н. Ширяев // Инженерная геофизика 2017: материалы 13-й науч.-практ. конф. и выставки. – Кисловодск, 2017. – DOI 10.3997/2214-4609.201700419. Электрон. изд. режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=88140>. Code 129037. DOI: 10.3997/2214-4609.201700419.

УДК 550.837

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.66

К.Н. ШИРЯЕВ

*Горный институт УрО РАН*

#### **ГРАФ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ**

В пределах Верхнекамского месторождения солей (ВКМС) на потенциально опасных участках шахтных полей для изучения динамики возможных изменений свойств массива пород регулярно выполняется геолого-геофизический мониторинг, который включает в себя электроразведочные исследования методом естественного поля (ЕП) и электропрофилеирования в различных модификациях (СЭП, СГ). Основной целью электроразведочных работ является выделение и оконтуривание участков инженерно-геологических осложнений и прослеживание изменений характера их поведения со временем, а также положение на профилях наблюдений.

Электроразведка позволяет: получить высокую детальность изучения геологической среды на сравнительно небольших глубинах; использовать облегченные измерительные установки, удешевляющие работы и дающие возможность проведения повторных наблюдений; повысить точность получаемой информации при комплексировании с другими геофизическими методами. Однако интерпретация данных электропрофилирования чаще всего основана на простейших приемах оценки глубин и размеров тел или на качественном анализе. Такой способ влечет за собой неоднозначность выводов о наличии и природе явлений, вызвавших изменения наблюдаемых параметров. Повысить достоверность интерпретации ЕП и СЭП можно путем расширения анализируемого признакового пространства за счет формальных признаков, например, статистических характеристик самих наблюдаемых параметров.

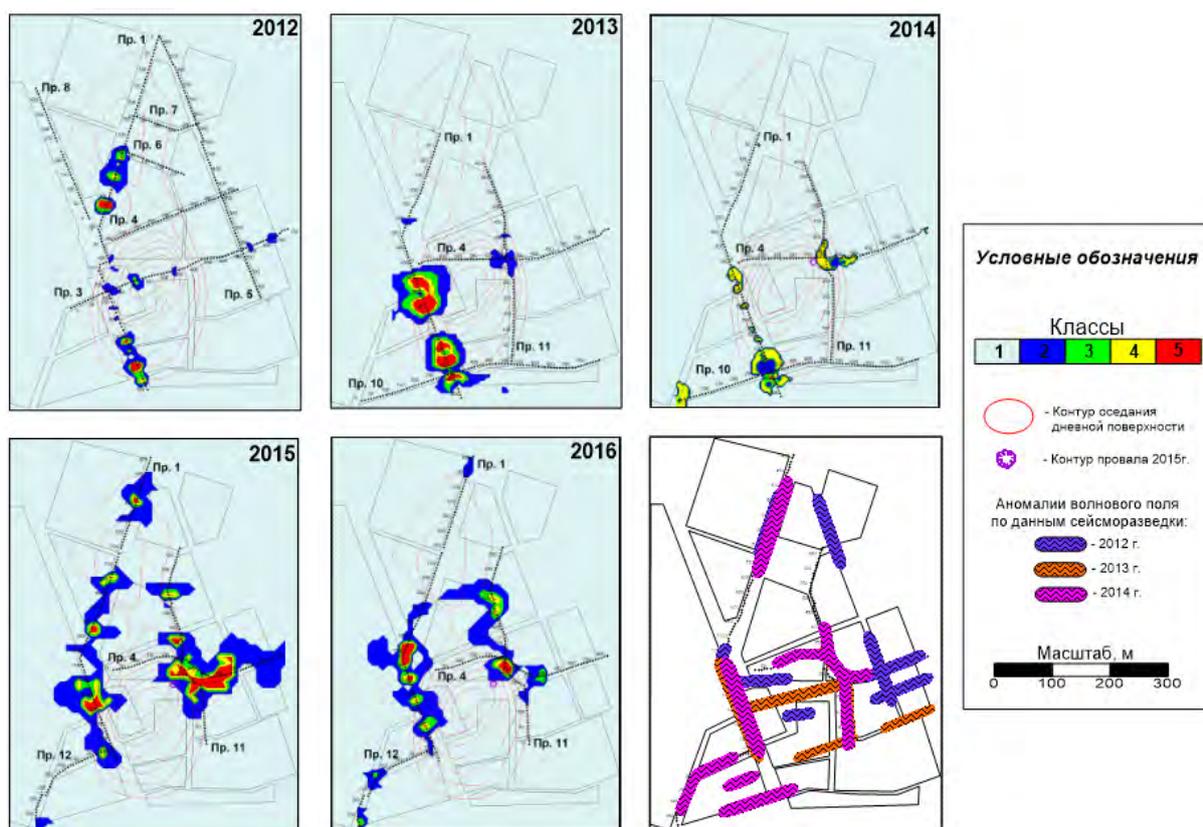


Рис. 1. Результаты безэталонной классификации данных КС и ЕП с 2012 по 2016 год и схема с аномалиями волнового поля по данным сейсморазведки

Использование процедур безэталонной классификации позволяет разбить анализируемые совокупности на однородные, по формальным математическим критериям, классы, пространственно отвечающие участкам возможных инженерно-геологических осложнений, что крайне затруднительно по результатам только качественного анализа полевых наблюдений. Различные методы расчета статистических характеристик и классификации выполнялись программным комплексом «КОСКАД 2D», в котором реализованы эти процедуры [4].

Для более отчетливого выделения скрытых закономерностей изменения амплитуды поля кажущегося сопротивления (КС) предварительно было выполнено быстрое вейвлет-преобразование (БВП) его дискретных значений с помощью программы HAAR\_2 [2]. Чтобы выполнить так называемое дискретное прямое и обратное вейвлет-преобразования с применением БВП, используют короткие импульсы–вейвлеты,

сконструированные на основе ортогональных базисных функций. Функции Хаара - простейшей пример ортогональных вейвлетов. При практическом анализе сигналов они (и их более сложные варианты) называются широкополосными и узкополосными фильтрами соответственно, потому что они отфильтровывают компоненты сигнала на больших и малых масштабах. В результате выполненных ранее исследований, в том числе с участием автора, [3, 6-8] был определен наиболее оптимальный набор процедур (уровень разложения сигнала, погрешность восстановления, способы и параметры расчета статистик; методы классификации), позволяющий получить наиболее достоверные и содержательные результаты интерпретации.

Таблица

Результаты классификации данных СЭП и ЕП методом общего расстояния

2012 год											
№ класса	СЭП, АВ/2=200м					ΔU ЕП					Кол-во точек в % от общего
	Ср, ρк	Д	А	Э	У	Ср, мВ	Д	А	Э	У	
1	30	1	-0,2	0,9	0,03	-75	6	-0,02	-1	-0,02	93,5
2	33	18	0,04	-0,3	0,1	-67	16	0,01	-0,4	-0,05	4,6
3	38	44	0,2	-0,2	0,2	-59	9	-0,07	-0,7	-0,06	0,9
4	42	64	0,2	-0,3	0,2	-58	7	-0,1	-0,5	-0,05	0,5
5	36	88	0,3	-0,4	0,3	-40	8	0,3	-0,5	-0,07	0,1
2013 год											
№ класса	СЭП, АВ/2=200м					ΔU ЕП					Кол-во точек в % от общего
	Ср, ρк	Д	А	Э	У	Ср, мВ	Д	А	Э	У	
1	18	4	0,07	-0,7	0,1	-14	28	0,01	-0,8	-0,01	82
2	31	53	0,04	-0,9	0,3	23	77	-0,05	-0,9	0,2	4,6
3	44	111	0,4	-0,8	0,3	48	114	0,07	-0,9	1,9	1,6
4	49	171	0,4	-0,8	0,3	58	123	0,03	-1	0,5	0,9
5	54	223	0,3	-1	0,3	57	172	-0,01	-1	-0,3	0,7

Автором выполнены описанные преобразования (БВП) и необходимые расчеты на потенциально опасных участках, расположенных в пределах ВКМКС. На рис.1, в качестве примера приведены результаты безэталонной классификации данных КС и ЕП за период с 2012 по 2016 год, полученные в г. Березники (Пермский край). На рисунке видно, что с течением времени наблюдается значительное увеличение контуров выделенных классов, что может свидетельствовать о расширении площади негативных процессов в верхней части разреза. Кроме того, при сопоставлении полученных данных с результатами сейсморазведки наблюдается определенное совпадение выделенных классов с осложнениями волнового поля.

При анализе статистических характеристик рассчитанных классов (табл.) наблюдается противоречивое, на первый взгляд, явление – с увеличением номера класса возрастает кажущееся сопротивление. Учитывая успешный опыт проведения классификации данных КС на другом участке [5], когда при увеличении номера класса кажущееся сопротивление уменьшалось, что соответствовало геологическим осложнениям, связанным со сложной гидрогеологической ситуацией и также было подтверждено другими геофизическими методами [1], то применительно к опасному участку на территории г.Березники можно предположить следующее: выделение и увеличение зон повышенных сопротивлений (по результатам классификации), может свидетельствовать об увеличении интенсивности трещинообразования и разрушения породного массива.

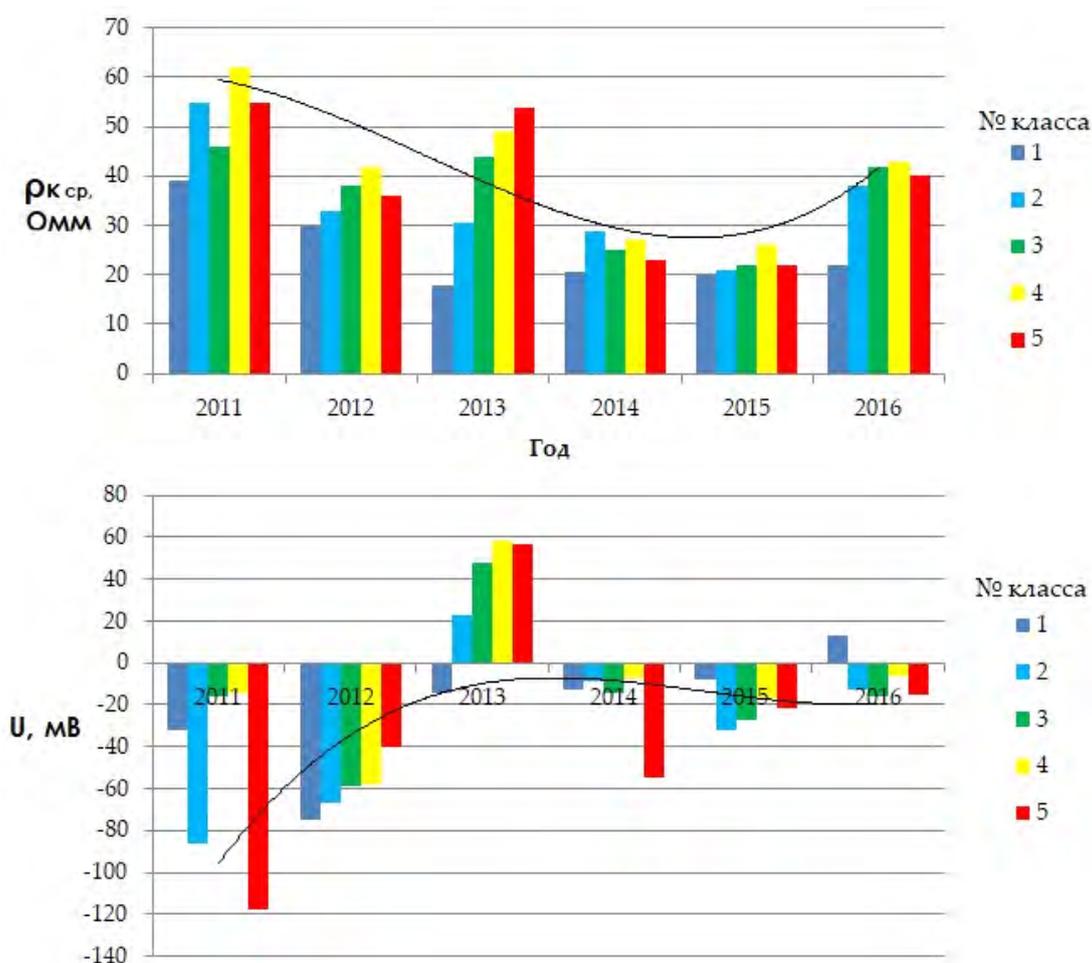


Рис. 2. Распределение средних значений КС и ЕП в выделенных классах за 2011-2016 гг.

На рис.2 приведены результаты распределения средних значений КС и потенциалов ЕП в выделенных классах за период с 2011 по 2016 год. Можно заметить, что среднее значение КС на исследуемом участке имеет тенденцию к уменьшению: с 2011 по 2015гг КС снизилось почти в 2 раза. Также за этот период произошло общее снижение интенсивности поля ЕП.

Таким образом, еще на ряде участков, расположенных в пределах ВКМКС, был опробован набор процедур и последовательность их применения при обработке и интерпретации данных электрометрических наблюдений, позволяющий более достоверно

проводить картирование границ участков инженерно-геологических осложнений. Получены характеристики классов в пределах новых шахтных полей, что существенно дополнит уже имеющиеся данные для их анализа и определения возможности использования результатов классификаций при решении задач, поставленных перед мониторинговыми исследованиями.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-45-590046.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бачурин Б.А. Современные газогеохимические технологии контроля процессов техногенеза при освоении ресурсов Верхнекамского региона / Б.А. Бачурин, А.А. Борисов // Горн. журн. – 2013. – № 6. – С. 78-82.
2. Долгаль А.С. Построение аналитических аппроксимаций геопотенциальных полей с учетом их фрактальной структуры / Долгаль А.С., Пугин А.В. // Доклады РАН. – 2006. – Т. 410, № 7. – С. 1152-1155.
3. Паршаков Е.И. Использование классификаций электрометрических параметров при решении инженерно-геологических задач / Е.И. Паршаков, К.Н. Ширяев // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию Первой Всесоюз. геофизич. конф. / ПГНИУ [и др.]. – Пермь, 2017. – С. 146-151.
4. Петров А.В. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3D» / А.В. Петров, Д.Б. Юдин, Хоу Сюели // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2010. – № 2, Вып. 16. – С. 126-132.
5. Христенко Л.А. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи / Христенко Л.А., Степанов Ю.И. // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.
6. Интерпретация мониторинговых электроразведочных наблюдений при выделении участков опасных инженерно-геологических осложнений / Христенко Л.А., Степанов Ю.И., Кичигин А.В., Паршаков Е.И., Тайницкий А.А., Ширяев К.Н. // Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых: тез. 13-го Междунар. геофизич. науч.-практ. семинара / СПб. Горн. Ун-т. – СПб., 2016. – С. 148-152.
7. Совершенствование интерпретации данных мониторинговых электроразведочных наблюдений с помощью аппарата теории оценок / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов, А.В. Кичигин, Е.И. Паршаков, А.А. Тайницкий, К.Н. Ширяев // Инженерная геофизика 2017: материалы 13-й науч.-практ. конф. и выставки. – Кисловодск, 2017. – DOI 10.3997/2214-4609.201700419. Электрон. изд. режим доступа: <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=88140>. Code 129037. DOI: 10.3997/2214-4609.201700419
8. Ширяев К.Н. Применение дискретного вейвлет-преобразования при интерпретации результатов электропрофилеирования // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 255-258.

# РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.4

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.67

Б.П. КАЗАКОВ

*Горный институт УрО РАН*

## НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ В СИСТЕМАХ ПОДГОТОВКИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

Нормализация термодинамических параметров рудничной атмосферы является неременным условием обеспечения безопасных и комфортных условий ведения горных работ. Холодный зимний воздух при поступлении в рудник должен подогреваться с целью недопущения обледенения и температурных деформаций крепи воздухоподающих стволов [1]. Подземный воздух, нагретый естественными и техногенными источниками тепла, напротив, должен охлаждаться до нормативных значений температур [2]. Контролю подлежит также содержание влаги в воздухе, т.к. обильная конденсация приводит к образованию луж на почве выработок и порче горного оборудования [3]. В соответствии с требованиями правил безопасности [4] подогрев поступающего в рудник воздуха производится при помощи теплообменных аппаратов по различным технологическим схемам. Основными элементами таких схем являются: средства перемещения воздуха, греющий энергоноситель, средства регулирования теплопроизводительности и теплообменные аппараты. Атмосферный воздух поступает в ствол либо под действием специальных нагнетательных вентиляторов, либо за счёт депрессии вентилятора главного проветривания рудника, соответственно существуют «вентиляторная» и «безвентиляторная» технологии нагрева воздуха [5].

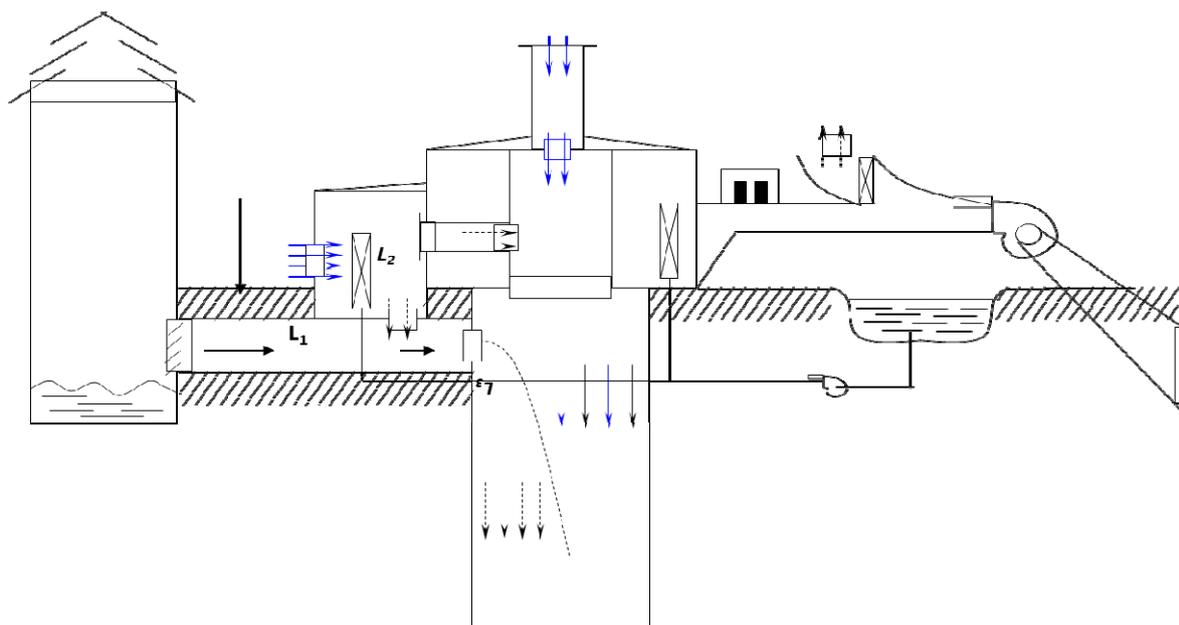


Рис. 1. Ресурсосберегающая система подготовки атмосферного воздуха в сооружениях поверхностного комплекса

На рис. 1 схематично изображена ресурсосберегающая система подготовки атмосферного воздуха в сооружениях поверхностного комплекса, основной частью которой является калориферная установка, обеспечивающая нагревание воздуха зимой, а также, при необходимости, его охлаждение и осушение летом. Как правило, калориферная установка имеет модульную структуру. Один теплообменный модуль представляет собой группу трубчатых змеевиков, по которым пропускается горячая или холодная жидкость. Геометрические размеры и конструкция модулей могут быть различными: количество ходов, количество рядов по воздуху, материал, длина и диаметр трубок, оребрение, подключение по воде, гидравлическое и аэродинамическое сопротивление и т.д. Чем больше площадь поверхности теплообмена, тем интенсивнее он протекает, а площадь тем больше, чем большее количество модулей находится на пути движения воздуха. Под землёй, ввиду ограниченности пространства выработок, модули размещают последовательно по воздуху, что приводит к неизбежному увеличению аэродинамического сопротивления. На поверхности места больше, поэтому проблема эта решается размещением модулей в один ряд по воздуху, в результате чего калориферная установка имеет значительную высоту. В процессе эксплуатации безвентиляторных калориферных установок таких размеров было замечено, что калориферы нижнего ряда выходят из строя и замерзают чаще, чем расположенные выше. Как оказалось, скорость движения воздуха по высоте неравномерна, внизу – больше, вверху – меньше и даже может быть отрицательна (рис. 2), а причиной возникновения этого эффекта является конвекция. С одной стороны ряда теплообменников воздух холодный и тяжёлый, с другой – тёплый и лёгкий. Образуется конвективный вихрь, накладывающийся на сквозное течение, как результата, возникает вертикальная стратификация горизонтальной скорости движения воздуха. В двухрядной системе калориферов расход воздуха через верхний ряд оказывается меньше в 2 раза, чем через нижний ряд.

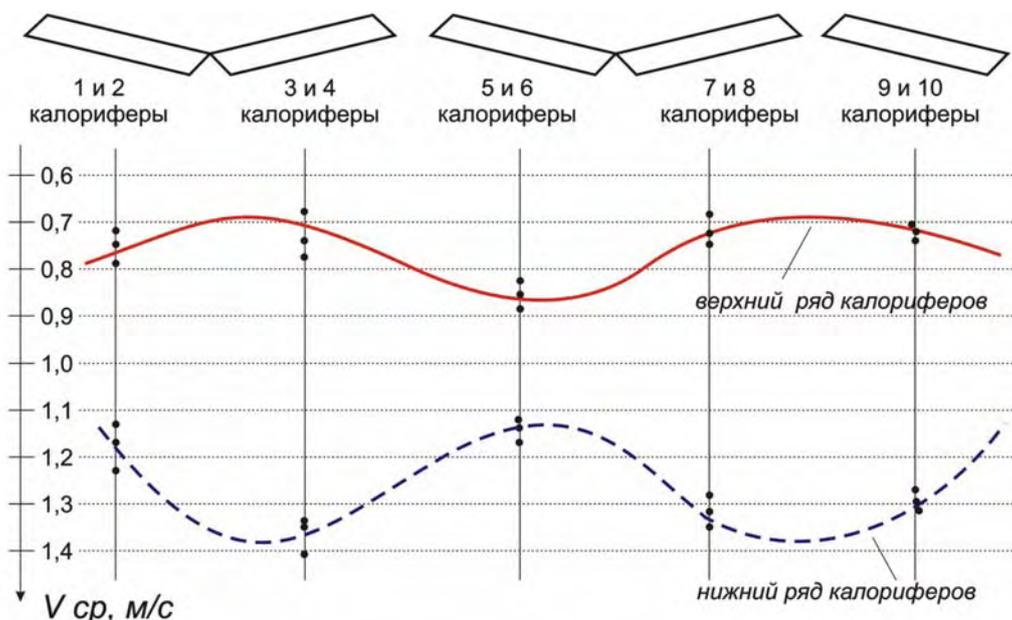


Рис. 2. Распределение скоростей воздуха между теплообменниками калориферной установки ствола № 2 РУ-4 ПО «Беларуськалий»

Таким образом, существует ограничение по высоте калориферной установки, при котором воздух перестаёт проходить через верхние модули, добавление которых

оказывается бесполезным. Моделирование эффективности добавления третьего ряда теплообменников по высоте при заданных условиях показало, что в верхней части третьего ряда происходит опрокидывание воздушного потока, что свидетельствует о нецелесообразности дальнейшего увеличения высоты калориферной установки.

В подземных горных выработках ввиду их небольшого поперечного размера конвективное расслоение воздушных потоков наблюдается лишь при очень больших перепадах температур, например, при экзогенных рудничных пожарах. В установках кондиционирования воздуха этот эффект не значителен, и может не учитываться при проведении модернизации теплообменных аппаратов с целью нахождения оптимальных проектных решений. Однако, ввиду того, что речь идёт теперь об охлаждении воздуха, возникает другой не менее сложный процесс, связанный с выпадением избыточной влаги. При «мокроем» теплообмене в отличие от «сухого» в процессе конденсации пара из воздуха выделяется тепло, которое приводит к дополнительному нагреву охлаждающей жидкости. По достижении критической температуры в результате выпадения влаги поток тепла от воздуха к жидкости увеличивается приблизительно в 3 раза [6].

Имеет значение размещение модулей относительно друг друга (последовательно или параллельно по воздуху), а также ориентация их по отношению к направлению движения воздуха (рис.3). В зависимости от конкретных условий оптимальные решения могут быть различны, причём, к критериям оптимизации относится не только достижение максимальной интенсивности теплообмена, но и минимальные затраты ресурсов и энергии при этом, а, значит, минимизация гидравлического и аэродинамического сопротивлений системы. Как следует из расчётов, наилучший теплообмен с заданными расходами воздуха и жидкости обеспечивает конфигурация расположения и подключения теплообменных модулей с максимальными значениями аэродинамического и гидравлического сопротивлений. А это, в свою очередь, соответствует максимальным затратам энергии на продув воздуха и прогон воды. Поэтому подбор оптимальной конфигурации и компоновки модулей является не тривиальной задачей. Расчётным путём установлено, что разные направления подачи воды и воздуха обеспечивают наиболее интенсивный теплообмен как в пределах одного теплообменного модуля, так и для их размещения последовательно по воздуху [7]. Это касается традиционного поперечного расположения теплообменных трубок относительно движения воздушного потока. Поэтому одним из возможных способов интенсификации теплообмена является разворот модулей вдоль потока с одновременным подключением теплообменных трубок параллельно по воде.

Отдельным направлением совершенствования теплообменных аппаратов, дорогостоящим, но эффективным является замена воды жидкостями с низкой температурой замерзания и высокой температурой кипения. Это позволяет создавать большие температурные напоры между жидкостью и воздухом и усиливать теплообмен, не опасаясь замерзания жидкости в системах нагрева воздуха и кипения в системах охлаждения. К высокостабильным синтетическим теплоносителем, широко используемым в технических системах, относится терминол. Он, практически, не замерзает и не кипит, находясь в жидком состоянии в широком диапазоне температур, правда, уступает воде в вязкости и теплоёмкости.

Увеличивает интенсивность теплообменных процессов использование дополнительных источников тяги для преодоления аэродинамического сопротивления одного или нескольких последовательно расположенных теплообменных модулей. Это приводит к дополнительному нагреву воздуха в результате его адиабатического сжатия, причём, дальнейшего его разогрева в результате трения не происходит, т.к. работа сил трения целиком идёт на изоэнтальпийное расширение воздуха. Процесс при этом протекает изотермически.

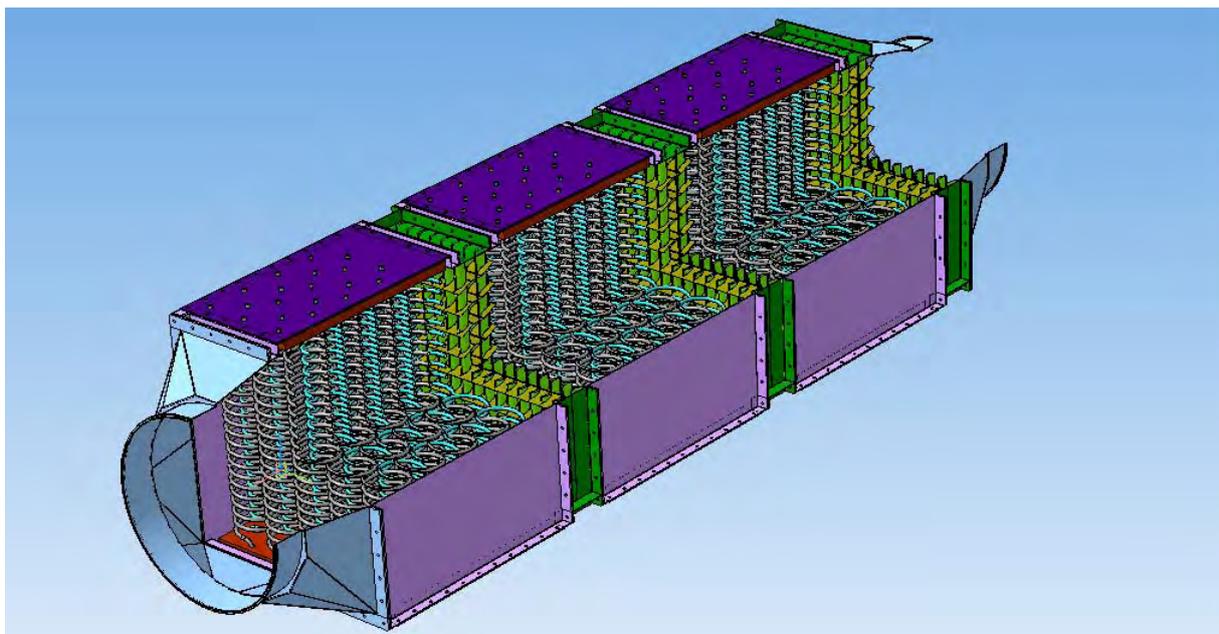


Рис. 3. Последовательная по воздуху компоновка теплообменных модулей

По результатам проведённых исследований способов совершенствования теплообменных аппаратов можно сделать следующие выводы:

- проектирование калориферных установок в системах подготовки рудничного воздуха следует производить с учётом конвективной стратификации скорости движения воздуха по высоте, уменьшающей надёжность и производительность функционирования системы;
- при охлаждении влажного воздуха в системах кондиционирования  $2/3$  холода жидкости идёт на конденсацию пара, и только  $1/3$  – на понижение температуры воздуха;
- наилучший теплообмен с заданными расходами воздуха и жидкости обеспечивает конфигурация расположения и подключения теплообменных модулей с максимальными значениями аэродинамического и гидравлического сопротивлений;
- противоположная подача жидкости по отношению к движению воздуха увеличивает суммарную тепловую мощность системы, причём при параллельном подключении теплообменных спиралей эффект усиливается их разворотом вдоль потока воздуха;
- замена воды синтетическим теплоносителем даёт возможность организовать функционирование теплообменных систем в области низких и высоких температур, что исключает риски замерзания и закипания жидкости, а также позволяет уменьшить объём системы за счёт увеличения температурного напора;
- использование источника тяги для проталкивания воздуха через теплообменник увеличивает его расход, при этом воздух получает дополнительное количество тепла, равное потребляемой вентилятором электроэнергии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-45-590973 «Разработка методов прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания горнодобывающих предприятий».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Б.П. Теплообмен вентиляционного воздуха с крепью воздухоподающего ствола и породным массивом / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, Е.Л. Гришин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 92-98.
2. Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Записки Горного института. – 2017. – Т. 223. – С. 116-124.
3. Казаков Б.П. Исследование процессов миграции конденсационных рассолов в выработках калийных рудников / Казаков Б.П., Шалимов А.В., Зайцев А.В. // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2016. – № 11. – С. 216-225.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Вып. 78: утв. 11.12.2013, № 32935. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 276 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).
5. Богопольский Б.Х. Современные насосные и калориферные установки, применяемые на шахтах СССР: (Лекция). – М., 1969. – 55 с.
6. Казаков Б.П. Влияние процессов испарения и конденсации влаги на тепловой режим глубоких рудников / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, А.В. Зайцев // Горн. журн. – 2016. – № 3. – С. 73-76.
7. Казаков Б.П. Оптимизация компоновки теплообменника модулей в системах кондиционирования рудничного воздуха / Казаков Б.П., Шалимов А.В., Зайцев А.В. // Изв. вузов. Горн. журн. – 2015. – № 7. – С. 116-126.

УДК 622.4

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.68

А.Г. ИСАЕВИЧ

*Горный институт УрО РАН*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЫЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ  
НА РУДНИКАХ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»,  
ОПЫТ СНИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ  
АТМОСФЕРЫ РАБОЧИХ МЕСТ**

Технологический процесс добычи калийной руды сопровождается выделением целого ряда «вредностей» (шум, вибрации, повышенная температура и т.д.). Однако наиболее серьезное негативное влияние на организм человека оказывает соляная пыль, образующаяся в процессе добычи и транспортировки руды.

Сложность борьбы с пылью на калийных рудниках традиционно заключается в невозможности в полной мере использовать такие эффективные и распространенные методы борьбы с пылью как орошение и вентиляционные методы. В случае с орошением сдерживающим фактором является растворимость калийных солей и создание агрессивной среды, в которой оборудование быстро выходит из строя. Вентиляционные методы не дают полного эффекта из-за больших концентрация соляной пыли, образующейся при технологических процессах. Тем не менее при любых вопросах, касающихся борьбы с пылью в первую очередь необходимо рассматривать свойства самой пыли.

Основные физико-химические свойства калийной пыли широко изучены и представлены в работах [1,2].

На предприятии ОАО «Беларуськалий» проведено масштабное исследование пылевой обстановки, в местах наиболее интенсивного пылевыведения. В частности, оценивалось содержание пыли в атмосфере рабочих зон: при добыче руды в селективной лаве, в тупиковой камере (при работе комбайна с барабанным исполнительным органом), в месте разгрузки скипов в приемный бункер.

Пылевая обстановка, при работе селективной лавы осложняется тем, что процесс добычи руды сопровождается процессом механической закладки глинисто-галитового слоя в выработанное пространство при этом выделяется значительное количество пыли. Особенностью технологического процесса является то, что установки механической закладки в процессе своей работы забрасывают закладочный материал на значительное расстояние (10-15 м) при этом поток глинисто-солевой породы увлекает за собой большое количество воздуха – возникает эжекционный эффект [4]. Таким образом, работающие установки механической закладки являются своеобразными источниками тяги и создают воздушные рециркуляционные контуры запыленного воздуха в пределах рабочего пространства лавы, что еще больше усугубляет пылевую обстановку.

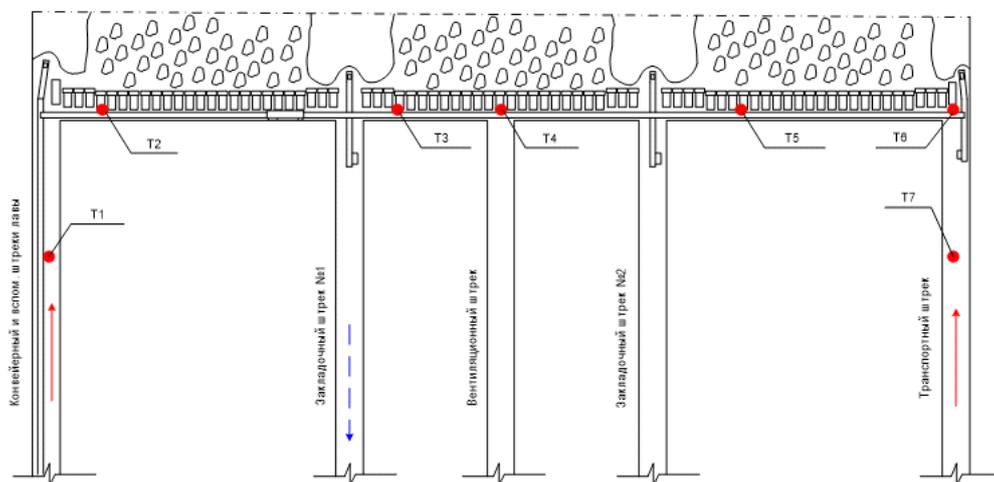


Рис. 4. Схема расположения точек замеров в лаве

В результате концентрация пыли при выемке глинисто-галитового слоя достигает  $2250 \text{ мг/м}^3$ . Подробные результаты замеров концентрации пыли представлены в таблице 1. Точки замеров на рисунке 4.

Таблица 1

Результаты замеров концентрации пыли

Точки проведения замеров	Выемка глинисто-галитового слоя		ПДК, $\text{мг/м}^3$
	Среднее значение запыленности, $\text{мг/м}^3$	Максимальное значение запыленности, $\text{мг/м}^3$	
№ 1	28,7	38,9	5
№ 2	163,3	173,5	5
№ 3	1816,5	2075,8	5
№ 4	338,4	388,9	5
№ 5	2106,6	2258,9	5
№ 6	373,7	399,0	5

Анализ сложившейся ситуации показал, что для снижения концентрации пыли в селективной лаве, при выемке глинисто-галитового слоя возможно использовать элементы систем гидрообеспыливания на установках механической закладки.

При использовании данной схемы увлажняется закладочный материал, который после увлажнения остается в выработанном пространстве и не контактирует с оборудованием.

Система оснащена блоком управления, который при включении закладочной установки включает подачу воды. В результате факел мелкодиспергированной воды направляется вдоль движения выбрасываемой метателем породы. Это позволяет сократить количество воздуха, эжектируемого метателем и одновременно увлажнить поверхность выбрасываемой породы. При этом происходит увеличение относительной влажности воздуха и отсутствует опасность налипания глины на закладочную установку и конвейер. Эффективный расход воды составил 7 л/мин.

Испытание данной системы показало, что гидрообеспыливание позволяет существенно снизить значения концентрации пыли в атмосфере рабочей зоны лавы. Однако достичь ПДК пыли не удалось.

Сравнение полученных результатов показывает, что средняя концентрация пылевого аэрозоля в лаве при выключенной системе обеспыливания составляет 804,5 мг/м<sup>3</sup>, при включенной системе 428,1 мг/м<sup>3</sup>. Таким образом, зафиксировано общее снижение концентрации пылевого аэрозоля в лаве на 46,8 %.

Еще одним объектом интенсивного пылевыделения является комплекс разгрузки скипов. Скиповой подъем представляет собой совокупность загрузочных устройств и механизмов, расположенных на горизонте рудника и служащих для загрузки скипов, а также разгрузочных устройств скипов и подъемных машин, расположенных в башенных копрах. На дневной поверхности объекты скипового подъема входят в подсистему поверхностного комплекса, а именно в подсистему башенных копров. Между отметками +30 м и +42,6 м расположены приемные бункеры.

При разгрузке скипа происходит срыв пыли с разгружаемой руды потоками воздуха и поступление из бункера пылевого облака, образующегося в результате избыточного давления в бункере, создаваемого разгружающейся рудой [3]. В результате концентрация пыли на отметке разгрузки скипов может превышать предельно допустимую концентрацию в десятки раз. Основной опасностью данного факта является возможность попадания пыли в электрооборудование, размещенное в башенном копре. В таблице 3 приведены значения концентрации пылевого аэрозоля на отметках 0 м и +42 м, скиповых стволов рудника 4 РУ.

Следует отметить, что в настоящее время на руднике 4 РУ проведен целый комплекс мероприятий, позволивший нормализовать ситуацию. Во-первых, с целью снижения внешних утечек воздуха вентиляторы главного проветривания ствола № 3 размещены под землей на горизонте -440 м. Помимо снижения внешних утечек воздуха удалось создать избыточное давление в башенном копре, что в свою очередь обеспечило частичное «запирание» пылевого облака в бункере при разгрузке скипа. Подтверждением этого служат результаты замеров, приведенные на рисунке 10.

Таблица 3

Значения концентрации пылевого аэрозоля на отметках 0 м и +42 м, скиповых стволов рудника 4 РУ

Примечание	Наименование места отбора	Температура, °С	Влажность, %	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Результаты измерения запыленности, мг/м <sup>3</sup>	
					Среднее значение	Среднее значение между стволами
Отметка + 42 м,						
Скип разгружался	Ствол № 4, отм. + 42 м,	11,7	55	5	126,9	107,7
	Ствол № 3, отм. + 42 м,	12,1	50	5	88,5	
Отметка 0 м						
Скип разгружался	Ствол № 4, отм. 0 м	15,2	54	5	175,2	127,8
	Ствол № 3, отм. 0 м	9,9	60	5	80,4	

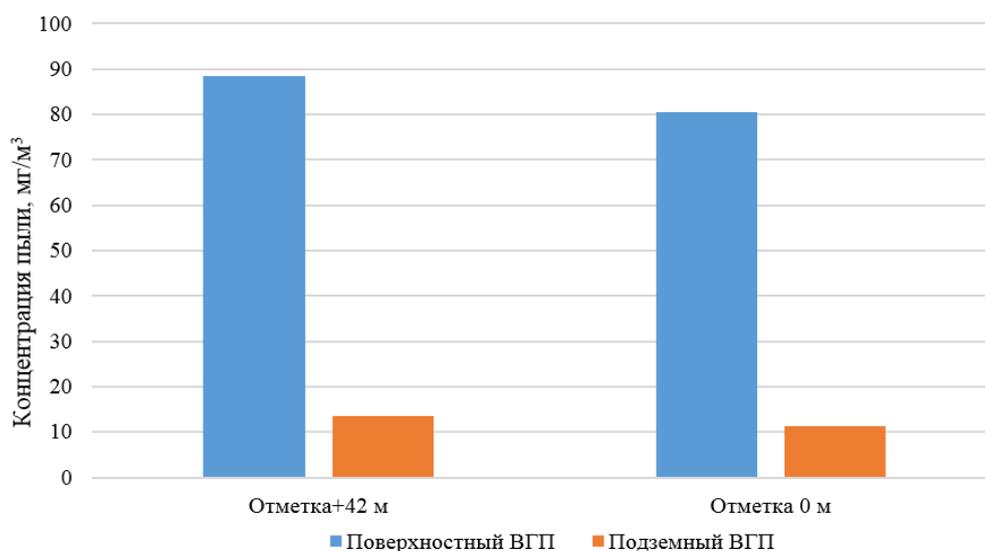


Рис. 10. Сравнение концентрации взвешенного аэрозоля на различных отметках башенного копра при проветривании рудника поверхностным ВГП и подземными ВГП

Во-вторых, на отметке + 42 м размещены пылеуловители фирмы CFT GmbH Compact Filter Technic, (Gladbeck, Германия), позволившие снизить концентрацию пыли практически до допустимых значений.

На рисунке 11 представлено сравнение концентрации пылевого аэрозоля на различных отметках башенного копра при работающих и отключенных пылеуловителях.

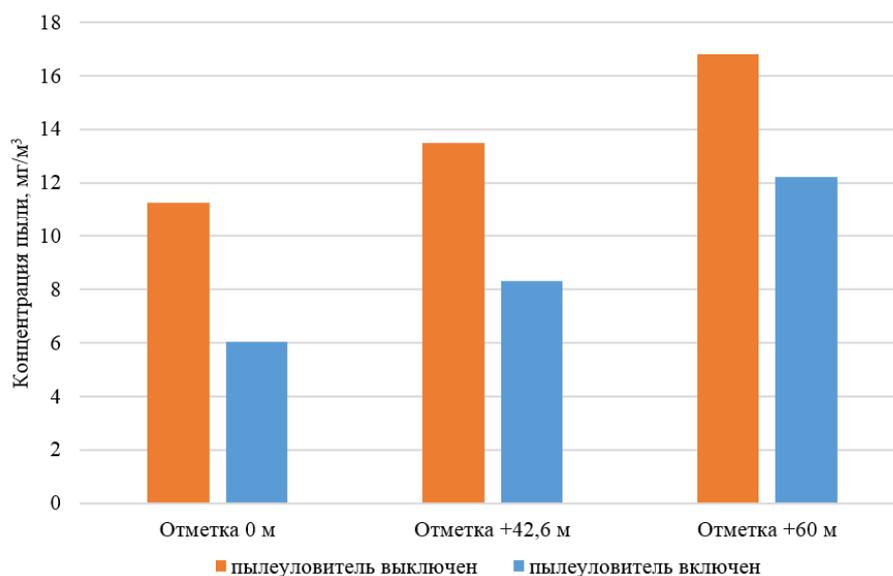


Рис. 11. Сравнение концентрации взвешенного аэрозоля на различных отметках башенного копра при работающих и отключенных пылеуловителях (режим с отключенным поверхностным ВГП)

Как видно из диаграммы, работа пылеуловителей позволяет снизить концентрацию пыли в воздухе на 25÷45 %. Общая концентрация пыли возрастает с увеличением высотной отметки, что связано с направлением движения воздуха, при этом количественно концентрация пыли значительно меньше, чем при других производственных процессах.

Обобщая вышеизложенное можно сделать вывод, что пылевая обстановка на калийных рудниках остается сложной. На сегодняшний день не существует универсальных способов добиться снижения концентрации соляной пыли до значения ПДК в 5 мг/м<sup>3</sup>. Однако, это не является поводом игнорировать данный вопрос, сегодня используя индивидуальный подход возможно добиться существенного снижения концентрации пыли до значений, позволяющих эффективно использовать средства индивидуальной защиты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведев И.И. Аэрология калийных рудников / И.И. Медведев, А.Е. Красноштейн; УрО АН СССР. – Свердловск, 1990. – 251 с.: ил.
2. Бухаров И.И. Исследование запыленности и разработка основных мероприятий по борьбе с пылью на Верхнекамских калийных рудниках: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 1966. –
3. Обоснование скорости движения воздуха в вентиляционных каналах / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин, А.С. Кирыков // Горн. журн. – 2016. – № 3. – С. 68-72.
4. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов / Л.Ю. Левин, А.Г. Исаевич, М.А. Семин, Р.Р. Газизуллин // Горн. журн. – 2015. – № 1. – С. 72-75.

Е.Л. ГРИШИН, Н.А. ТРУШКОВА  
*Горный институт УрО РАН*  
**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ  
ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ  
ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Современные условия добычи полезных ископаемых характеризуются усложнением горно-геологических и горнотехнических условий, что является фактором снижения уровня рентабельности горнодобывающих предприятий, а также приводит к увеличению сложности процесса обеспечения промышленной безопасности.

Анализ аварийных случаев и случаев производственного травматизма показывает преобладающую роль человеческого фактора среди причин возникновения данных ситуаций. Однако более детальное рассмотрение причин позволяет сделать вывод, что ошибки, совершаемые персоналом, происходят в условиях дефицита информации.

Наиболее эффективным средством борьбы с травматизмом и аварийными ситуациями в описываемых условиях является автоматизация производственных процессов, одним из важнейших среди которых в горном деле является вентиляция. Наличие средств автоматизации позволяет с одной стороны, возложить часть функции управления процессами на систему управления, а с другой стороны – увеличить объем поступающей информации об объектах и процессах в реальном времени.

Важным процессом в развитии направления автоматизации является постепенный пересмотр требований промышленной безопасности: снижение величины технического запаса, являвшегося основным инструментом систем безопасности прошлого, в пользу внедрения средств автоматического мониторинга и управления технологическими процессами.

Отделом аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН разработаны теоретические основы системы интеллектуального мониторинга параметров рудничной атмосферы [1, 2, 3, 4]. Разработанные принципы вошли в основу системы аэрогазодинамической безопасности, испытания которой произведены на руднике 4 РУ ОАО «Беларуськалий».

На рисунке 1 представлена принципиальная схема размещения измерительного оборудования системы аэрогазодинамической безопасности в рамках столба лавы рудника. Для испытаний системы выбран участок рудничного поля, на котором проявляют себя следующие вредные факторы рудничной атмосферы:

- повышенные температуры воздуха вследствие значительной глубины залегания промышленных пластов и концентрации горного оборудования, являющегося мощным источником тепловыделения;
- горючие газы, образующиеся в результате разрушения массива при ведении горных работ, а также в результате оседания пород кровли в выработанном пространстве лавы.

Датчики скорости и температуры воздуха, расположенные в районе выработок главного направления, позволяют контролировать количество и температуру поступающего воздуха на участок, а также расход исходящей струи. Указанные датчики объединены в автоматизированную замерную станцию (АЗС) №1.

Непосредственно в рабочей зоне лавы располагается АЗС №2, включающая датчики скорости воздуха, температуры и концентрации горючих газов.

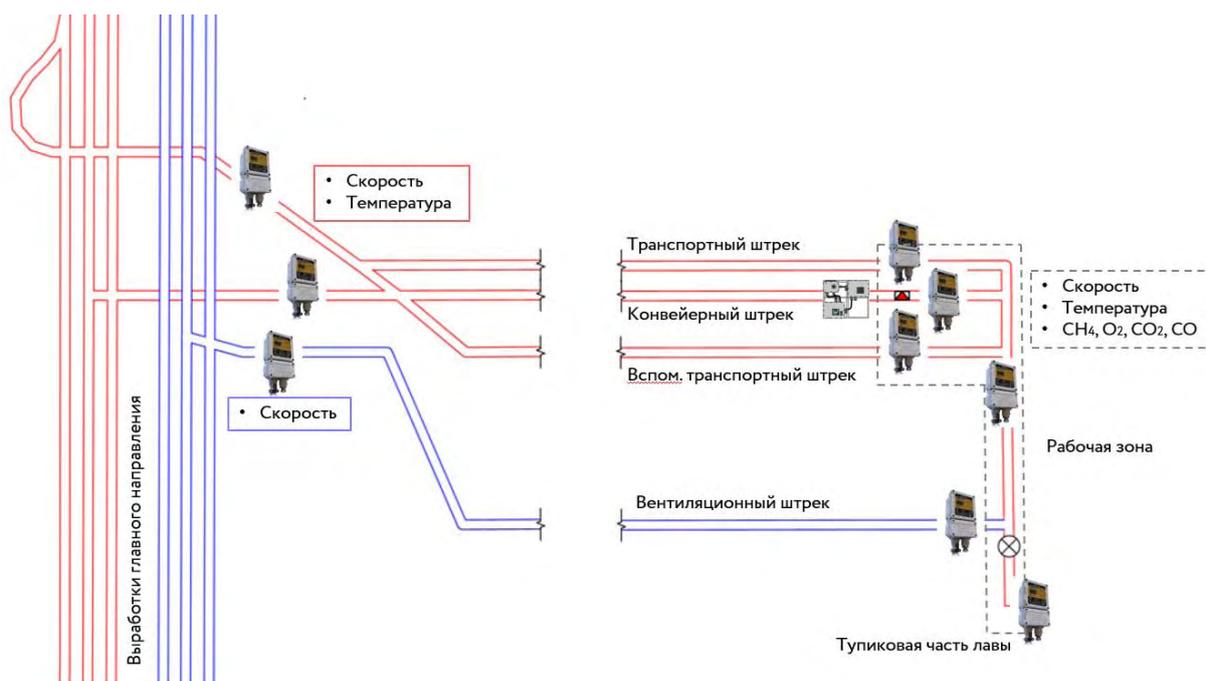


Рис. 1. Принципиальная схема системы аэрогазодинамической безопасности в условиях рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий»

Расчетным ядром системы аэрогазодинамической безопасности является аналитический комплекс «АэроСеть» [5]. Данные, получаемые с АЗС, в реальном времени вносятся в качестве исходных величин в математическую модель вентиляционной сети участка. Это позволяет в реальном времени рассчитывать качественные, количественные и микроклиматические показатели рудничной атмосферы в пределах участка. В частности, такой функционал позволяет отследить возникающие утечки воздуха, спрогнозировать выход показателей за пределы допустимых правилами безопасности пределов.

Аналитический комплекс «АэроСеть» используется не только как расчетный модуль системы, но и в качестве автоматизированного рабочего места диспетчера [6].

Показания датчиков в реальном времени отображаются на аксонометрической схеме (или погоризонтном плане по выбору пользователя) одновременно с рассчитанными параметрами атмосферы. Доступно отображение полей расхода, температуры воздуха или концентрации горючих газов. Предусмотрен функционал сигнализации диспетчеру о выходе контролируемых параметров из допустимого диапазона значений.

Дополнительные возможности симбиоза системы мониторинга и математической реализуются в возможности анализа и расчетов вентиляционных режимов в нештатных ситуациях проветривания, что может быть использовано, к примеру, при разработке оперативных планов ликвидации аварийных ситуаций [7, 8, 9].

Показания датчиков расхода воздуха используются для расчета распределения воздуха по всем выработкам панели, не оборудованным средствами измерения (рисунок 2).

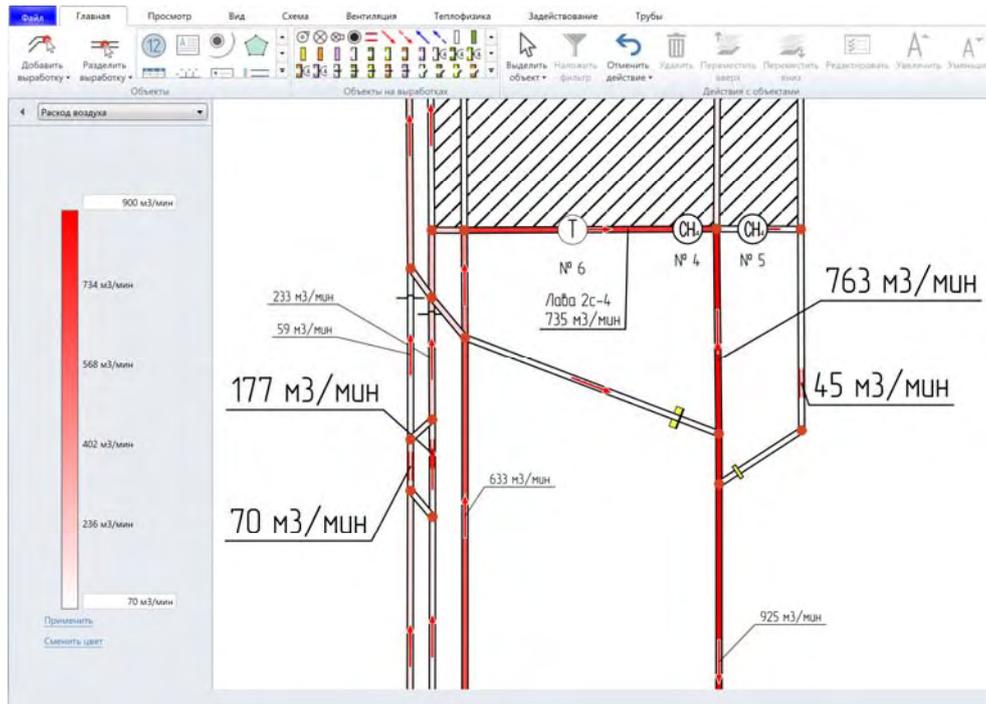


Рис. 2. Результат автоматического распределения расходов воздуха по данным датчиков скорости АЗС №1 и №2

Показания датчиков температуры/концентрации в совокупности с данными о скорости воздуха (полученной как с датчиков, так и в результате распределения расходов воздуха) могут быть использованы для интерполяции значения температур/концентрации по всем остальным выработкам, по которым оперативных данных нет (рисунок 3).

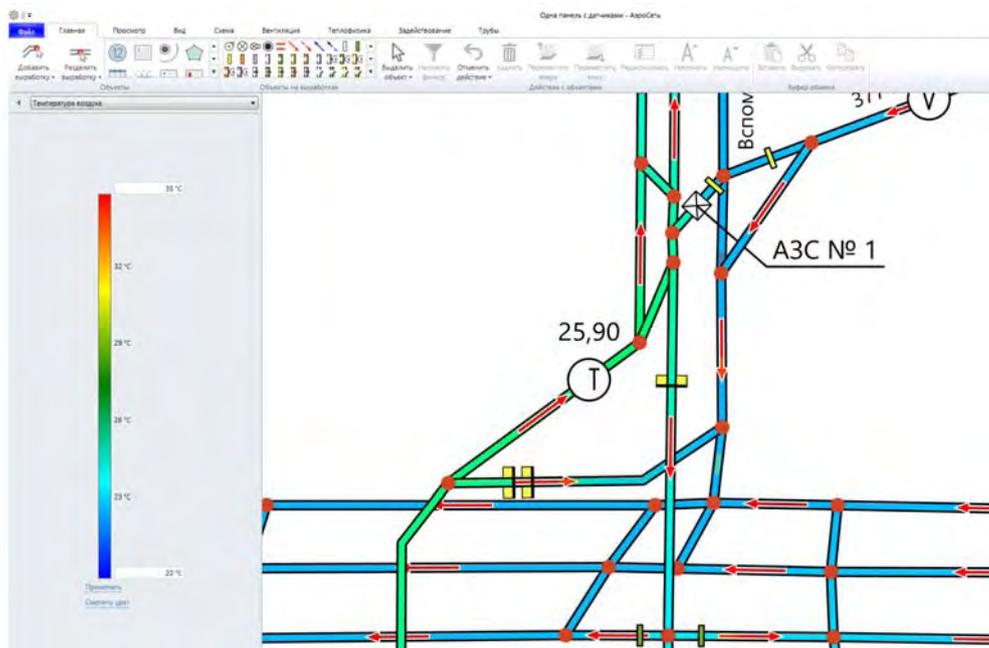


Рис. 3. Результат автоматического распределения температур воздуха по данным датчиков температуры АЗС №1 и №2 на основании распределенных ранее расходов воздуха

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казаков Б.П. Теория и практика прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов. – М.: Недра, 2016. – 244 с.: ил.
2. Левин Л. Аэрологическая безопасность горных предприятий / Левин Лев, Кормщиков Денис // Инженерная защита. – 2016. – № 1 (12). – С. 48-53.
3. Левин Л.Ю. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.В. Зайцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 154-161.
4. Казаков Б.П. Современные подходы к разработке способов управления тепловым режимом рудников при высокой температуре породного массива / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // Горн. журн. – 2014. – № 5. – С. 22-25.
5. Единая информационно-аналитическая система «Аэросеть» для проектирования и расчета вентиляции калийных рудников / И.В. Протасеня, С.П. Береснев, Ю.В. Круглов, Е.Л. Гришин, А.С. Киряков // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.69-72.
6. Гришин Е.Л. Автоматизированное рабочее место специалиста рудничной вентиляции / Е.Л. Гришин, Д.С. Кормщиков, А.В. Кашников // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромышленного оборудования: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. «Горная электромеханика – 2014» / ПНИПУ [и др.]. – Пермь, 2014. – С. 143-149.
7. Гришин Е.Л. Использование результатов теплогазодинамического расчета при анализе аварийных ситуаций и разработке плана ликвидации аварий в аналитическом комплексе «Аэросеть» / Е.Л. Гришин, Д.С. Кормщиков, Л.Ю. Левин // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – № 9. – С. 185-189.
8. Гришин Е.Л. Моделирование аэротермодинамических процессов в программном модуле «План ликвидации аварий» / Е.Л. Гришин, А.С. Киряков, Д.С. Кормщиков // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2012. – № 5. – С. 312-315.
9. Казаков Б.П. Разработка моделей аэрологических и теплофизических процессов, протекающих в аварийных режимах проветривания горнодобывающих предприятий / Б.П. Казаков, А.В. Шалимов, Е.Л. Гришин // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2015. – № 12. – С. 157-163.

УДК 622.4

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.70

А.В. ЗАЙЦЕВ

*Горный институт УрО РАН*

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ НОРМАЛИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ГЛУБОКИХ РУДНИКОВ**

На современном этапе развития многие горные предприятия для решения задач поддержания и увеличения мощности добычи сталкиваются с необходимостью вовлечения в отработку новых, глубокозалегающих и труднодоступных залежей. При этом при увеличении глубины ведения горных работ возрастает температура окружающего породного массива и снижается количество вскрываемых горных выработок, что приводит к невозможности подачи больших объемов воздуха и усилению влияния техногенных источников тепловыделения на формирование неблагоприятных микроклиматических условий в гор-

ных выработках. В результате температура воздуха в горных выработках повышается до сверхнормативных величин — согласно действующим Федеральным нормам и правилам «Правила безопасности при ведении горных работ ...», температура воздуха не должна превышать +26 °С [1]. Решение задачи нормализации микроклиматических условий в сети горных выработок глубоких рудников требует разработки комплексных технических систем, отличающихся оптимальными капитальными и эксплуатационными затратами с учетом индивидуальных особенностей шахты или рудника.

Первоочередной задачей разработки ресурсосберегающих систем является обоснование адекватной системы нормирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников, исключающей избыточные запасы параметров. В работе [2] на основе обширного обзора параметров нормирования микроклимата в нашей стране и за рубежом и анализа функциональных зависимостей обоснован комплексный критерий нормирования микроклиматических условий, учитывающий температуру, относительную влажность и скорость движения воздушной среды

$$T_{ef} = t_d + 0,00653 \cdot \varphi \cdot (t_d - 9,06) - 0,7 \cdot v - 4$$

На следующем этапе решается задача выбора, комплексирования и определения параметров применения отдельных способов регулирования теплового режима решается на основе метода вариантов, с использованием численного моделирования сопряженных процессов тепло- и воздухораспределения в сети горных выработок с учетом термодинамических факторов, влияющих на микроклиматические условия рудничной атмосферы [3]. Технологическими компонентами комплексных систем нормализации микроклиматических условий являются горнотехнические способы и ресурсосберегающие технологические схемы кондиционирования, эффективность которых зависит от глубины, а в конечном итоге от температуры горных пород, и типа горных выработок [4,5]. Определение областей эффективности различных мероприятий в координатных осях «температура массива горных пород — удаленность рабочих зон по тракту движения воздуха» так, как это представлено на рисунке 1, осуществляется на основе многовариантного численного моделирования на тепловой модели рудника с учетом его индивидуальных особенностей [6].

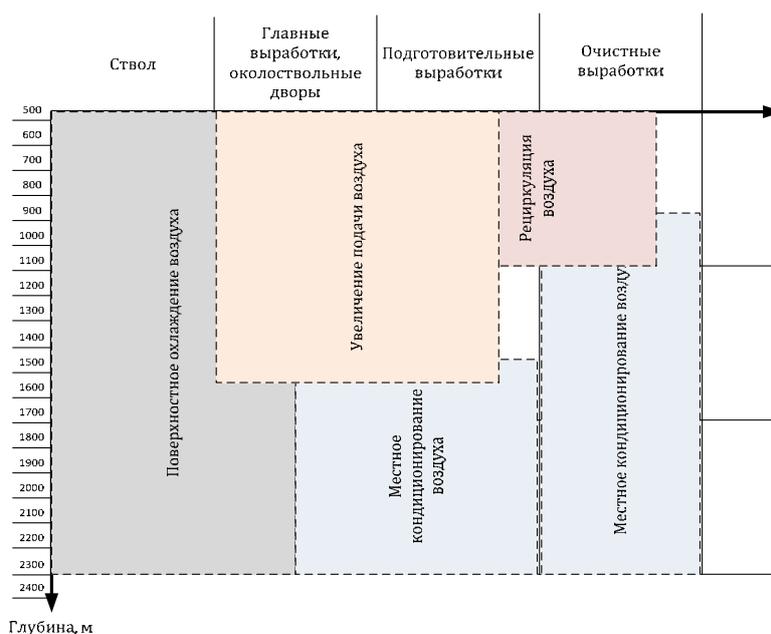


Рис. 1. Диаграмма к определению эффективных мероприятий регулирования теплового режима

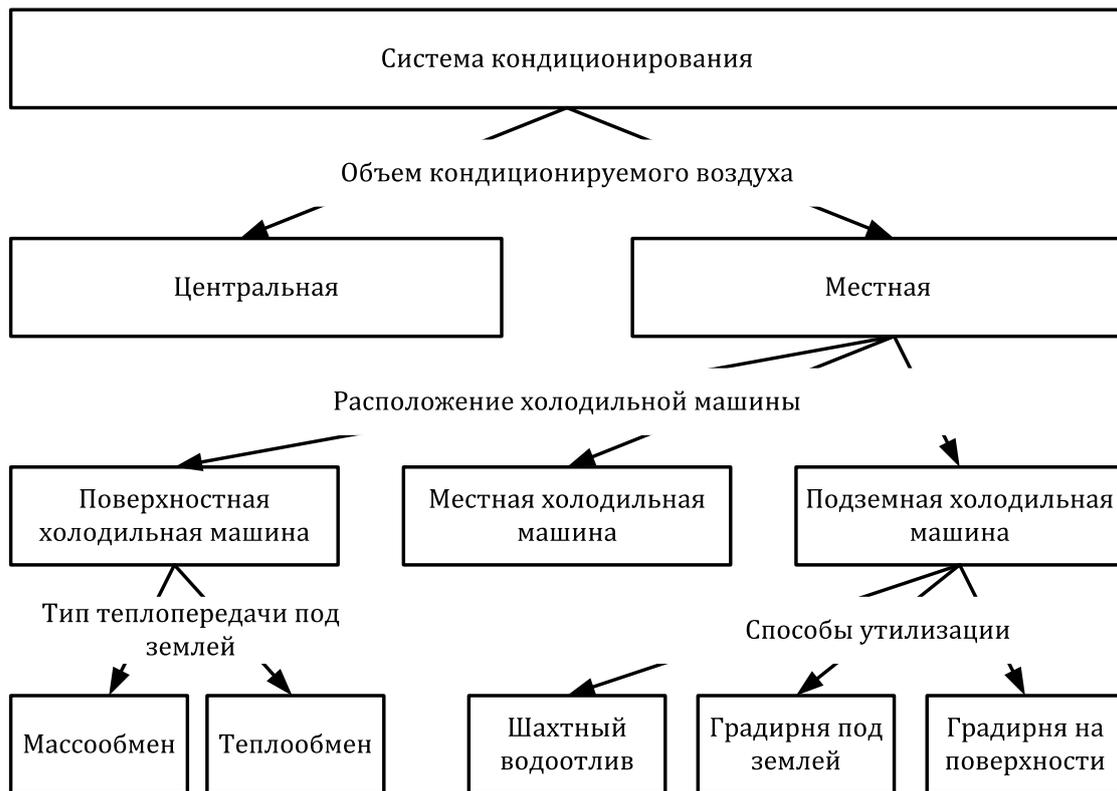


Рис. 2. Классификация систем кондиционирования воздуха

Для этого производится моделирование вариантов использования теплотехнических вариантов, расчет эффективности и эксплуатационных затрат при их применении. Дополнительно при оценке теплотехнических мероприятий регулирования теплового режима с точки зрения эксплуатационных затрат производится суммарный расчет энергетических затрат на работу и обслуживание технических средств систем кондиционирования воздуха по следующему выражению

$$\sum_{i=1}^N (K_{Ni} \cdot W_i^R + N_i^F + N_i^P) \rightarrow \min$$

где  $N$  — общее число холодильных машин в разрабатываемой системе кондиционирования;  $W_i^R$  — холодильная мощность  $i$ -ой холодильной машины, кВт;  $K_{Ni}$  — безразмерный коэффициент холодильной мощности, равный отношению электрической мощности холодильной машины к холодильной, зависит от типа оборудования и условий его работы и варьируется в интервале от 0,4 до 1;  $N_i^F$  — суммарная мощность вентиляторов, обеспечивающих проток воздуха через систему теплообменных аппаратов  $i$ -ой холодильной машины, кВт;  $N_i^P$  — суммарная мощность насосов, обеспечивающих проток масла, тепло- и хладоносителей в  $i$ -ой холодильной машине, кВт.

Разработанные методические, технологические и программные средства применены при разработке ресурсосберегающей системы нормализации микроклиматических условий в шахте «Глубокая» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». На строящейся шахте «Глубокая» глубина ведения горных работ достигает 1700-2100 метров, температура пород достигает +53,4 °С. Климат района субарктический, характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха (-9,8 °С), продолжительным холодным периодом (248 дней) с сильными морозами и метелями, средняя месячная температура воздуха наиболее холодного месяца -28,2 °С.

Согласно разработанной методике разработки ресурсосберегающих систем нормализации микроклиматических условий, выполнено исследование и разработка горно-технических и теплотехнических мероприятий по охлаждению рудничного воздуха в горных выработках шахты для обеспечения теплового режима во всех рабочих зонах на все периоды развития горных работ. Для этого на основании результатов численного моделирования проведен сравнительный анализ эффективности различных технических мероприятий регулирования теплового режима шахты «Глубокая» установлено, что достичь требуемой температуры воздуха во всех рабочих зонах шахты можно только за счет местного охлаждения воздуха. В результате с помощью расчетов параметров местного охлаждения воздуха в рабочих зонах установлено, что на период максимального развития горных работ требуемая мощность системы кондиционирования составит 5783 кВт.

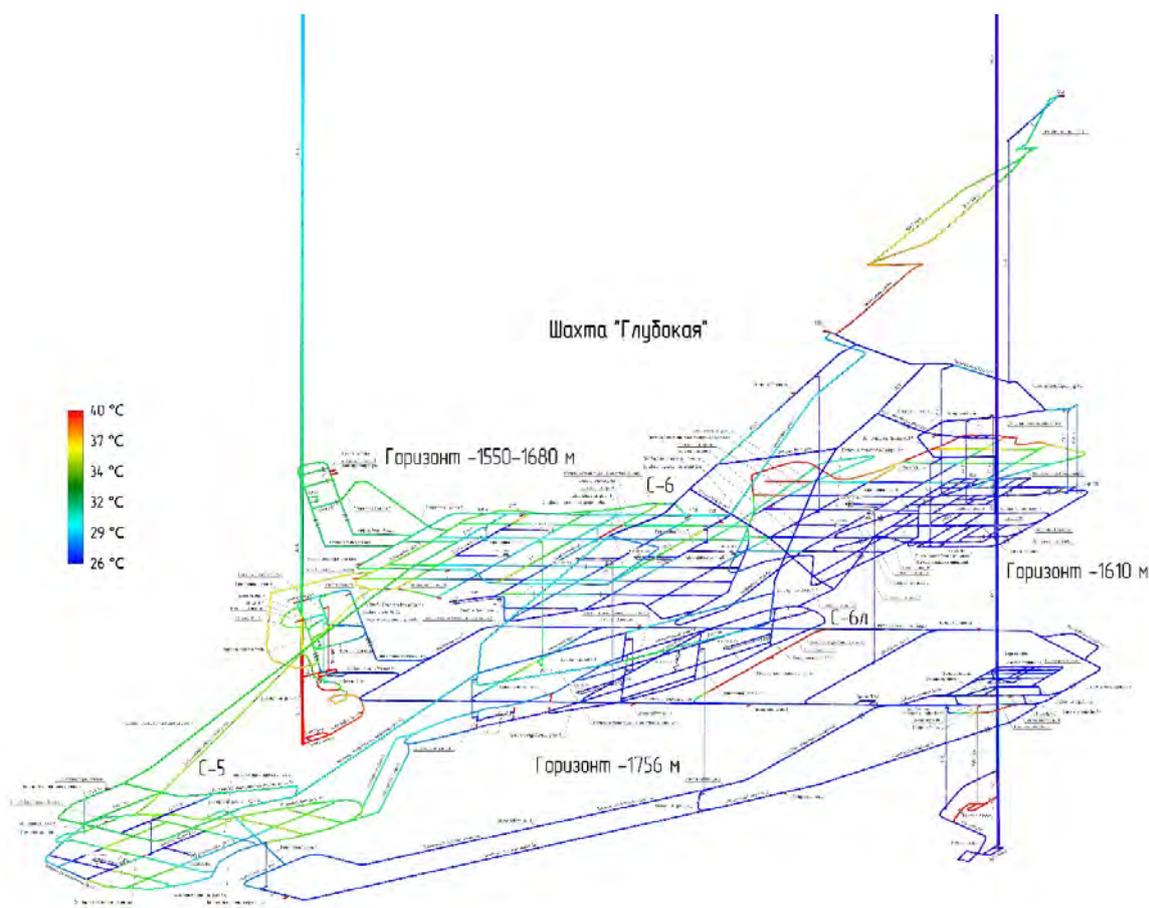


Рис. 3. Распределение температуры воздуха в шахте «Глубокая» при применении местного охлаждения воздуха

Для условий шахты «Глубокая» рассмотрены все возможные варианты: подземное и наземное размещение центральной холодильной машины, применение местных холодильных машин, схемы с утилизацией избыточной теплоты либо в систему главного водоотлива, либо в атмосферу на поверхности. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 1. Каждый из вариантов рассчитан на одинаковую холодильную мощность 5783 кВт и согласно результатам расчета одинаковая холодильная мощность обеспечивается комплексами, существенно различающимися по суммарной установленной электрической мощности и годовому энергопотреблению.

Таблица 1

Сравнительный анализ энергоэффективности различных систем кондиционирования воздуха для обеспечения холодопроизводительности 5783 кВт

	Поверхностная атмосфера	Рудничная атмосфера	Шахтных водоотлив
Центральная холодильная машина на поверхности	559,1 кВт 4,9 МВт·ч	—	—
Центральная холодильная машина под землей	3349,4 кВт 29,3 МВт·ч	Не достаточно мощности утилизации тепла	5400 кВт 47,3 МВт·ч
Местная холодильная машина	—	Не достаточно мощности утилизации тепла	6480 кВт 56,7 МВт·ч

Из приведенных в таблице № 1 результатов расчета следует, что наиболее целесообразным и выгодным вариантом является поверхностное размещение холодильной машины с градирней на промплощадке вентиляционного ствола. Это объясняется тем, что требуемую большую холодильную мощность большую часть года можно будет обеспечивать за счет холодного климата региона, без дополнительных затрат электроэнергии.

Таким образом, построение систем нормализации микроклиматических параметров, основанное на численном моделировании процессов тепло- и воздухораспределения, позволяет разрабатывать комплексные системы кондиционирования воздуха, отличающиеся эффективностью использования и оптимальным сочетанием капитальных и эксплуатационных затрат.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-45-590973 «Разработка методов прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания горнодобывающих предприятий».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Вып. 78: утв. 11.12.2013, № 32935. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 276 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).

2. Зайцев А.В. Исследование критериев нормирования микроклиматических условий в горных выработках / А.В. Зайцев, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2015. – № 12. – С. 151-156.

3. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / В.Н. Карелин, А.В. Кравченко, Л.Ю. Левин, Б.П. Казаков, А.В. Зайцев // Горн. журн. – 2013. – № 6. – С. 65-68.

4. McPherson M.J. Subsurface ventilation and Environmental engineering. – London: Chapman & Hall, 2009. – 935 p.

5. Щербань А.Н. Руководство по регулированию теплового режима шахт / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.: ил.

6. Казаков Б.П. Современные подходы к разработке способов управления тепловым режимом рудников при высокой температуре породного массива / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // Горн. журн. – 2014. – № 5. – С. 22-25.

УДК 622.45

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.71

М.А. СЕМИН

*Горный институт УрО РАН*

**РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ  
ДВУМЕРНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СТЕФАНА  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМЕ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ  
ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ**

Сложные инженерно-геологические и гидрогеологические условия строительства подземных сооружений требуют применения специальных способов производства работ, в частности, искусственного замораживания грунтов [1]. Применительно к строительству шахтных стволов, искусственное замораживание грунтов и горных пород используется для создания ледопородного ограждения (ледопородной завесы) вокруг запроектированной горной выработки (см. рис. 1). Для этого по контуру запроектированной к проходке выработки бурятся скважины, в которые опускаются замораживающие колонки. За счет работы холодильных станций по колонкам осуществляется циркуляция хладоносителя (рассола) с поддерживаемой температурой до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1, 2]. В результате циркуляции охлаждающего рассола в замораживающей колонке окружающий ее породный массив постепенно охлаждается, а содержащаяся в массиве вода кристаллизуется. По истечении некоторого времени вокруг замораживающих колонок образуются одиночные ледопородные цилиндры, которые в дальнейшем смыкаются, образуя сплошное ледопородное ограждение, предотвращающее попадание грунтовых вод в строящуюся горную выработку [3].

Согласно сводам правил [3, 4], для наблюдения за процессом искусственного замораживания грунтов и горных пород необходимо использовать контрольные скважины — гидрогеологические и термометрические. Гидрогеологические скважины используются для контроля уровня грунтовых вод, а термометрические — для измерения температуры грунта по всей глубине скважины. Экспериментальная термометрия в контрольных скважинах имеет недостаток, связанный с локальностью измерения температур в отдельных скважинах.

Наряду с экспериментальными измерениями параметров грунтов в скважинах, применяются теоретические методы прогнозирования теплового режима породного массива [5–7]. Теплофизические параметры для математических моделей породного массива определяются исходя из инженерно-геологических изысканий, проводимых на промплощадке рудника перед строительством стволов. Как показывает практика, теплофизические параметры слоев горных пород, получаемых в результате инженерно-геологических изысканий, зачастую имеют высокую погрешность, а математические модели, описывающие тепло- и массообменные процессы в горных породах, построенные с использованием этих параметров, оказываются неэффективны при решении практических задач [8].

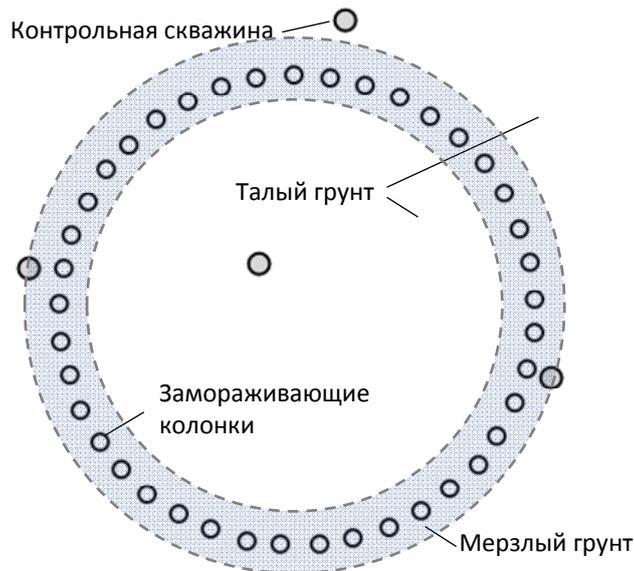


Рис. 1. Ледопородное ограждение в горизонтальном разрезе массива горных пород

Решение указанных недостатков экспериментальной термометрии и теоретических методов прогнозирования теплового режима породного массива достигается с использованием современных средств экспериментальных измерений, передачи и обработки данных, которые позволяют расширить классический термометрический контроль в скважинах до системы непрерывного интеллектуального мониторинга теплового режима породного массива в целом [9 — 11]. основополагающими принципами системы непрерывного интеллектуального мониторинга являются:

1. Непрерывное измерение температуры по всей глубине контрольно-термических скважин с помощью оптического волокна.
2. Передача и хранение измеренных температур породного массива, а также 3. параметров системы заморозки в базе данных на сервере.
3. Калибровка теплофизических параметров слоев горных пород в математической модели тепло- и массопереноса на основе измеренных температур в контрольных скважинах.
4. Прогнозирование динамики роста ледопородного ограждения со временем на основании численного моделирования тепло-и массопереноса в слоях горных пород.

Калибровка теплофизических параметров слоев горных пород проводится путем минимизации критерия рассогласования  $I$  температур на контрольных скважинах, измеренных экспериментально и рассчитанных теоретически путем решения прямой задачи Стефана [7, 12, 13].

$$I = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} \int_0^{t_\Sigma} (T_i^{(e)} - T_i^{(m)})^2 dt \quad (1)$$

Здесь  $T_i^{(m)}$  — модельная температура на  $i$ -й скважине, °C;  $T_i^{(e)}$  — экспериментальная температура на  $i$ -й скважине, °C;  $N_c$  — количество контрольных скважин,  $t_\Sigma$  — время заморозки, сут.

Минимизация функционала (1) в фазовом пространстве теплофизических свойств породного массива осуществляется с использованием модификации метода градиентного спуска. На каждой итерации алгоритм  $N+1$  раз решается прямая задача Стефана

для определения частных производных функционала  $F$  по  $N$  различным параметрам минимизации.

Пусть  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)$  — вектор калибруемых параметров задачи;  $I$  — текущее значение функционала рассогласования, представляющее собой также ошибку расчета обратной задачи;  $\varepsilon_{\max}$  — максимально допустимая ошибка решения обратной задачи. Тогда предложенный алгоритм включает в себя следующие шаги:

1. Определение начальных приближений  $\mathbf{p}^{(0)}$ .
2. Расчет прямой задачи Стефана, определение текущей ошибки  $I$  по формуле (2), сравнение с максимально допустимой ошибкой  $\varepsilon_{\max}$ . Если  $I < \varepsilon_{\max}$ , то требуемая точность достигнута и следует завершить расчет, иначе — переход к шагу 3.
3. Выбор малых отклонений калибруемых параметров  $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$  на  $k$ -й итерации алгоритма. Расчет прямой задачи Стефана для каждой компоненты вектора  $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$ . Вычисление частных производных функционала  $I$ :

$$\frac{\Delta I^k}{\Delta p_i} = \frac{I(p_i^k + \Delta p_i) - I(p_i^k)}{\Delta p_i} \quad (19)$$

$$\nabla I^k = \left( \frac{\Delta I^k}{\Delta p_1}, \dots, \frac{\Delta I^k}{\Delta p_n} \right)$$

4. Расчет новых значений калибруемых параметров на  $(k+1)$ -й итерации задачи по формуле

$$\Delta \mathbf{p}^k = \mu \Delta \mathbf{p}^{k-1} + (1 - \mu) I^k \cdot \frac{\nabla I^k}{|\nabla I^k|} \quad (20)$$

$$\mathbf{p}^{k+1} = \mathbf{p}^k + \sigma \Delta \mathbf{p}^k$$

Здесь  $\mu \in [0, 1)$  — параметр, характеризующий фактор предыстории,  $\sigma > 0$  — параметр, определяющий скорость градиентного «спуска».

5. Проверка на невыход параметров калибровки из области допустимых значений.

$$p_i^k \in [p_{i \min}, p_{i \max}] \quad (21)$$

6. Если превысили максимальное количество итераций, то необходимо завершить расчет, иначе — возврат к шагу 2.

На рис. 2 представлены значения влагосодержания различных слоев горных пород, откалиброванные с использованием предложенного алгоритма на основе измеренных температур в контрольных скважинах для условий промплощадки строящегося рудника Нежинского ГОК ИООО «Славкалий».

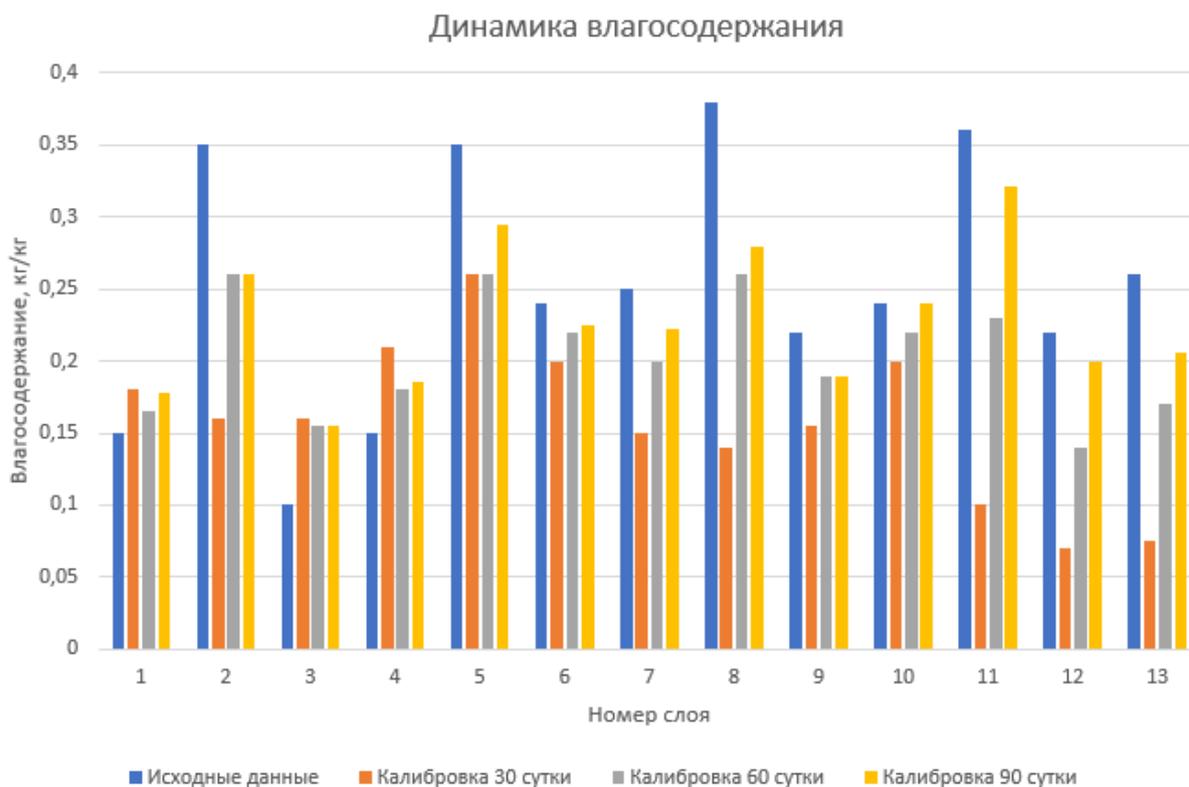


Рис. 2. Значения влагосодержания различных слоев горных пород, полученные в результате калибровки теплофизических свойств

На рис. 2 представлены начальные значения влагосодержания, полученные из инженерно-геологических изысканий, а также откалиброванные значения для 30, 60 и 90 суток с момента начала заморозки. Получено, что присутствует зависимость калибруемых теплофизических свойств пород от времени. Предложены возможные объяснения данного эффекта: неоднородность и анизотропия реального породного массива, наличие вертикального градиента температур, наличие погрешности данных инклинометрии скважин, пренебрежение фильтрационной миграцией грунтовых вод в математической модели. Для ряда слоев характерен постепенный «откат» к начальным значениям влагосодержания, полученным из инженерно-геологических изысканий.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 17-11-01204.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВСН 189-78. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей / Минтрансстрой: Утв. Гл. техн. упр. 10.05.78: [Введ. В действие 01.10.78]. – М., 1978. – 115 с.
2. Чубик И.А. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов / Чубик И.А., Маслов А.М. – 2-е изд., доп. – М.: Пищ. пром-ть, 1970. – 184 с.

3. СП 45.13330.2012 Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87: утв. 29.12.2011. – М., 2012. – 145 с. – (Частично отменен)
4. СП 103.13330.2012 Защита горных выработок от подземных и поверхностных вод: утв. 30.06.2012. – М., 2012. – 72 с.
5. Трупак Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 896 с.: ил.
6. Бельферман М.У. Температурное поле ледопородного ограждения шахтных стволов при двухрядном расположении замораживающих колонок. // Вопросы организации и механизации горнопроходческих работ / ИГД им. А.А. Скочинского. – М., 1976. – С. 109-116.
7. Левин Л.Ю. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 154-161.
8. Контроль формирования, проверка целостности и достижения расчетной толщины ледопородного ограждения вокруг шахтных стволов рудника Нежинский ГОК: отчет о НИР, № 05-3-05/13-18/15/2018. – Пермь. 2018. – 56 с.
9. Левин Л.Ю. Контроль теплового режима породного массива на основе применения оптоволоконных технологий мониторинга температур в скважинах / Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев, М.А. Семин // Горное эхо. – 2016. – № 1 (62). – С. 35-37.
10. Левин Л.Ю. Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве. / Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, №3. – С. 655-663.
11. Метод решения обратной задачи Стефана для контроля состояния ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков, Е.В. Колесов // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 255-267.
12. Численное решение обратной задачи определения объемной теплоемкости породного массива в процессе искусственного замораживания / М.С. Желнин, О.А. Плехов, М.А. Семин, Л.Ю. Левин // Вестн. ПНИПУ: Механика. – 2017. – № 4. – С. 56-75.
13. Левин Л.Ю. Контроль и прогноз формирования ледопородного ограждения с использованием оптоволоконных технологий / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 236-238.

УДК 622.253

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.72

О.С. ПАРШАКОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ  
ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
ШАХТНЫХ СТВОЛОВ**

**Введение**

При разработке месторождений полезных ископаемых наиболее дорогостоящим, долгосрочным и трудоемким процессом является строительство комплекса капитальных горных выработок, в особенности вертикальных шахтных стволов. При этом, как показывает опыт, на месторождениях калийных солей каждый ствол пересекает толщу неустойчивых пород с высокой обводненностью. В результате для исключения про-

никновения подземных вод в горные выработки строительство шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях осуществляется с применением специальных способов проходки, которые приводят к значительному увеличению объемов капитальных вложений, а также продолжительности срока строительства.

Основным специальным способом проходки стволов в обводненном породном массиве является искусственное замораживание горных пород с использованием холодильных установок. Конечной целью замораживания породного массива является образование ледопородного ограждения (ЛПО) проектных параметров, обеспечивающих необходимую прочность для сдерживания давления подземных вод [1].

Процесс искусственного замораживания породного массива принято делить на периоды формирования и поддержания ЛПО требуемых размеров: активное замораживание – образование ледопородного ограждения до начала проходки ствола; пассивное замораживание – поддержание сформированного ограждения в замороженном состоянии до возведения постоянной крепи; размораживание – оттаивание замороженных горных пород до их естественного состояния. Для каждого периода рассчитываются параметры работы замораживающего комплекса строящихся стволов, которые напрямую зависят от естественной температуры породного массива, времени замораживания, а также от площади поверхности ледопородного ограждения.

В период активного замораживания горных пород холодильные станции, как правило, используются на полную мощность до создания ЛПО проектных размеров. В этот период количество теплоты, отводимое от охлаждаемого породного массива, является максимальным. После того как ледопородное ограждение сформировано, дальнейшее увеличение толщины ЛПО будет являться нецелесообразной затратой средств, поэтому режим работы замораживающего комплекса меняется [2].

При переходе на режим пассивного замораживания пород ледопородное ограждение должно сохранять свои размеры и прочность. Задача поддержания ЛПО в этот период сводится к отведению от мерзлых горных пород теплопритока со стороны незамороженного породного массива. Однако на практике замораживающие комплексы в большинстве случаев работают с полной нагрузкой от начала замораживания до возведения постоянной крепи в стволе. В результате этого ледопородное ограждение непрерывно увеличивается и на момент окончания периода пассивного замораживания имеет значительно большие размеры, чем те, которые были определены проектом.

В связи с чем, в процессе контроля за формированием ЛПО на основе интеграции современных технологий мониторинга температуры и методов математического моделирования поставлена цель не только повысить безопасность ведения горных работ, но и вывести на качественно новый уровень управление состоянием ледопородного ограждения с учетом обеспечения минимальных затрат на материальные, финансовые и трудовые ресурсы.

#### **Контроль формирования и состояния ледопородного ограждения**

В начале 2016 года на Петриковском месторождении калийных солей ОАО «Беларуськалий» началось строительство вертикальных шахтных стволов. Согласно проекту организации строительства Петриковского горно-обогатительного комбината (ГОК) проходка стволов осуществляется при помощи искусственного замораживания горных пород.

Для оперативного контроля за процессом формирования и состояния ледопородного ограждения на участке строительства шахтных стволов Петриковского ГОК внедрена интеллектуальная система контроля, разработанная «ГИ УрО РАН», которая базируется на использовании технологии оптоволоконной термометрии. Основное отличие системы «ГИ УрО РАН» от аналогов заключается в том, что ее структурные эле-

менты позволяют хранить все данные геологических и теплофизических свойств горных пород, осуществлять сбор параметров работы замораживающих станций стволов и непрерывно обрабатывать данные экспериментальных измерений распределенной температуры породного массива (рисунок 1). Кроме того, при помощи данной системы производится математическая интерпретация результатов термометрии скважин, на основании которой определяется трехмерное температурное поле во всем замораживаемом породном массиве [3].

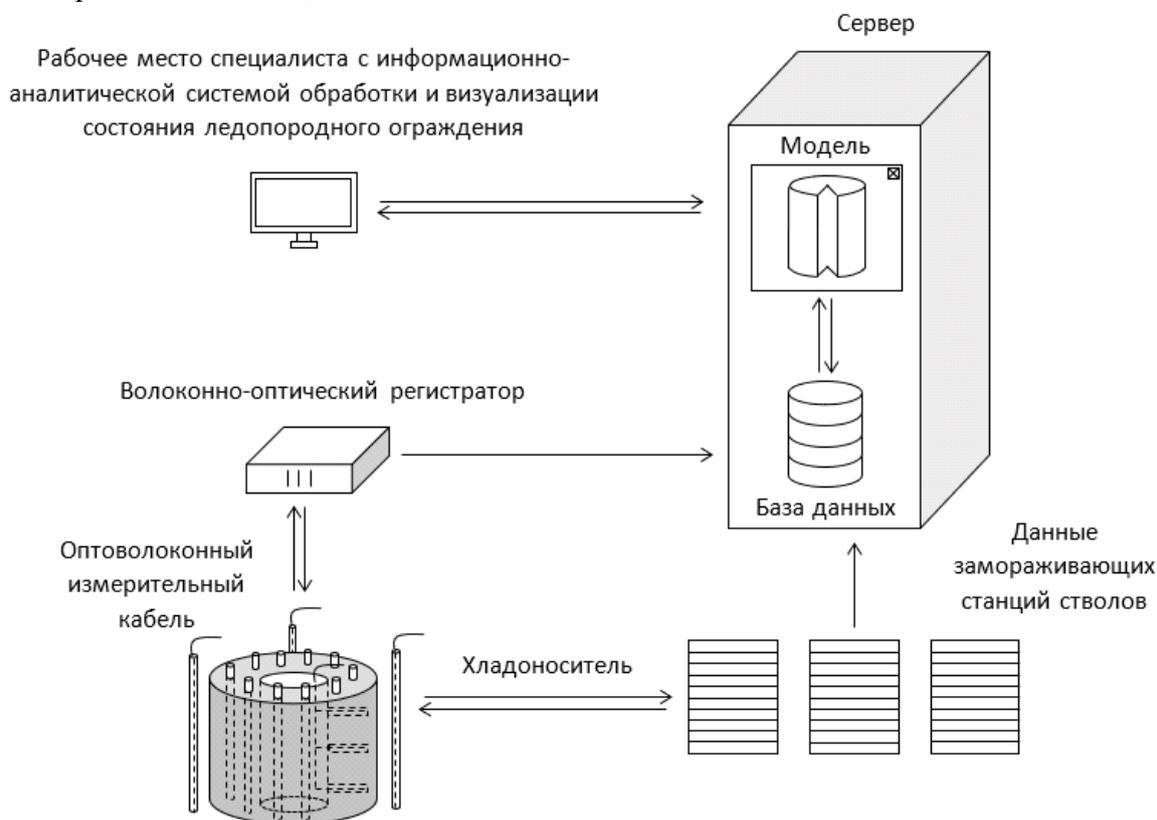


Рис. 1. Обобщенная структурная схема интеллектуальной системы контроля ЛПО

Для определения температурного поля во всем замораживаемом породном массиве решаются прямая и обратная задачи Стефана (задачи теплопроводности с подвижной границей) [4].

Благодаря применению современных технологий контроля и численных методов значительно повышается качество прогноза процесса замораживания, и при необходимости обеспечивается возможность его регулирования и оптимизации [5].

#### **Управление формированием и состоянием ледопородного ограждения**

В соответствии с проектной документацией для достижения ледопородными ограждениями шахтных стволов Петриковского ГОКа проектных параметров рассчитанное время работы замораживающего комплекса в активном режиме составляет 121 сутки. После образования ЛПО требуемых размеров и выдачи заключения о возможности начала горнопроходческих работ замораживающий комплекс должен быть переведен в пассивный режим. Продолжительность работы в пассивном режиме составляет 512 суток и складывается из времени, необходимого для проходки стволов, сооружения постоянной крепи и цементационной завесы ниже участка замороженных пород. При этом проектом организации строительства преду-

смотрено, что пассивное замораживание производится при такой же температуре подачи хладоносителя ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в замораживающие колонки, как и при активном замораживании.

Однако в результате выполнения оперативного контроля за состоянием замороженного породного массива на базе экспериментальных измерений температуры горных пород по всей глубине контрольно-термических скважин, а также решения обратной задачи Стефана [4], установлено, что для условий строящегося ствола № 1 Петриковского ГОК при переходе на пассивный режим замораживания ледопородное ограждение продолжало устойчиво расти. Кроме того, фактическая толщина ЛПО на 87 сутки с начала активного замораживания превысила проектную более чем в 1,5 раза для всех исследуемых слоев породного массива.

Рассчитанная толщина ледопородного ограждения явно свидетельствовала о неэффективной трате средств, используемых для его формирования и дальнейшего поддержания обводненных горных пород в замороженном состоянии. Поэтому, на основании полученных результатов принято решение о начале проходки ствола № 1 после 87 суток работы замораживающих станций в активном режиме.

Кроме этого, с целью организации режима пассивного замораживания пород и выбора требуемой холодопроизводительности замораживающего комплекса для поддержания ЛПО выполнено математическое моделирование термодинамических процессов, происходящих в породном массиве при различных параметрах работы замораживающих станций ствола с учетом перехода с активного режима на пассивный режим после 3 месяцев замораживания.

Анализ произведен для наименее благоприятного слоя породного массива – «песчаник кварцевый» (критерий – максимальная теплопроводность  $2,4 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$ ). В качестве расчетных параметров задачи приняты: теплопроводность в зоне льда  $5,99\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ; теплопроводность в зоне охлаждения  $5,01\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ ; удельная теплоемкость в зоне льда  $775\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ ; удельная теплоемкость в зоне охлаждения  $868\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ ; плотность среды  $2450\text{ кг}/\text{м}^3$ ; температура фазового перехода  $-0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; удельная теплота плавления льда  $330\text{ кДж}/\text{кг}$ ; влагосодержание массива  $0,04\text{ кг}/\text{кг}$ ; температура непотревоженного породного массива  $+7,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В результате моделирования установлено, что при сохранении параметров работы замораживающих станций строящегося ствола № 1 (температура хладоносителя  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , расход –  $380\text{ м}^3/\text{ч}$ ) в соответствии с проектом организации строительства Петриковского ГОКа, замораживание породного массива приводит к дальнейшему увеличению толщины ледопородного ограждения. На момент окончания возведения цементационной завесы строящегося ствола № 1 (621 сутки) толщина ЛПО достигнет 9,9 метров, что составляет 495 % от проектного значения. При повышении температуры хладоносителя до  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  толщина ледопородного ограждения составит 8,4 метров (420 %), до  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  – 6,2 метра (310 %), до  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  – 3,9 метра (195 %), а при температуре подачи хладоносителя равной  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  – требуемая толщина ЛПО сохранится только на период 36 суток, что является недопустимым (рисунок 2). Следует отметить, что расход хладоносителя в отличии от проектных параметров был снижен до  $280\text{ м}^3/\text{ч}$ .

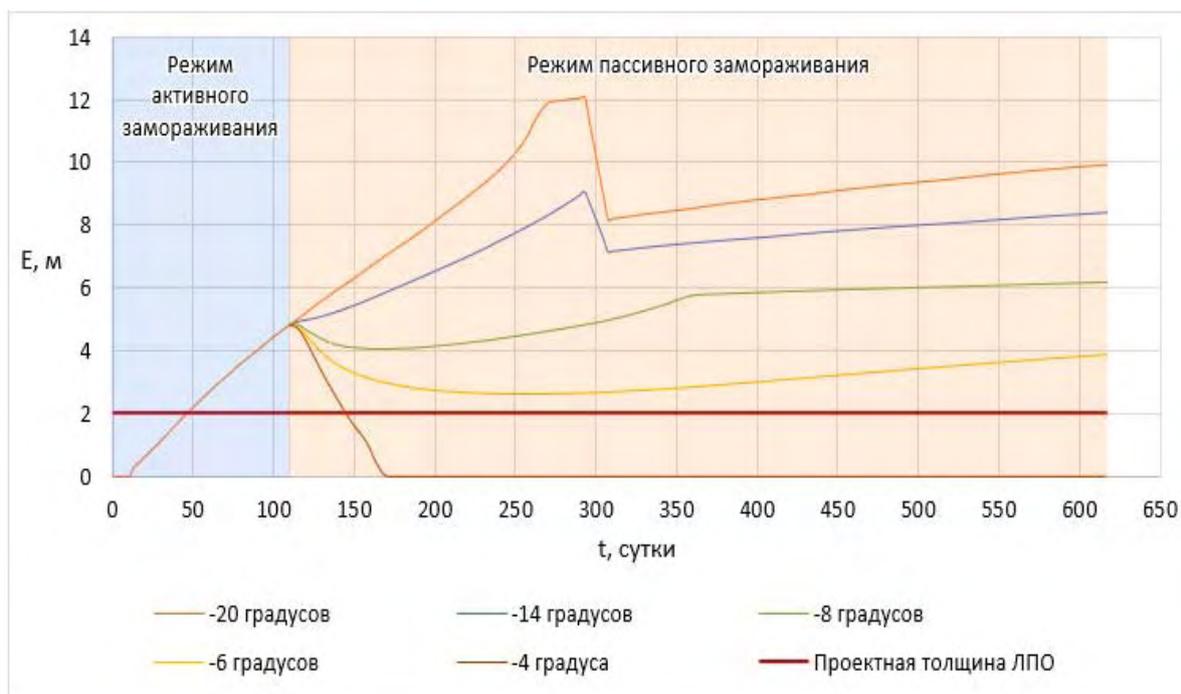


Рис. 2. Динамика толщины ледопородного ограждения

Отсюда следует, что для отвода теплопритока от мерзлых горных пород со стороны незамороженного породного массива с целью поддержания требуемых параметров ледопородного ограждения достаточно обеспечить рабочие параметры замораживающих станций с температурой подачи хладоносителя в замораживающие колонки равной  $-6^{\circ}\text{C}$  и его расходом  $280\text{ м}^3/\text{ч}$ . При этом к окончанию периода пассивного замораживания водонасыщенных горных пород рассчитанная толщина будет превышать проектную с достаточным запасом.

Полученные результаты указывают на то, что использование передовых технологий мониторинга температуры породного массива совместно с математическим моделированием термодинамических процессов, происходящих в породном массиве в условиях искусственного замораживания, позволяет не только осуществлять прогноз формирования и состояния ледопородного ограждения, но и оперативно принимать технические решения по корректировке режима работы замораживающего комплекса.

В конечном итоге, в связи с переносом начала срока строительства на более ранний период, определением и регулированием параметров работы замораживающего комплекса в пассивном режиме, а также обоснованием раннего срока отключения замораживающих станций ствола № 1 сроки строительства ствола в обводненном породном массиве сокращены на 63 суток в сравнении с проектом (рисунки 3).

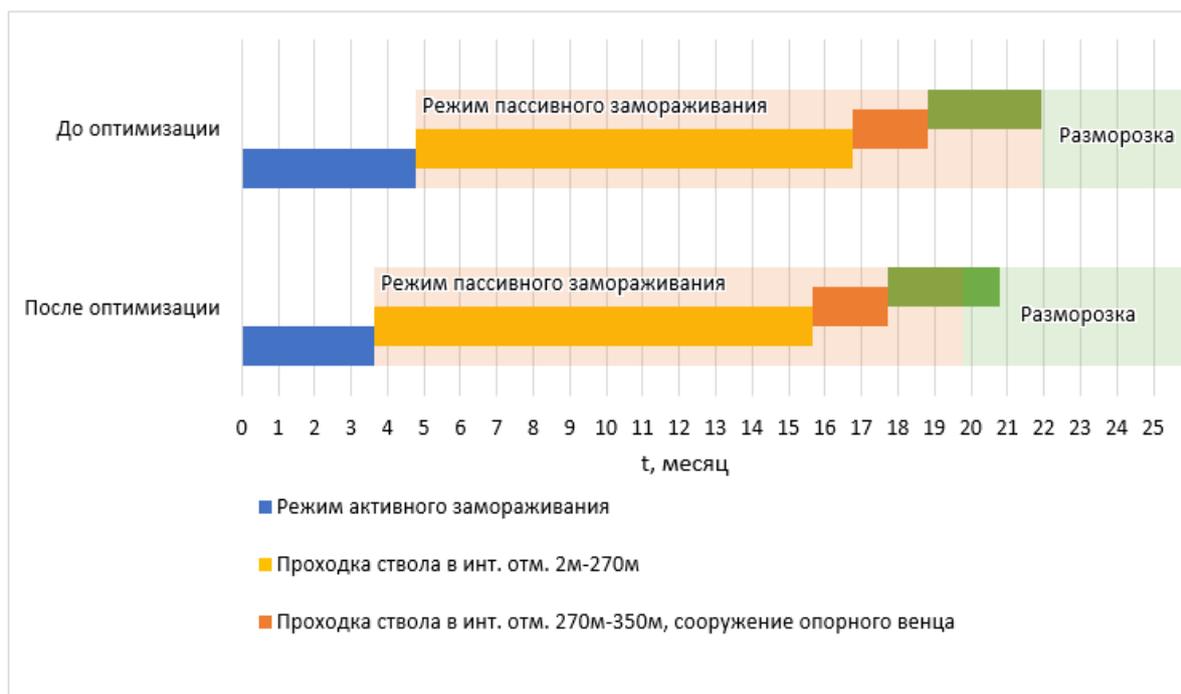


Рис. 3. Совмещенные графики строительства и замораживания горных пород ствола № 1 с учетом и без оптимизации процесса формирования ЛПО

В настоящее время выполняется аналогичное исследование для условий строительства шахтного ствола № 2 Петриковского ГОК, кроме этого успешно продолжают работы по контролю за температурным полем ствола № 1 при оттаивании замороженных горных пород.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 17-11-01204.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трупак Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. – М.: Недра, 1974. – 278 с.: ил.
2. Трупак Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 896 с.: ил.
3. Паршаков О.С. Разработка способа контроля формирования и состояния ледопородного ограждения шахтных стволов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 288-292.
4. Метод решения обратной задачи Стефана для контроля состояния ледопородного ограждения при проходке шахтных стволов / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков, Е.В. Колесов // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3.– С. 255-267.
5. Левин Л.Ю. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 154-161.

А.В. ПУГИН

*Горный институт УрО РАН*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ РАЗМОРАЖИВАНИИ ЛЕДОПОРОДНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ СТРОЯЩИХСЯ СТВОЛОВ**

Строительство стволов в неустойчивых водонасыщенных грунтах обычно производится под защитой искусственно созданного ледопородного ограждения (ЛПО). Искусственное замораживание грунта достигается посредством циркуляции хладоносителя в кольцевом контуре замораживающих скважин (колонок), окружающих пространство будущего ствола. Хладоноситель, забирая тепло из массива, понижает температуру породы, продуцируя превращение имеющейся в ней воды в лед, цементирующий частицы минерального скелета. При определенной отрицательной температуре ледопородное ограждение считается прочным и водонепроницаемым.

Основной контроль за состоянием этой временной защитной оболочки осуществляется посредством измерений температуры в контрольно-термических скважинах. По данным измерений в результате численного моделирования восстанавливается поле температур в области формирования ледопородного ограждения [1, 2].

После проходки ствола в интервале ЛПО на этапе возведения тубинговой колонны в целях экономии затрат замораживающие станции обычно отключают. Грамотный инженерный расчет и непрерывный контроль состояния ледопородного ограждения минимизируют риск возникновения аварийной ситуации при раннем отключении холодильного оборудования.

Существует одна проблема, требующая разрешения. При проходке ствола размещение контрольно-термических скважин возможно только снаружи контура замораживающих колонок. Однако исследование столь деликатного процесса, как таяние породы, требует получения информации о температурах внутренней части, поскольку именно со стороны ствола оказывают влияние различные технологические процессы, способствующие неравномерному оттаиванию ЛПО. Производство тампонажных работ по завершении строительства тубинговой колонны также требует информации о размораживании породы на определенное расстояние за передовым бетоном.

Инъекция тампонажного раствора на границу талой породы с передовым бетоном осуществляется через шпур, пробуренный сквозь технологические отверстия в тубингах. Традиционно строители используют периодические замеры термометром, погружая его в шпур, как источник информации о температурном состоянии внутренней части ледопородного ограждения. Очевидно, что использовать данный способ в качестве средства непрерывного контроля ЛПО не представляется возможным.

В качестве одной из научных предпосылок, послужившей толчком для монтажа внутриветвевой ветви датчиков и столь пристального изучения ледопородного ограждения необходимо привести следующий факт. При предварительном моделировании процессов размораживания после выключения замораживающего комплекса ледопородное ограждение испытывало быстрое повышение температур вплоть до температуры начала фазового перехода льда в воду с последующим крайне медленным снижением толщины ЛПО и температуры. Ситуация требовала устранения дефицита данных для корректного изучения проблемы.

Решение данной проблемы представлялось в виде модернизации системы термометрического контроля. В настоящее время для контроля состояния ЛПО во время проходки стволов применяются распределенные DTS-системы, в которых в качестве

датчика, измеряющего температуры в контрольно-термических скважинах, применяется оптическое волокно [3]. Модернизация системы заключалась в размещении разработанных институтом оптоволоконных датчиков в шпурах, пробуренных в бетонной крепи, а в последующем – через технологические отверстия в тубингах. Схема модернизированной системы термометрического контроля показана на рисунке 1.

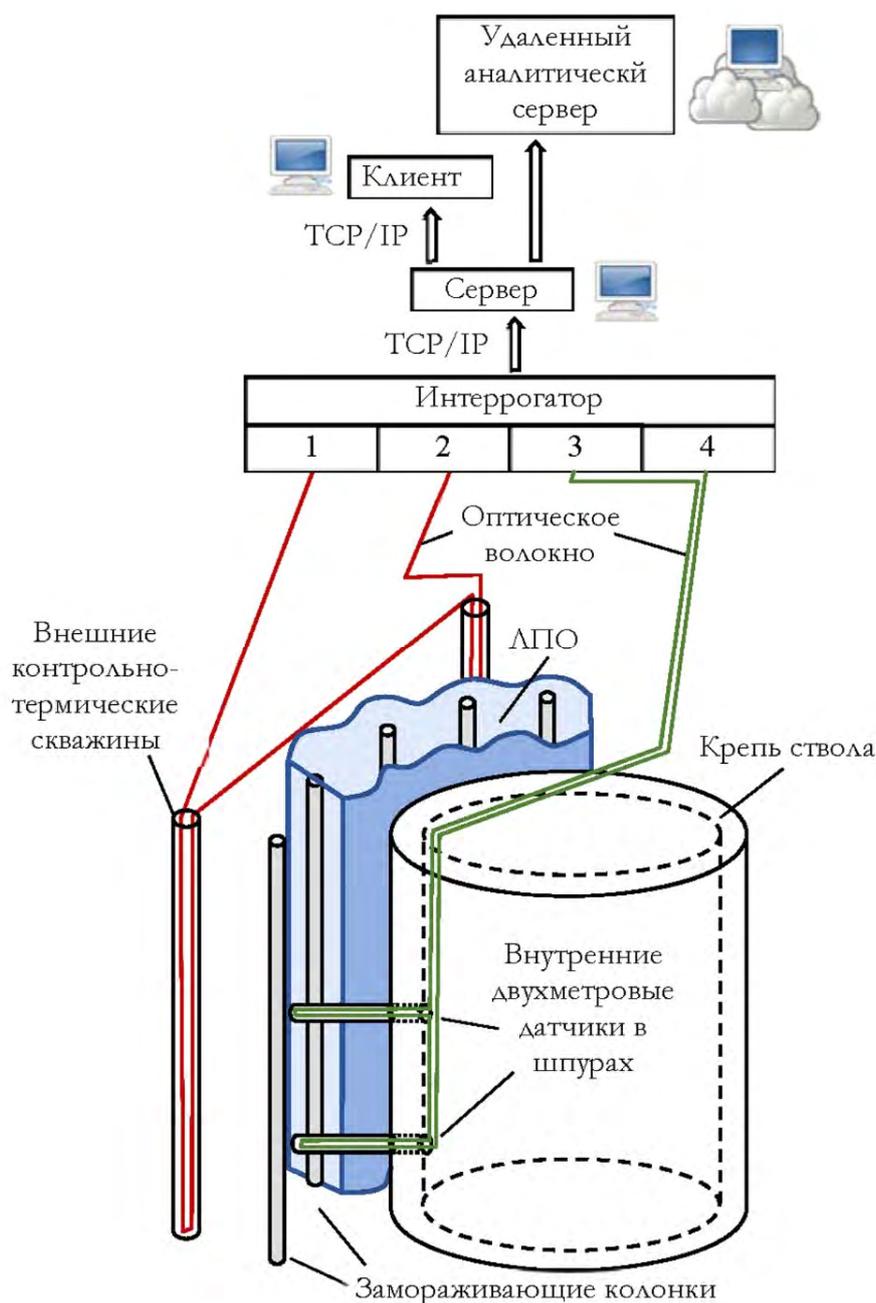


Рис. 1. Схема модернизированной системы термометрического контроля

Замораживание различных слоев массива происходит с разными скоростями вследствие разных теплофизических свойств горных пород. Глубины размещения датчиков определялись по результатам анализа геологии, физических свойств слоев и термограмм, отражающих динамику замораживания.

Модернизация системы термометрического контроля позволила изучить ледопородное ограждение изнутри и снаружи контура замораживающих скважин в процессе его оттаивания. Данные с внутриветвевой ветви датчиков объединялись с показаниями внешних контрольно-термических скважин и сведениями о температуре и расходе хладоносителя, циркулирующего в замораживающих колонках. Циркуляция хладоносителя в замораживающих колонках в режиме пассивного размораживания ЛПО (без подогрева хладоносителя) часто сохраняется для того, чтобы оттаивание породы на контакте с колонками происходило более равномерно, по наименее стрессовому сценарию.

Объединенные данные позволили составить адекватную математическую модель термодинамических процессов [1, 2], протекающих внутри ЛПО и изучить поведение теплового поля на стадии размораживания породы. Так, например, сохранение циркуляции хладоносителя в замораживающих колонках приводит к разрезанию ледопородного ограждения на два кольца: внутреннее и внешнее, и если таяние внешнего кольца целиком зависит от теплопритоков извне, то внутреннего — во многом определяется влиянием технологических факторов, действующих как источники тепла внутри ствола.

Данные фактических измерений подтвердили результаты предварительного численного моделирования. После отключения замораживающих станций температуры внутри ледопородного ограждения действительно испытывают быстрое повышение до температуры плавления льда, а затем изменяются крайне медленно (рис.2). Фазовый переход основной массы льда в воду осуществляется в малом интервале температур (порядка 0,3-0,5 °С). В это время происходит постепенное увеличение количества талой воды и уменьшение льдистости в породе. Ледопородного ограждения медленно уменьшается в размерах с внешней и внутренней стороны.

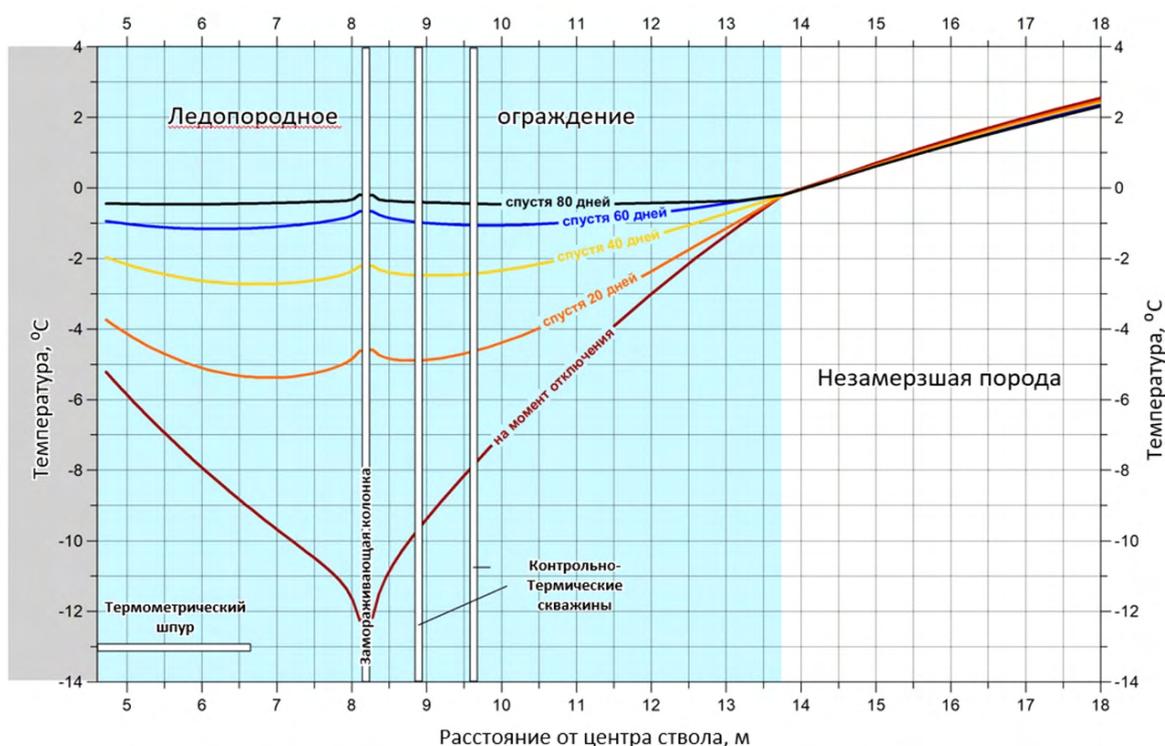


Рис. 2. Графики модельных температур через ледопородное ограждение по радиальному профилю от центра ствола на различные моменты времени после отключения замораживающей станции

При известных теплофизических характеристиках чугунных тубингов и бетонной крепи стало возможным выполнить оценку влияния теплообмена внутренней части ледопородного ограждения с теплым воздухом, нагнетаемым в ствол для обогрева в зимнее время. При длительном (несколько недель) постоянном обогреве крепи теплым воздухом отмечалось небольшое повышение скорости размораживания ледопородного ограждения со стороны ствола.

Остается еще много нерешенных вопросов, связанных с поведением тепловых полей при искусственном замораживании и размораживании грунтов в их естественном залегании. Но уже на многие из них в скором времени будут найдены ответы благодаря разработанной институтом и внедренной на производстве системе интеллектуального мониторинга ледопородных ограждений и последующему системному анализу полученных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Л.Ю. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, О.С. Паршаков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 154-161
2. Левин Л.Ю. Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве. / Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, № 3. – С. 655-663.
3. Левин Л.Ю. Контроль и прогноз формирования ледопородного ограждения с использованием оптоволоконных технологий / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, А.В. Зайцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 236-238.

УДК 622.6

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.74

Д.С. КОРМЩИКОВ

*Горный институт УрО РАН*

### **РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ СТВОЛА**

Шахтные стволы являются главными технологическими артериями, обеспечивающими функционирование горных предприятий. Их функции состоят из практически непрерывной доставки на поверхность добываемого полезного ископаемого, транспортировки производственного персонала, оборудования и материалов, необходимых для ведения горных работ.

Ствол представляет собой весьма сложный инженерный объект, состоящий из множество взаимосвязанных конструкций: трубы; кабели; вертикальные направляющие (проводники) для передвижения транспортных сосудов (клетей или скипов); горизонтальные стальные балки (расстрелы), к которым крепятся проводники и другие элементы.

Чтобы 50 тонный скип мог двигаться со скоростью 12-18 м/с, направляющие должны быть идеально выровнены. Поэтому нормативными документами регламентируется инструментальный контроль геометрического соотношения элементов ствола. Его периодичность определяется техническим руководителем предприятия, но не реже, чем раз в три года, согласно требованиям пункта 114 «Правил безопасности...» [1].

Кроме того, согласно требованиям пункта 111 «Правил безопасности...» [1], не реже одного раза неделю эксплуатация ствола останавливается на несколько часов для проведения визуального осмотра, а в случае отсутствия систем контроля плавности движения сосудов осмотра требуется проводить ежедневно.

Как показывает практика, несовершенство контроля состояния проводников приводит к приостановке работы подъема, что в лучшем случае приводит к снижению показателей добычи, а в худшем - к серьезным авариям с выходом из строя ствола на несколько месяцев и даже лет.

В настоящее время применяются системы контроля плавности движения сосудов [2], которые позволяют сократить количество визуальных осмотров ствола. Они производят контроль боковых и лобовых ускорений скипа и работают как индикатор – определяют участок ствола, на котором требуется провести осмотр. При этом инструментальный контроль проводников обычно проводится вручную специалистами маркшейдерской службы рудника.

Мы предлагаем систему, позволяющую автоматически фиксировать величину отклонения геометрических параметров проводников ствола от проектных. Она построена на основе оптических триангуляционных датчиков и бесплатформенной инерциальной навигационной системы. Подобная система имеет успешный опыт использования на железных дорогах [3].

Оптический триангуляционный блок производит замеры параметров относительно подъемного сосуда. Лазеры, установленные в оптических профилометрах, подсвечивают проводники ствола, образуя единую линию засветки. Объективы видеокамер технического зрения, установленных в профилометрах, фиксируют отраженные лучи в точки на матрицах камер, формируя профили каждого проводника. Контроллер профилометра ведет точный расчет угла распределения света на фотодиодной линии и по этим данным определяет расстояние до объекта. По смещению точек профилей проводников вычисляются параметры геометрии проводников.

Навигационная система построена на основе высокоточных волоконно-оптических датчиков угловой скорости и акселерометров навигационного класса точности. Она измеряет продольные и поперечные ускорения, угловые скорости по трем осям, возникающие при движении сосуда. На основе этих измерений бесплатформенная инерциальная навигационная система определяет положение сосуда в пространстве. Полученная в комплексе информация поступает в бортовой компьютер для первичной обработки и записывается в память системы.

Из-за отсутствия контакта с измеряемым объектом предлагаемая система производит точные измерения без снижения рабочей скорости скипа. Предложенное решение позволит осуществлять непрерывный контроль следующих параметров:

- ширина колеи,
- отклонений проводников от вертикали,
- износ проводников,
- стыковые зазоры,
- кривизна проводников,
- лобовые и боковые ускорения сосуда.

Система в режиме реального времени получает и обрабатывает результаты инструментальных измерений трехмерной математической модели, выдает отчеты, в которых показаны слабые места и предложены рекомендации по их устранению. [4,5]

Внедрение такой системы полностью автоматизирует профильную съемку и исключит простои подъемного оборудования, связанные с обследованием армировки ствола.

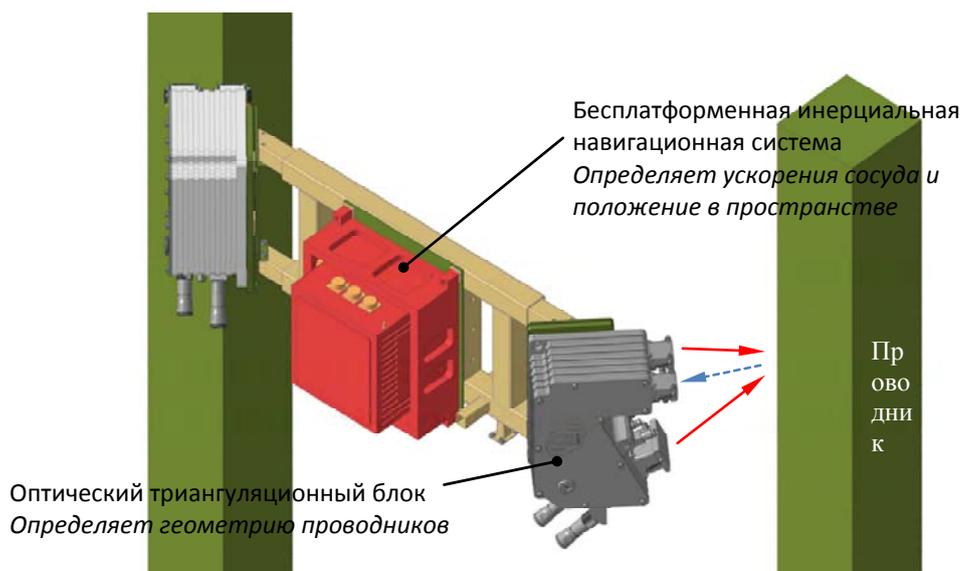


Рис. 1. Общий вид аппаратной части системы контроля проводников

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Вып. 78: утв. 11.12.2013, № 32935. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 276 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).
2. Трифанов Г.Д. Повышение эффективности эксплуатации шахтных подъемных установок, оборудованных системами мониторинга плавности движения скипов / Трифанов Г.Д., Микрюков А.Ю. // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2016. – № S15. – С. 3-13.
3. Tarabrin M. TVEMA - Safeguarding Track Safety // Railway Equipment. – 2014. – №. 4. – P. 85-88.
4. Кашников А.В. Информационно-аналитическая система «Паспорт ствола» для инженерно-технических работников рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 9. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2011. – С. 251-252.
5. Белкин Д.Г. Разработка средств анализа влияния динамических нагрузок подъемных сосудов на состояние армировки шахтных стволов в программном комплексе «Паспорт ствола» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 290-291.

УДК 622.4

DOI: 10.7242/GDSP.2018.16.75

С.В. МАЛЬЦЕВ

*Горный институт УрО РАН*

### **РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОВЕТРИВАНИЯ РУДНИКОВ СО СЛОЖНЫМИ СИСТЕМАМИ ВЕНТИЛЯЦИИ**

Удаление фронта ведения горных работ и увеличение требуемого количества воздуха для проветривания рудников обычно приводит к необходимости замены главной вентиляторной установки (ГВУ). В случаях, когда напора одной ГВУ становится

недостаточно для проветривания удаленных участков рудника, появляется необходимость введения в работу дополнительных главных вентиляторных установок. При проектировании вентиляции рудников можно выделить класс рудников со сложными системами вентиляции, которые характеризуются наличием двух и более главных вентиляторных установок, расположенных на разных стволах и имеющих обособленные зоны влияния. В условиях рудников такого типа необходимо учитывать взаимное влияние ГВУ и настраивать режимы их работы таким образом, чтобы каждая из них работала максимально эффективно на участки вентиляционной сети и не создавала помех для работы других главных вентиляторных установок.

Вопросом регулирования воздухораспределения в вентиляционных сетях занимались Скочинский А.А., Медведев И.И., Абрамов Ф.А., Красноштейн А.Е., Мохирев Н.Н., Пучков Л.А., Цой С.В., M.J. McPherson, H. Cross и другие. Анализ литературных источников [1,2,3,4] и программных продуктов [5,6] показывает, что задача определения эффективных параметров работы ГВУ при проектировании вентиляции рудников решена преимущественно для условий проветривания одной ГВУ. Вопросы же оптимизации рабочих параметров нескольких главных вентиляторных установок, определения влияния каждой ГВУ на эффективность проветривания не рассматриваются.

Повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции можно достигнуть за счет:

- разработки детализированных моделей вентиляционных сетей (учет «старения» горных выработок при эксплуатации);
- определения зон влияния главных вентиляторных установок.

В основу разработки детализированных моделей вентиляционных сетей положено определение фактических аэродинамических сопротивлений всех горных выработок рудника. При проведении экспериментальных исследований можно выделить участки вентиляционной сети, определяющие аэродинамические сопротивления которых вызывает наибольшие затруднения. К таким участкам относятся:

- шахтные стволы на глубоких рудниках;
- зоны выработанных пространств;
- подсечные горизонты.

Основная часть потери давления (до 70 %) приходится на шахтные стволы, поэтому от точности определения их аэродинамических сопротивлений зависит корректность модели вентиляционной сети и в дальнейшем точность определения рабочей точки главной вентиляторной установки. В шахтных стволах потеря давления происходит в результате преодоления воздушным потоком препятствий в виде расстрелов, лестничного и трубного отделений, а также под действием трения о крепь ствола. Многообразие вариантов комбинаций армирования и крепления стволов не позволяет с необходимой точностью классифицировать стволы по величинам аэродинамических сопротивлений, поэтому они должны определяться индивидуально на основании натурных исследований [7].

При определении аэродинамического сопротивления шахтных стволов необходимо выделить участок ствола, на котором проводить экспериментальные измерения, определить количество замеров в пределах ствола, а также факторы влияющие на измеряемые величины. В работах [8,9] подробно приведено решение этих задач.

Следующими участками, определяющие аэродинамические сопротивления которых вызывает затруднения, являются зоны выработанных пространств и подсечные горизонты. В условиях перечисленных участков проведение экспериментальных замеров представляется трудноосуществимым. Это связано в первую очередь с наличием выработок, находящихся в аварийном состоянии. Кроме того, существенное влияние на проведение замеров оказывает активное движение техники и наличие выработок со

слабо выраженным движением воздушных потоков. В совокупности не учет этих факторов приводит к разработке искаженной модели. В дальнейшем это отразится на разработке технических решений при проектировании новых участков.

Для решения задачи разработки детализированной модели вентиляционной сети разработан алгоритм автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки. Принципиальная схема работы алгоритма приведена на рисунке 1.

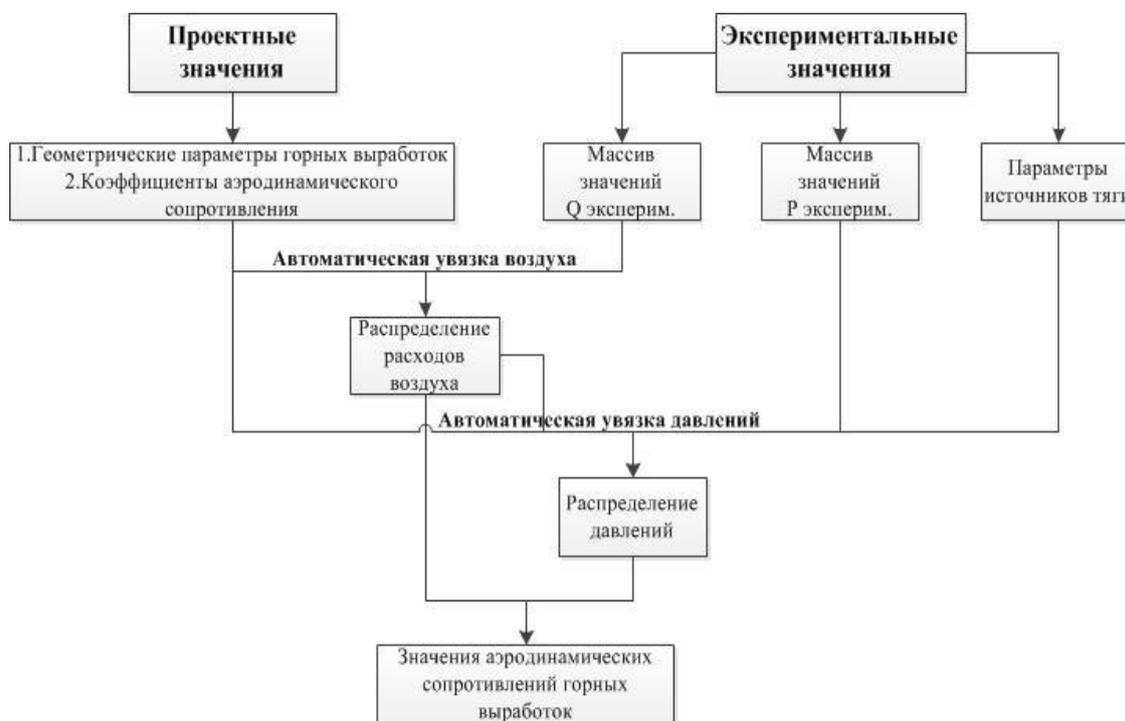


Рис. 1. Принципиальная схема работы алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки

На первом этапе вносятся исходные данные в топологию вентиляционной сети: проектные (длины, сечения, коэффициенты аэродинамического сопротивления) и замеренные значения (расходы воздуха, давления). Второй этап характеризуется разделением вентиляционной сети на подсети. Далее производится расчет стационарного воздухораспределения в каждой подсети. После этого распределяется невязка расходов между подсетями и производится корректировка балансов расходов воздуха. На следующем этапе узлы с замеренными значениями давлений объединяются в одно множество замеренных узлов, а узлы, в которых отсутствуют значения в другое множество корректируемых узлов. Далее в множестве корректируемых узлов пересчитываются давления. В завершении на основании увязанных давлений и расходов воздуха производится расчет фактических аэродинамических сопротивлений всех горных выработок в вентиляционной сети.

Разработанный алгоритм реализован в АК «АэроСеть» [10] верифицирован на моделях вентиляционных сетей рудников ПАО ЗФ «ГМК «Норильский Никель», обладающих всеми элементами сложной системы вентиляции.

В целях дальнейшего повышения эффективности проветривания рудников со сложными вентиляционными системами необходимо определить зоны влияния главных вентиляторных установок. В дальнейшем наличие информации о зонах влияния ГВУ позволит подобрать энергоэффективный режим проветривания каждой из главных вентиляторных установок.

Для определения степени влияния главных вентиляторных установок на проветривание участков вентиляционной сети рудников вводится матрица влияния  $I$ :

$$I_{jm} = \frac{\Delta Q_{jm}}{\Delta Q_m}, \quad (1)$$

где  $\Delta Q_{jm}$  — изменение (отклик) количества воздуха в  $j$ -той выработке при малой вариации производительности  $m$ -ой ГВУ;  $\Delta Q_m$  — вариация производительности  $m$ -ой ГВУ.

Другими словами, матрица влияния характеризует, как производительность  $m$ -ой ГВУ влияет на величину расхода воздуха в каждой  $j$ -той выработке.

$$\Delta Q_{jm} = Q_{jo} - Q_{jm}^*, \quad (2)$$

где  $Q_{jo}$  — расход воздуха в  $j$ -той выработке до изменения производительности  $m$ -ой главной вентиляторной установки;  $Q_{jm}^*$  — расход воздуха в  $j$ -той выработке после изменения производительности  $m$ -ой главной вентиляторной установки.

Расход воздуха в  $j$ -ой выработке является функцией производительностей всех источников тяги.

$$Q_j = Q_j(Q_1^{ГВУ}, \dots, Q_M^{ГВУ}), \quad (3)$$

где  $M$  — число всех ГВУ. Исходя из этого, формулу (1) можно интерпретировать как частную производную этой функции по расходам воздуха через ГВУ.

$$\frac{\partial Q_j}{\partial Q_m} \sim \frac{Q_j \cdot Q_m^{ГВУ} - Q_j \cdot (Q_m^{ГВУ} + \Delta Q_m)}{\Delta Q_m}. \quad (4)$$

В дальнейшем матрица влияния  $I$  используется для определения степени влияния каждой главной вентиляторной установки на сеть горных выработок.

Для оптимизации режимов работы нескольких главных вентиляторных установок в вентиляционных сетях рудников выведена система уравнений позволяющая одновременно регулировать параметры работы ГВУ и вентиляционных сооружений. Подбор параметров главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений производится по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.

$$\begin{cases} \Delta n_m = C \cdot (k_{эфф.м} \cdot I_{jm} \cdot \Delta Q_j) - F \cdot \min_j \Delta S_j \\ \Delta S_n = D \cdot k_{эфф.н} \cdot I_{jn} \cdot \Delta Q_j \end{cases}, \quad (5)$$

где  $C, D, F$  — эмпирические параметры регулирования;  $n_m$  — частота вращения рабочего колеса  $m$ -й главной вентиляторной установки;  $k_{эфф.м(n)}$  — коэффициент, характеризующий эффективность регулирования воздухораспределения частотой вращения рабочего колеса одной из ГВУ с наименьшей потребляемой мощностью (с помощью вентиляционных сооружений);  $I_{jm} (jn)$  — матрица влияния, характеризующая влияние производительности  $m$ -той ГВУ ( $n$ -ого вентиляционного сооружения) на величину расхода воздуха в каждой  $j$ -той выработке;  $\Delta Q_j$  — ошибка управления расходами (отклонение фактических расходов от требуемых).

Разработанные и представленные в статье способы повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции (разработка детализированных моделей вентиляционных сетей, оптимизация режимов работы главных вентиляторных установок) позволяют учитывать взаимное влияние ГВУ и настраивать режимы их работы таким образом, чтобы каждая из них работала максимально эффективно на участки вентиляционной сети и не создавала помех для работы других главных вентиляторных установок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт / Л.А. Пучков, Л.А. Бахвалов. – М.: Недра, 1992. – 399 с.: ил.
2. Осинцева А.В. Оптимизация размещения регуляторов воздухораспределения в вентиляционной сети подземного рудника на основе анализа взаимосвязи параметров сети и применения генетического алгоритма: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.20 / Осинцева Анастасия Викторовна. – Апатиты, 2011. – 129 с.
3. Казаков Б.П. Повышение эффективности ресурсосберегающих систем вентиляции для подземных рудников / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Шалимов // Горн. журн. – 2014. – № 5. – С. 26-28.
4. Круглов Ю.В. Математическое моделирование работы оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников / Круглов Ю.В., Семин М.А., Зайцев А.В. // Изв. ТулГУ. Науки и Земле. – 2011. – № 2. – С. 116-126.
5. Гипроуголь — Вентиляция шахт [Официальный сайт]. URL: <http://www.giprougol.ru/technologies/software/ventsh> (дата обращения: 6.05.2016).
6. VumaSoftware [Официальный сайт]. URL: <http://www.vuma.co.za> (дата обращения: 29.02.2016).
7. Мальцев С.В. Разработка методики проведения экспериментальных исследований по определению аэродинамических сопротивлений стволов глубоких рудников / С.В. Мальцев, Б.П. Казаков // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования: материалы конф. – 2015. – Т. 1. – С. 271-278.
8. Казаков Б.П. Обоснование участков измерения аэродинамических параметров воздушного потока при определении аэродинамического сопротивления стволов / Казаков Б.П., Мальцев С.В., Семин М.А. // Горн. информ.-аналит. бюл.: «Промышленная безопасность минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». – 2015. – отд. вып. 7. – С. 69-75.
9. Мальцев С.В. Исследование факторов, влияющих на измерение аэродинамического сопротивления стволов глубоких рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 269-271.
10. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормициков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опубл. 20.02.2015. – 1 с.

А.В. ШАЛИМОВ  
Горный институт УрО РАН  
**СИСТЕМА ИНТЕРАКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ВОЗДУШНО-ДЕПРЕССИОННОЙ СЪЁМКИ РУДНИКОВ**

Организация проветривания современных горнодобывающих предприятий является многофакторной задачей, трудоёмкость решения которой обусловлена сложностью и динамичностью структуры сети горных выработок. Количество и протяжённость выработок меняется со временем по мере эксплуатации рудника, разрабатываются новые добычные участки, появляются новые выработки, закладывается выработанное пространство, возводятся вентиляционные перемычки. В результате меняется аэродинамическое сопротивление рудника, как в целом, так и частично – по горизонтам, рабочим панелям и отдельным выработкам. Знание этих изменений даёт возможность корректировать режимы работы источников тяги и вентиляционных устройств, обеспечивая подачу нормативного количества свежего воздуха на каждый из участков рудника [1]. Линейные сопротивления горных выработок определяются однозначно их типом и геометрическими размерами [2], однако на практике значительный вклад в потери давления вносят местные сопротивления, теоретическое определение которых, как правило, не представляется возможным. К их числу относятся, прежде всего, уменьшение или увеличение сечения выработок, вызванные наличием зон обрушения породы, горного оборудования и вентиляционных перемычек, а также, в меньшей степени, изгибами и сопряжениями выработок [3,4,5]. Поэтому регулярные плановые воздушно-депресссионные съёмки (ВДС) являются актуальными мероприятиями для получения достоверной информации о текущем аэродинамическом состоянии рудничной сети.

Проведение ВДС предполагает измерение расходов воздуха  $Q_j$ , м<sup>3</sup>/с и падений давления (напора, депрессии)  $\Delta P_j$ , Па во всех выработках рудника, по результатам которого определяются их аэродинамические сопротивления  $R_j = |\Delta P_j / Q_j^2|$ , кг/м<sup>7</sup>. Для определения всех сопротивлений сети, состоящей из  $n$  ветвей (выработок), необходимо знание  $2n$  величин:  $n$  значений расходов воздуха и  $n$  значений падений давления на каждой выработке. С учётом того, что граф сети связан первым и вторым законами сетей, отражающих законы сохранения массового расхода воздуха и энергии [6], количество необходимых для расчёта данных уменьшается в 2 раза с  $2n$  до  $n$ .

Сохранение массы воздуха постоянной плотности для рудничной сети, состоящей из  $n$  ветвей и  $k$  узлов, задаётся  $k-1$  уравнениями:

$$0 = \sum_j Q_j^{(i)}, \quad (1)$$

где  $i$ - номер узла (от 1 до  $k-1$ ),  $j$ - номера выработок, инцидентных узлу с номером  $i$ . Поскольку общее число уравнений должно быть равно числу неизвестных  $n$ , то оставшееся число уравнений в количестве  $m=n-(k-1)$  отвечают за сохранение энергии при движении воздуха по замкнутым контурам:

$$\sum_j \Delta \pi_j^{(s)} = \sum_j \Delta P_j^{(s)} = \sum_j (\pm R_j^{(s)}) Q_j^{(s)} |Q_j^{(s)}|, \quad (2)$$

где  $s$ - номер (от 1 до  $m$ ) уравнения (независимого контура),  $j$ - номера выработок, содержащихся в контуре с номером  $s$ ,  $\Delta \pi_j^{(s)}$ , Па - напор источника тяги в выработке с номером  $j$  контура с номером  $s$ ,  $\Delta P_j^{(s)}$ , Па - падение напора в выработке с номером  $j$  контура с номером  $s$ .

При известных значениях аэродинамических сопротивлений всех выработок и источников тяги система уравнений (1)-(2) однозначно определяет все расходы воздуха, поскольку решаются  $n$  независимых уравнений для  $n$  неизвестных величин. Обратная же задача оказывается математически некорректной, т.к. при заданных напорах источников тяги и расходах воздуха определить однозначно сопротивления ветвей невозможно. Действительно, при задании всех расходов уравнения (1) принимают вид тождественных равенств или неравенств в случае несоблюдения нулевого баланса в узлах, а оставшегося количества  $m$  контурных уравнений (2) оказывается недостаточным для определения  $n$  неизвестных сопротивлений. Причина такой некорректности в том, что нельзя задавать  $n$  расходов, поскольку только  $m$  из них независимы, т.к. есть  $k-1$  уравнений (1), их связывающих, а  $n-(k-1)=m$ . Таким образом, задание  $m$  расходов однозначно определяет все остальные  $k-1$ . В оставшихся  $m$  уравнениях (2) есть  $n$  неизвестных сопротивлений, значит,  $n-m$  из них должны быть заданы, т.е. должны быть известны  $n-m$  перепадов давлений, которые и являются необходимыми для решения обратной задачи данными. Из выше изложенного следует, что минимальное количество замеров ВДС для однозначного определения аэродинамических сопротивлений всех  $n$  выработок рудничной сети равно  $n$ , причём из них должно быть  $m$  замеров расходов и  $n-m$  замеров перепадов давлений.

Определение количества необходимых замеров ВДС не даёт информации о том, в каких выработках они должны быть проведены. Когда экспериментальных данных больше или меньше, чем нужно, возникает вопрос о том, какие данные должны быть взяты или дополнены для корректной постановки задачи определения сопротивлений. Если взять  $n$  данных ( $m$  расходов и  $n-m$  перепадов давлений) наугад в произвольной группе выработок, то, вероятнее всего, эти данные окажутся частично зависимыми, и потому задача решения иметь не будет. Выбор же совокупности независимых данных «на глаз» возможен лишь для очень простых вентиляционных сетей, состоящих из нескольких выработок. Следует заметить, что для любой вентиляционной сети существует множество групп независимых данных, причём каждая из них может иметь разные возможности для решения обратной задачи воздухораспределения конкретного рудника. При обработке результатов разумно исключать сомнительные и наименее достоверные избыточные данные. В связи с этим возникает необходимость разработки алгоритма поиска независимых подмножеств данных по заданной конфигурации рудничной сети. Алгоритм должен быть достаточно гибким, предусматривающим выбор среди этих подмножеств в интерактивном режиме с целью нахождения оптимального решения.

Возможность свободного перемещения по множеству групп ветвей рудничной сети с независимыми значениями расходов и падений напора реализована в алгоритме, работающем на базе графического интерфейса аналитического комплекса «АэроСеть» [7]. После активации системы обработки результатов ВДС каждая из  $n$  ветвей схемы рудничной сети становится доступной для выбора курсором. Изначально все ветви доступны для выбора и имеют чёрный цвет. В меню задаётся режим выбора группы выработок – независимых по расходам воздуха или независимых по падениям напора. Алгоритмы выбора в обоих режимах идентичны, разница заключается лишь в том, что в первом случае решается система узловых уравнений (1) относительно неизвестных расходов, а во втором случае – система контурных уравнений (2) относительно неизвестных падений напоров. Поэтому достаточно ограничиться изложением сути алгоритма только для первого режима.

Выбор курсором ветви с номером  $i$  означает задание расхода в выработке с данным номером. После этого действия алгоритм определяет, какие ветви могут быть выбраны далее, т.е. расходы в каких выработках могут быть заданы (измерены) после того, как зафиксирован расход в  $i$ -ой выработке. Очевидно, что по мере задания расходов в одних выработках, будут однозначно определяться расходы в других в соответствии с

системой (1), и расходы в этих выработках задавать будет уже нельзя. Выбранные ветви с заданным расходом выделяются красным цветом, ветви, в которых расход ещё можно задать, остаются чёрными. Ветви, для которых расход предопределён расходами ветвей красного цвета и узловыми уравнениями, отмечаются белым цветом и становятся не доступными для выбора.

В основу разработанного алгоритма положен метод Гаусса решения систем линейных уравнений. Однако форма его применения не стандартна, т.к. метод Гаусса (метод последовательного исключения переменных) используется для решения линейно-независимых систем уравнений. В данном случае метод используется для определения линейной зависимости системы уравнений, причём число уравнений в системе меньше, чем число неизвестных. Если уравнений меньше, чем переменных, но уравнения линейно-независимы, то применение метода исключения приводит к одному уравнению с избыточным числом переменных. Если же применить метод Гаусса для решения системы линейно-зависимых уравнений, то обязательно на каком-нибудь этапе исключения переменных должно возникнуть противоречие типа  $1=0$ , либо тождество типа  $0=0$ , что интерпретируется алгоритмом, как противоречие, и используется для определения зависимости ветвей по значениям расходов воздуха или падений напора. После выбора очередной ветви  $i$  чёрного цвета значение соответствующего расхода полагается равным нулю (хотя, величина задаваемого расхода значения не имеет), в результате чего подсистема (1) изменяется. Выбранная ветвь меняет цвет с чёрного на красный, а для каждой из оставшихся ветвей чёрного цвета применяется процедура поиска противоречия. Для этого значение расхода в каждой из этих ветвей поочередно полагается равным нулю, и ищется противоречие методом Гаусса. Если оно не найдено, то ветвь остаётся чёрной и доступной для дальнейшего выбора, если найдено – меняет цвет на белый и далее в выборе не участвует. Расход в такой ветви определён заданными расходами в ветвях красного цвета и в дальнейшем полагается равным нулю. Уравнения подсистемы (1), в которых не осталось неопределённых расходов, участвовать в расчёте прекращают, поэтому алгоритм работает с ускорением, сначала выбор происходит медленно, затем – быстрее.

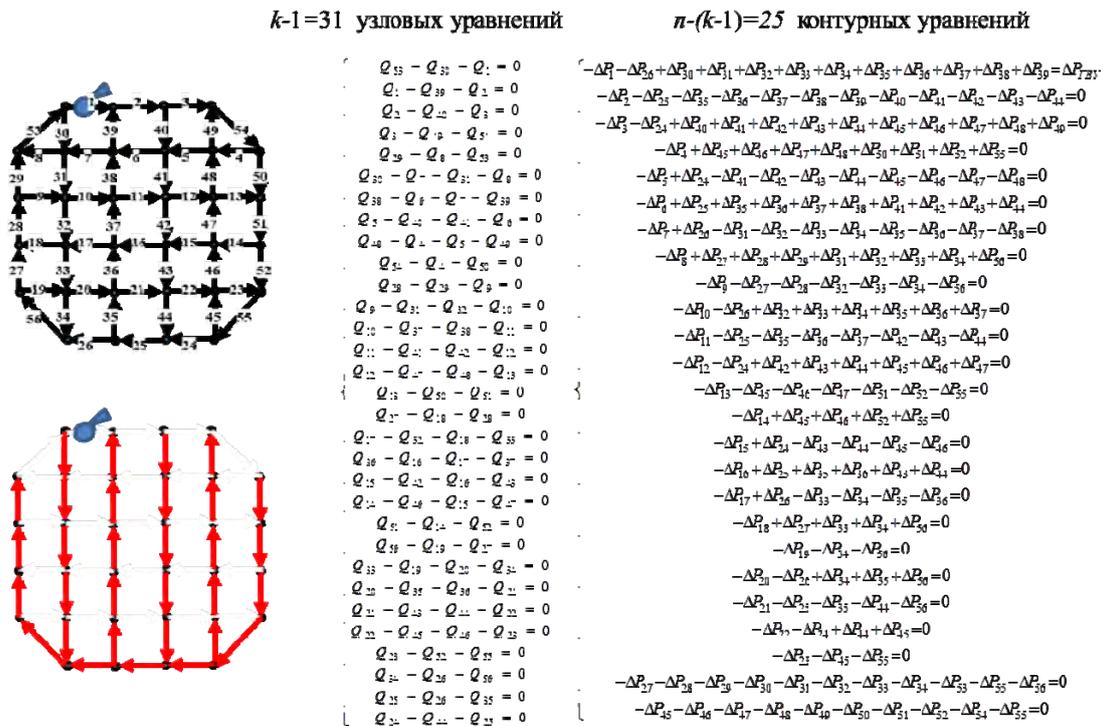


Рис. 1. Модельная сеть – 56 выработок ( $n$ ), 32 узла ( $k$ )

Изложенный способ выбора подмножества независимых ветвей рудничной сети не полон без возможности отмены выбора любой из ветвей красного цвета с независимо задаваемым значением расхода воздуха. Целью отмены является организация гибкого и быстрого поиска оптимальных вариантов из всей совокупности подмножеств. Для реализации этой функциональности алгоритма данные ветви остаются доступными для нажатия курсором, отменяющим выбор. Нажатие на красную ветвь возвращает ей чёрный цвет, и возвращает чёрный цвет всем ветвям белого цвета, расход в которых в текущей выборной конфигурации однозначно определялся узловыми уравнениями (1), они также становятся доступными для выбора. Процедура отмены работает аналогичным процедуре выбора образом. Для всех недоступных ветвей белого цвета применяется процедура поиска противоречия на предмет проверки того, осталось ли противоречие после отмены выбора ветви красного цвета. Если противоречие исчезло, ветвь снова становится доступной для выбора - чёрной, если нет – остаётся не доступной белой. Таким образом, реализуется удобный и быстрый способ перебора групп независимых выработок путём замены одной выработки на другую с целью выделения наиболее достоверных результатов для обработки уже проведённой ВДС.

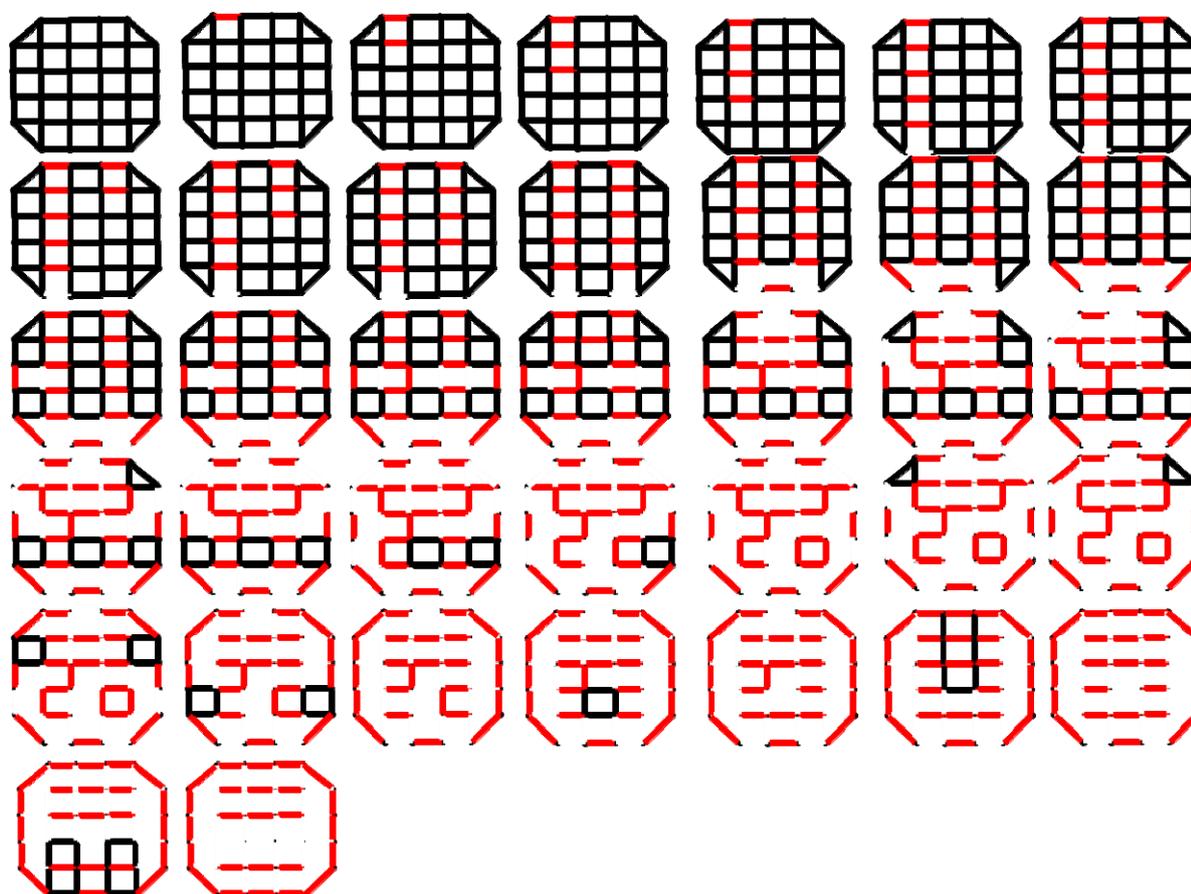


Рис. 2. Демонстрация работы алгоритма по выбору множества ветвей сети ( $n=56$ ), независимых по расходам воздуха ( $m=25$ )

Работа интерактивного алгоритма продемонстрирована на модельной сети, состоящей из 56 ветвей и 32 узлов. Система уравнений баланса расходов состоит из 31 уравнения в каждом узле, кроме одного любого, система контурных уравнений содержит 25 уравнений, строящихся по всем возможным замыканиям дерева сети, представ-

ляющего собой произвольное подмножество ветвей с независимыми значениями падений давления (рис. 1). На рис.2 приведён пример пошаговой работы алгоритма с демонстрацией исключения зависимых ветвей и отмены с выбором другого подмножества. Манипуляциями с подмножествами сети можно добиться исключения из расчёта ветвей с недостоверными или сомнительными замеренными данными. Сначала делается выбор групп ветвей, независимых по расходам воздуха, затем переход к другим группам путём отмены выбора отдельных ветвей и заменой их другими.

После выбора оптимального подмножества ветвей, независимых по расходам воздуха, аналогичным образом определяются ветви, независимые по потерям давления на них. Финальной стадией работы системы интерактивной обработки результатов ВДС является определение аэродинамических сопротивлений всех выработок рудничной сети. Исходными данными являются расходы воздуха и падения давления в выбранных подмножествах ветвей. Все остальные расходы и давления, даже если они фигурируют в замерах, полагаются неизвестными и определяются решением системы уравнений (1) – (2) обратным ходом методом Гаусса, после чего вычисляются сопротивления ветвей. В практике проведения ВДС бывает как избыток, так и дефицит замеренных данных. И если в первом случае избыточные данные исключаются по критерию наименьшей достоверности, то во втором случае они должны быть как-то дополнены. В основу способа такого дополнения, предложенного в работе [8], заложен принцип минимизации суммарных отклонений значений сопротивлений выработок от их проектных значений, определяемых по типам и геометрическим размерам. В случае недостаточного количества экспериментальных данных такой подход представляется наиболее рациональным для их получения и дальнейшего использования в расчётах.

В заключении следует отметить, что представленный в статье метод выбора множеств ветвей рудничной сети, независимых по расходам воздуха и падениям давления, реализованный численно в виде интерактивного расчётного модуля, позволяет минимизировать затраты труда и времени при проведении воздушно-депресссионных съёмов и обработке их результатов, а также увеличить точность определения аэродинамических сопротивлений горных выработок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 17-45-590973 «Разработка методов прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями прорывания горнодобывающих предприятий».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Вып. 78: утв. 11.12.2013, № 32935. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 276 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).

2. Мохирев Н.Н. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация / Н.Н. Мохирев, В.В. Радько. – М.: Недра, 2007. – 324 с.: ил.

3. Левин Л.Ю. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения / Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Р.Р. Газизуллин // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – № 9. – С. 200-205.

4. Харев А.А. Местные сопротивления шахтных вентиляционных сетей. – М.: Углетехиздат – 1954. – 248 с.: ил.

5. Казаков Б.П. Обоснование участков измерения аэродинамических параметров воздушного потока при определении аэродинамического сопротивления стволов /

Казаков Б.П., Мальцев С.В., Семин М.А. // Горн. информ.-аналит. бюл: «Промышленная безопасность минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». – 2015. – отд. вып. 7. – С. 69-75.

6. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей / Меренков А.П., Хасилев В.Я. – М.: Наука. – 1985. – 280 с.

7. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опублик. 20.02.2015. – 1 с.

8. Автоматизированная обработка данных воздушно-депресссионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников / Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В., Семин М.А. // Изв. вузов. Горн. журн. – 2016. – № 1. – С. 22-30.

УДК 622.45

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.77

Е.В. НАКАРЯКОВ

*Горный институт УрО РАН*

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕТРИВАНИЯ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ ПРИ ПОДЗЕМНОМ РАЗМЕЩЕНИИ ГЛАВНЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК**

При размещении главной вентиляторной установки (ГВУ) в надшахтных зданиях скиповых стволов калийных рудников имеют место значительные внешние утечки воздуха (от 33 % до 48 %). Это вызвано размещением в зданиях скиповых стволов подъемного оборудования, в частности подъемные канаты имеют выход в атмосферу, вследствие этого здание негерметично.

Имеется положительный опыт запуска подземных ГВУ, осуществляющих проветривание II калийного горизонта рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий», приведший к снижению внешних утечек воздуха до 4 %. Схема движения воздуха при подземном размещении ГВУ существенно не изменяется относительно схемы движения воздуха при поверхностном размещении. Однако, за счет изменения направления движения воздуха в местах загрузки и разгрузки скипов не понятен характер распространения пыли. Также, в зумпфовой части ствола часть исходящей струи воздуха попадает в воздухоподающие выработки, таким образом необходимо детально изучить аварийные режимы проветривания. При параллельном включении ГВУ необходимо предусмотреть варианты регулирования подачи воздуха [1, 2].

С целью наиболее энергоэффективного и безопасного проветривания рудников подземными ГВУ решаются следующие задачи:

1. Исследование пылевой обстановки в башенном копре и подземном комплексе загрузки скипов;
2. Моделирование распространения продуктов горения при возникновении пожара;
3. Разработка вариантов регулирования подачи требуемого количества воздуха.

При подземном размещении ГВУ воздушный поток в башенном копре движется снизу вверх. При этом за счет напора, развиваемого ГВУ, в здании наблюдается повышенное давление относительно атмосферного. При этом пыль, образующаяся при разгрузке скипа, «запирается» в бункере.



Рис. 1. Движение воздуха при подземном размещении ГВУ

Подземное размещение ГВУ обуславливает движение воздушных потоков на участке от камер взвешивающих конвейеров до зумпфа (рисунок 1). При этом пыль, образующаяся при загрузке скипа, подхватывается воздушным потоком и движется в бункер улавливания рудной мелочи, налипая на стенках бункера, не попадая в ствол. Описанное выше способствует снижению концентрации пыли в башенном копре до 10 раз (рисунок 2).

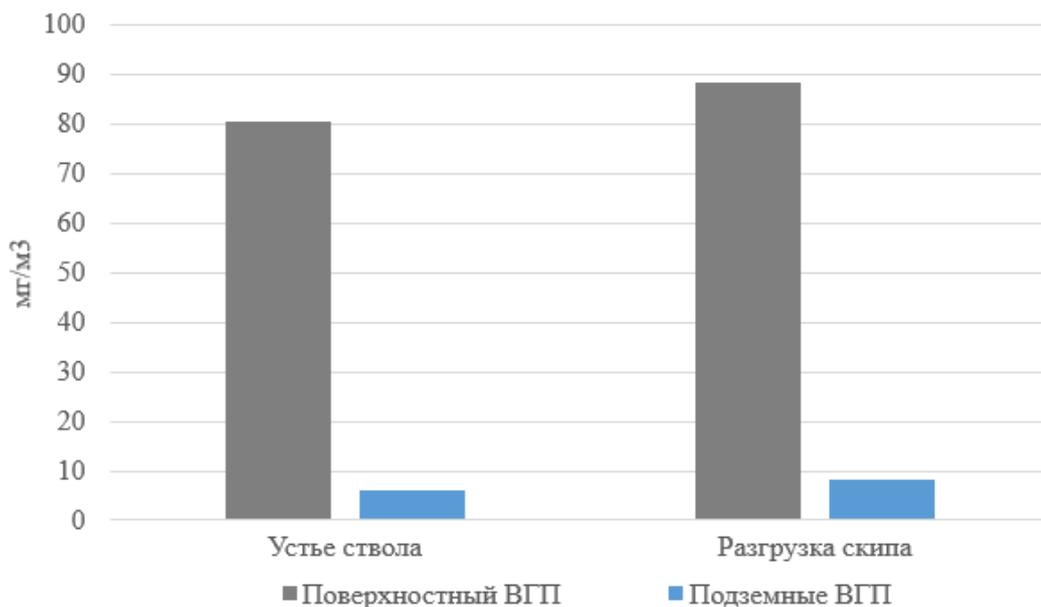


Рис. 2. Сравнение концентрации пыли в здании скипового ствола в зависимости от размещения ГВУ

Для предотвращения налипания пыли на стенках бункера улавливания рудной мелочи необходимо оснастить бункер вибровстряхивающим устройством.

В связи с тем, что часть исходящего воздуха через камеры взвешивающих конвейеров и уклон чистки зумпфа попадает в околоствольный двор (ОД) (рисунок 1) возможно попадание продуктов горения в главные воздухоподающие выработки.

Произведено моделирование распространения продуктов горения в динамике при обнаружении пожара в камерах подземных ГВУ (рисунок 3).

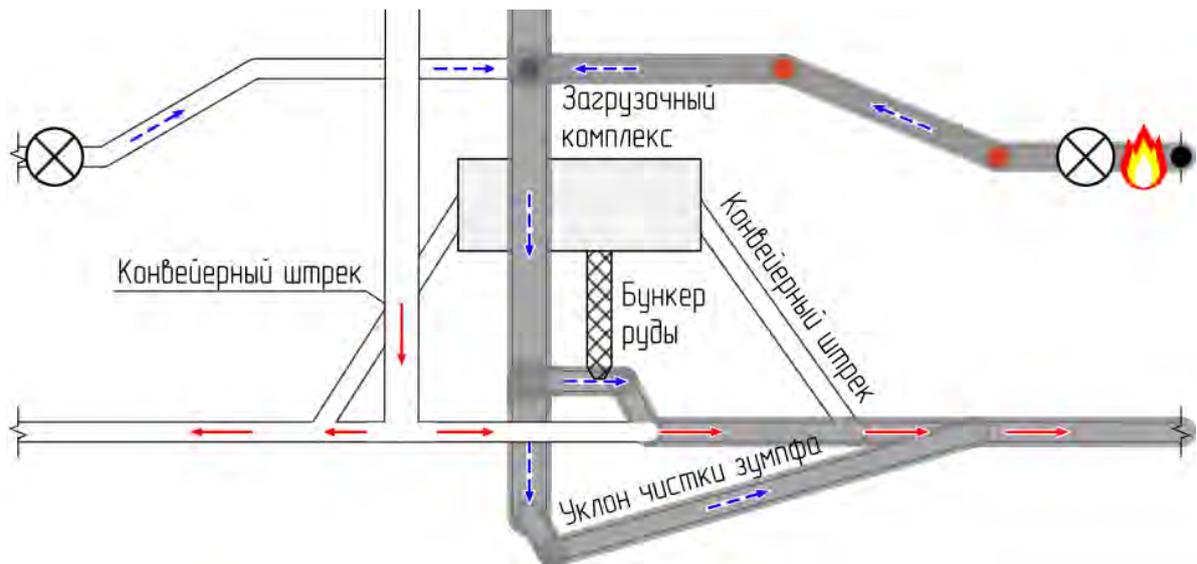


Рис. 3. Распространение дыма при проветривании подземными ГВУ

Из рисунка 3 видно, что при обнаружении пожара в камерах размещения подземных ГВУ продукты горения через выработки камер взвешивающих конвейеров и уклона чистки зумпфа попадают в воздухоподающие выработки. Такой сценарий развития аварийной ситуации не подразумевает реверсирования воздушной струи, таким образом возникает ситуация с отсутствием безопасного выхода горнорабочих, застигнутых данной аварией в выработках уклона чистки зумпфа и камер взвешивающих конвейеров. Более того, продукты горения, попав в воздухоподающие выработки, распространяются по вентиляционной сети, тем самым осуществляют загазование данных выработок, которые при данной аварийной ситуации являются аварийным выходом.

С целью исключения попадания продуктов горения в воздухоподающие выработки разработаны варианты изменения схемы проветривания выработок ОД, но они так или иначе не давали необходимого эффекта. Единственное техническое решение в условиях конкретного рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий» — это размещение датчиков обнаружения дыма и газа в камерах размещения подземных ГВУ и своевременный автоматизированный запуск поверхностного ГВУ. Зона распространения продуктов горения при данном мероприятии приведена на рисунке 4.

На руднике 4 РУ внедрена система автоматизированного управления проветриванием (САУП) [3, 4], позволяющая регулировать подачу воздуха в зависимости от режима проветривания. Можно прогнозировать явление срыва потока в случае работы одного из вентиляторов в режиме «останов» и другого — в режиме «рабочая смена». Описание срыва потока (работы вентилятора в зоне помпажа) и некоторые мероприятия по его предотвращению описаны в работе [1]. В работе [2] произведено сравнение энергоэффективности вариантов регулирования подачи воздуха:

- за счет изменения частоты вращения и/или угла установки лопаток рабочего колеса вентиляторов в составе подземных ГВУ [5];
- за счет изменения угла открытия автоматической вентиляционной двери (АВД), установленной на каждом из проветриваемых направлений параллельными подземными ГВУ [6].

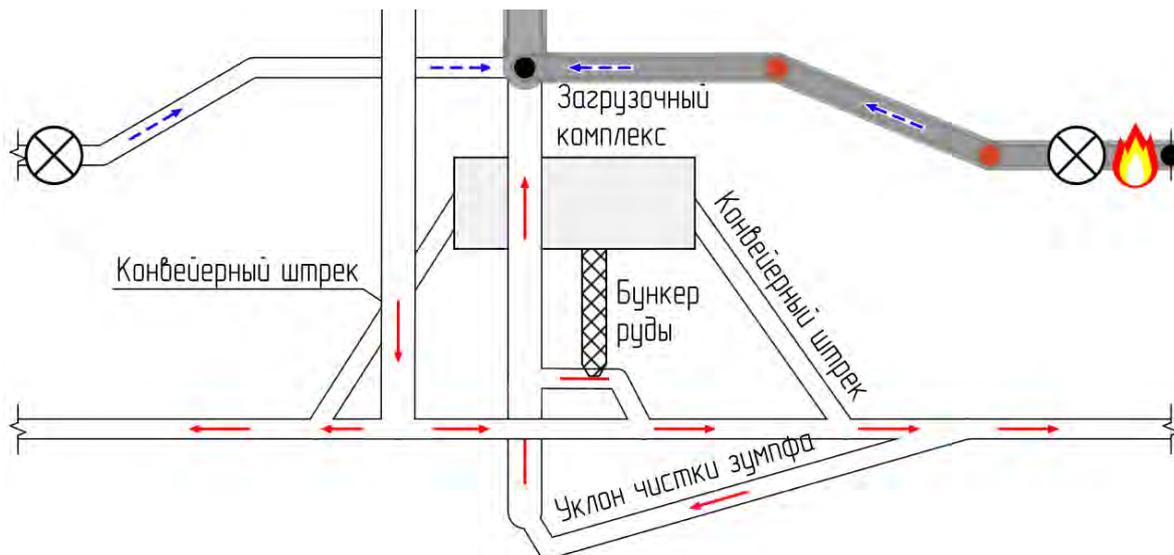


Рис. 4. Распространение дыма при задействовании поверхностной ГВУ

В результате сравнения сделан вывод, что энергопотребление при обоих вариантах управления проветриванием находится в диапазоне  $-18\%$  —  $+24\%$  от наименьшего энергопотребления при режиме «рабочая смена» – «рабочая смена». Однако, так как большую часть времени рудник работает в режиме «рабочая смена», выбран вариант управления проветриванием производительностью подземной ГВУ.

В результате исследования выявлены основные особенности проветривания рудников при подземном размещении ГВУ в вентиляционных выработках и выдаче исходящей струи воздуха по скиповому стволу. Данные особенности позволили сформулировать некоторые преимущества и недостатки данной схемы проветривания. Дальнейшая проработка позволила определить мероприятия и технические решения по предотвращению выявленных недостатков.

Преимущества:

1. Исключение внешних утечек воздуха через надшахтное здание башенного копра;
2. Существенное снижение концентрации пыли в здании башенного копра;
3. «Запирание» образующейся при загрузке скипов пыли в зумпфовой части ствола.

Недостатки:

1. Опасность попадания продуктов горения в воздухоподающие выработки через камеры взвешивающих конвейеров и уклон чистки зумпфа;
2. «Налипание» пыли на стенках бункера улавливания рудной мелочи;
3. Возможность попадания рабочей точки вентилятора в зону «помпажа» при изменении режима проветривания.

Технические решения:

1. Оперативное реагирование на датчики задымленности и автоматический запуск поверхностной ГВУ;
2. Оснащение бункера улавливания рудной мелочи вибровстряхивающим устройством;
3. Предварительное определение параметров работы вентиляторов при изменении режима проветривания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин Л.Ю. Обеспечение устойчивости автоматической работы параллельно установленных осевых вентиляторов / Л.Ю. Левин, Е.В. Накаряков, А.Г. Исаевич // Горное эхо. – 2016. – № 1 (62). – С. 29-35.
2. Накаряков Е.В. Обеспечение устойчивости работы параллельно установленных осевых вентиляторов в системе автоматического управления проветриванием / Е.В. Накаряков, Ю.А. Ключкин // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2017. – № 1. – С. 382-385.
3. Казаков Б.П. Способ оптимизации параметров работы нескольких главных вентиляторных установок для проектирования энергоэффективных режимов проветривания рудников сложной топологии / Казаков Б.П., Мальцев С.В., Семин М.А. // Изв. вузов. Горн. журн. – 2017. – № 1. – С. 101-108.
4. Круглов Ю.В. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии / Ю.В. Круглов, М.А. Семин // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2013. – № 9. – С. 106-115.
5. Круглов Ю.В. Основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников / Ю.В. Круглов, Л.Ю. Левин // Изв. ТулГУ. Науки и Земле. – 2010. – Вып. 2. – С. 104-109.
6. Круглов Ю.В. Математическое моделирование работы оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников / Круглов Ю.В., Семин М.А., Зайцев А.В. // Изв. ТулГУ. Науки и Земле. – 2011. – № 2. – С. 116-126.

УДК 622.4

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.78

Е.В. КОЛЕСОВ

*Горный институт УрО РАН*

### **ОБОСНОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ РАБОЧИХ ЗОН НЕСКОЛЬКИХ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК**

В условиях возрастания объема добычи полезных ископаемых горнодобывающими предприятиями увеличиваются глубина отработки и площадь шахтных полей. Вентиляционные сети рудников становятся более протяженными и разветвленными, усложняется доставка воздуха в удаленные рабочие зоны.

Согласно современным правилам безопасности, вентиляция шахт на рудных месторождениях должна быть организована таким образом, чтобы рабочие зоны проветривались обособленно, т.е. чтобы последовательное проветривание было исключено.

157. ...Вентиляция шахты должна быть организована так, чтобы пласты, горизонты, панели, блоки и камеры проветривались обособленно за счет общешахтной депрессии или вентиляторными установками, допущенными для этих целей [1].

245. Запрещается на шахтах последовательное проветривание рабочих мест (участков, блоков, камер, забоев) [1].

В действительности же опасность представляет не последовательное проветривание само по себе, а превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) ядовитых газов в воздухе, поэтому если в случае последовательного проветривания нескольких рабочих зон в воздушной струе не происходит накопление концентрации ядовитых газов выше ПДК, то последовательное проветривание является безопасным и экономически эффективным.

Для обоснования последовательного проветривания необходимо рассмотреть операции технологического цикла в тупиковой выработке, во время которых происходит максимальный выброс ядовитых газов в рудничную атмосферу. Это главным образом взрывание взрывчатых веществ (ВВ) и операции, связанные с работой техники с двигателями внутреннего сгорания (ДВС): отгрузка взорванной породы погрузочно-доставочными машинами и работа кровлеоборочной техники. На калийных рудниках дополнительно возникает проблема обеспыливания атмосферы рабочих зон добычных комбайновых комплексов в тупиковых выработках, где концентрация витающей пыли в зоне работы машиниста комбайна может достигать 500–1500 мг/м<sup>3</sup> воздуха при ПДК 5 мг/м<sup>3</sup>. В работе [2] представлены результаты численного трехмерного моделирования динамики и распределения пылевоздушной смеси при работе комбайна с барабанным исполнительным органом в тупиковых выработках калийных рудников, и рекомендован всасывающий способ местного проветривания (вентиляции), обеспечивающий безопасность работы персонала с использованием средств индивидуальной защиты от пыли – фильтрующих респираторов.

Классическая схема проветривания тупиковых выработок после взрыва ВВ следующая: свежий воздух нагнетается с помощью вентиляторов местного проветривания (ВМП) через вентиляционные трубопроводы обособленными струями к забою каждой тупиковой выработки (рис. 1). Следует отметить, что после взрыва образуется зона отброса газов, или зона смешения, с некоторой начальной концентрацией ядовитых газов, внутри которой происходит турбулентное перемешивание газо-воздушной смеси и постепенный вынос вредных примесей из тупиковых выработок.



Рис. 1. Схема обособленного проветривания двух тупиковых выработок после взрыва ВВ

Для определения динамики концентрации вредных примесей в зоне смешения В.Н. Ворониным предложена [3] и с различными модификациями до настоящего времени используется [4,5,6] простая балансовая модель, использующая понятие «коэффициент турбулентной диффузии струи»  $K_T$ , не совпадающее с общепринятым коэффициентом диффузии. Параметр  $K_T$  определяется как отношение средней концентрации примеси в сечении ядра постоянной массы струи к концентрации на границе струи. Для частично загазированных струй был определен соответствующий  $K_T$  модифицированный коэффициент  $K_{T1}$ :

$$K_{T_1} = K_T + (1 - K_T) \frac{C_0}{C_{cp}},$$

где  $C_0$  — концентрация примеси на оси струи в начальном ее сечении.

Для расчетов параметра  $K_T$  в зависимости от диаметра трубопровода и его удаленности от забоя предложены специальные таблицы [2], но на практике распространено использование эмпирических значений [5,7], лежащих в интервале от 0,2 до 1,0. Принимается, что  $c_k$  близко к средней по зоне смешения концентрации  $c$  [8].

Уравнение баланса массы вредной примеси в зоне смешения после взрыва и начальное условие имеют следующий вид:

$$\frac{dC(t)}{dt} + K_{T_1} \frac{Q_{ВМП}}{V_{зог}} C(t) = 0,$$

$$C(0) = C_0 = \frac{Ab}{V_{зог}},$$

где  $Q_{ВМП}$  — производительность вентилятора местного проветривания, м<sup>3</sup>/с;  $V_{зог}$  — объем зоны отброса газов, м<sup>3</sup>;  $A$  — расход ВВ на одно взрывание, кг;  $b$  — газовость ВВ, или объем газов, образующихся после взрыва 1 кг ВВ, л/кг.

Решение уравнения имеет экспоненциальный вид:

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{K_{T_1} Q_{ВМП} t}{V_{зог}}}.$$

Концентрация газов на выходе из зоны смешения  $K_{T1} C(t)$ .

Для верификации модели было проведено сопоставление модельных данных с результатами, полученными в ходе эксперимента по дегазации тупиковой выработки после взрыва ВВ, при этом коэффициент турбулентной диффузии  $K_T = 0,6$  был подобран таким образом, чтобы экспериментальные точки легли максимально близко к модельной кривой (рис. 2) [9]. Из графика видно, что модель достаточно хорошо описывает явление.

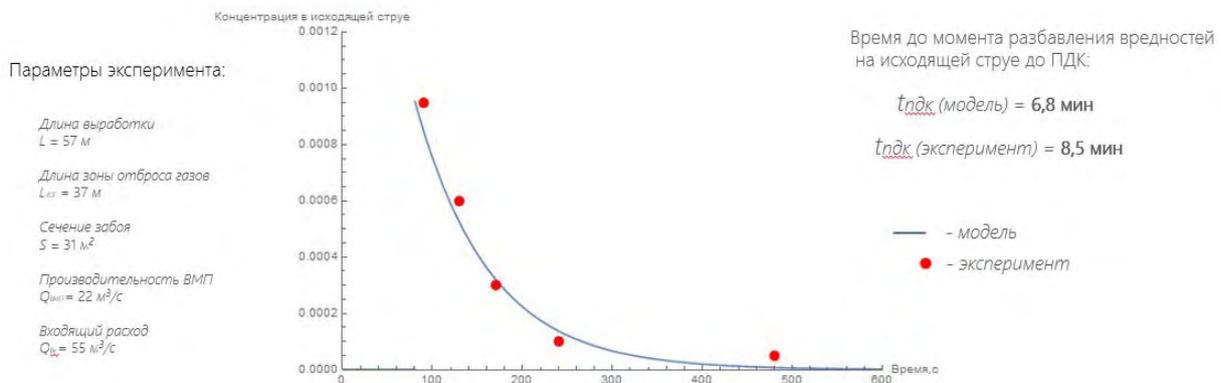


Рис. 2. Сопоставление модельных и экспериментальных данных

Для рудников ПАО «ГМК «Норильский никель» были приняты следующие параметры: расход ВВ на одно взрывание  $A = 160$  кг; газовость  $b = 22$  л/кг; сечение тупиковой выработки  $S = 20$  м<sup>2</sup>; длина зоны отброса газов согласно приближенной формуле А.И. Ксенофонтовой [10]  $L_{зог} = 15 + A/5 = 47$  м;  $K_T = 0,2$  (соответствует наихудшему перемешиванию в зоне отброса газов);  $Q_{ВМП} = 23,1$  м<sup>3</sup>/с; длина тупиковой выработки 500 м.

Первым этапом было проведено моделирование обособленного проветривания двух тупиковых выработок. Время проветривания до ПДК составило 25,2 минуты при входящем расходе  $Q_{ВХ} = 66$  м<sup>3</sup>/с.

Далее был уменьшен входящий расход свежего воздуха в 2 раза и проведено моделирование последовательного проветривания двух тупиковых выработок. Время проветривания до ПДК составило 34 минуты.

В случае организации последовательного проветривания трех тупиковых выработок одной входящей струей ( $Q_{ВХ} = 33$  м<sup>3</sup>/с) время проветривания всех выработок составило 42,9 минут.

Поскольку технологическим регламентом для рудников ПАО «ГМК «Норильский никель» предписывается проветривание рабочих зон после взрыва ВВ в течение 60 минут, то организация последовательного проветривания трех тупиковых выработок не приведет к нарушению данного регламента.

Далее следует рассмотреть возможность последовательного проветривания нескольких тупиковых выработок в случае работы машин с двигателями внутреннего сгорания. Принципиальная схема последовательного проветривания нескольких тупиковых выработок в случае работы машин с двигателями внутреннего сгорания изображена на рисунке 3, где  $g_{выхл}$  — количество выделяемых выхлопных газов, СО или NO<sub>2</sub>, м<sup>3</sup>/с;  $C_{двс}$  — концентрация соответствующего газа.

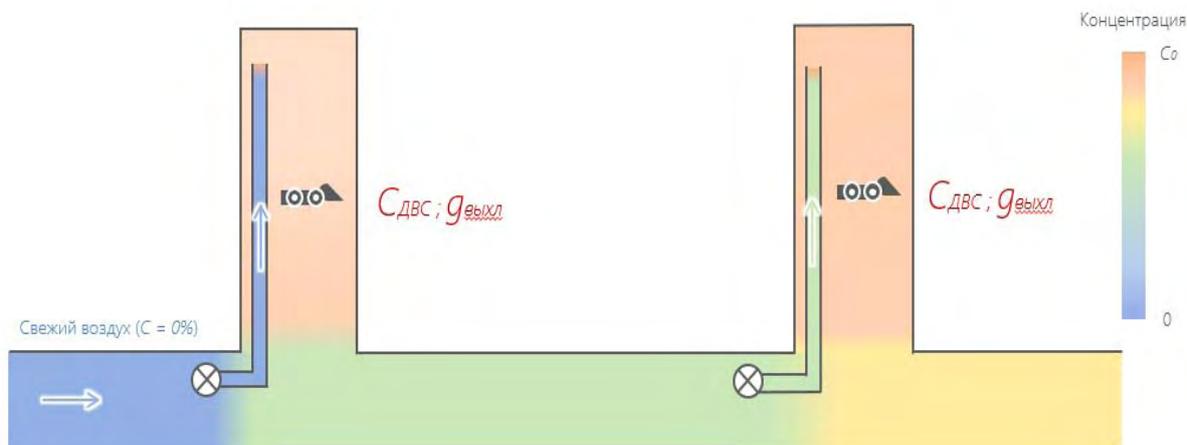


Рис. 3. Схема последовательного проветривания двух тупиковых выработок во время работы техники с двигателями внутреннего сгорания

Концентрация ядовитых газов на общей исходящей струе находится по следующей формуле:

$$C_{ij} = \frac{j \cdot C_{двс i} \cdot g_{выхл}}{Q_{вх}},$$

$$i = \{CO, NO_2\},$$

$$j = \{1, 2, 3 \dots \text{число тупиковых выработок}\}$$

В рудниках ПАО «ГМК «Норильский никель» в 2017 году был произведен отбор проб концентраций отработанных выхлопных газов работающей техники и было рассчитано, согласно модели, что для двигателей со стандартами токсичности Tier 3 (Stage III) и Tier 4 (Stage IV) концентрации ядовитых газов не превышают ПДК при последовательном проветривании 2 и 3 тупиковых выработок.

Таким образом, организация последовательного проветривания может существенно сократить издержки предприятий на вентиляцию путем сокращения подачи воздуха в рудник, а также обеспечивает технический резерв для увеличения объемов добычи полезного ископаемого. При этом, безусловно, для обоснования безопасности опасного производственного объекта при организации последовательного проветривания на каждом руднике следует провести серию экспериментов с целью уточнения аэродинамических параметров и верификации модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Вып. 78: утв. 11.12.2013, № 32935. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 276 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).
2. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов / Л.Ю. Левин, Исаевич А.Г., М.А. Семин, Р.Р. Газизуллин // Горн. журн. – 2015. – № 1. – С. 72-75.
3. Воронин В.Н. Основы рудничной аэро-газодинамики. – М.; Л.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.: ил.
4. Ушаков К.З. Рудничная аэрология / Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. – М.: Недра, 1978. – 440 с.: ил.
5. Справочник по рудничной вентиляции / под ред. К.З. Ушакова. – М.: Недра, 1977. – 328 с.: ил.
6. Соколов Э.М. Углекислый газ в угольных шахтах / Соколов Э.М., Качурин Н.М. – М.: Недра, 1987. – 142 с.: ил.
7. Клишкань А.Ф. Исследование метановыделения и разработка метода расчета проветривания подготовительных выработок шахт Донбасса при взрывном способе выемки угля: дис. ... канд. техн. наук. – Макеевка;Донбасс, 1968. – 130 с.
8. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 632 с.
9. Studying operational improvements in blast gas clearing using ventilation control / R. Carriere, C. McGuire, E. McLaren, D. Witow. // Proceedings of the 16<sup>th</sup> North American mine ventilation Symposium. –Colorado, USA, 2017. – 19.7- 19.16.
10. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 480 с.: ил.

А.В. КАШНИКОВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ  
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ**

Задача снижения операционных затрат горнодобывающих компаний не может считаться решенной без обеспечения эффективного проветривания подземных шахт и рудников, что было подтверждено многочисленными исследованиями [1,3].

Реализация систем автоматического управления проветриванием (САУП) [4], основанных на традиционном ПИД-регулировании, выявила ряд существенных недостатков такого подхода. Среди них можно выделить следующие:

1. Нелинейная зависимость скорости воздуха на регуляторе от угла его открытия.

Проведенные замеры показали, что характер изменения аэродинамического сопротивления регулятора от степени открытия его створок существенно отличается на малых и больших углах (рис.1).

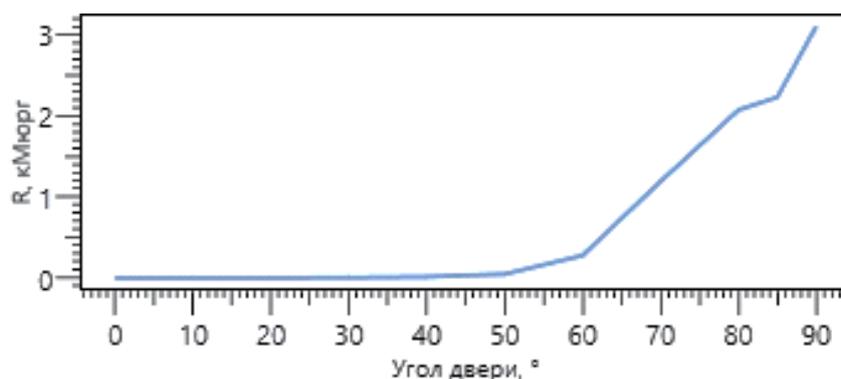


Рис. 1. Зависимость аэродинамического сопротивления регулятора от угла открытия створок

2. Значительное изменение заданных расходов воздуха на регуляторах (т.е. существенное перераспределение воздуха по шахте) может перевести отдельные регуляторы в неустойчивое состояние.
3. Постоянная изменчивость вентиляционной сети, вызванная непрерывными горными работами, обуславливает необходимость периодической коррекции коэффициентов в системе управления [2].

В качестве инструмента для решения данных проблем было решено разработать алгоритмы управления на основе нечеткой логики, поскольку они позволяют учесть нелинейность систем (при отсутствии формального математического описания зависимости вход-выход), а также могут быть адаптированы в процессе их функционирования [5].

Элементами системы автоматического управления проветриванием являются вентиляторы главного проветривания и регуляторы (автоматические вентиляционные двери) [6 – 8]. Входные и выходные параметры элементов САУП изображены на рис. 2.

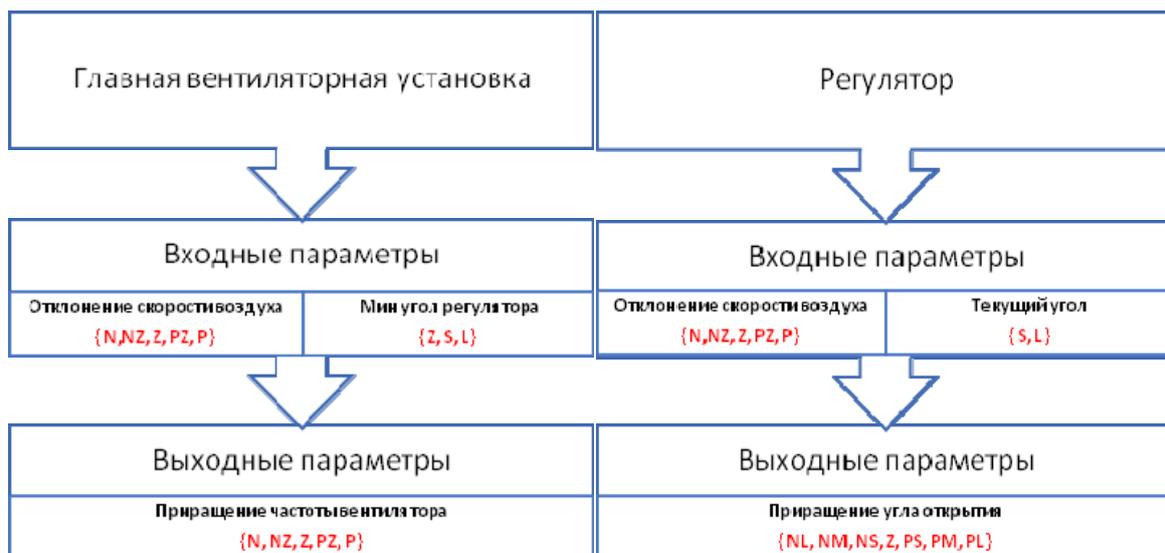


Рис. 2. Описание параметров элементов системы управления

Обозначения N\*, P\* соответствуют значениям «отрицательное» и «положительное», обозначения \*Z, \*S, \*M, \*L соответствуют значениям «близкое к нулю» / «нулевое», «малое», «среднее», «большое». Например, обозначение PM соответствует терму «положительное среднее».

Функции принадлежности различных термов для переменной «Отклонение скорости воздуха» приведены на рис.3.

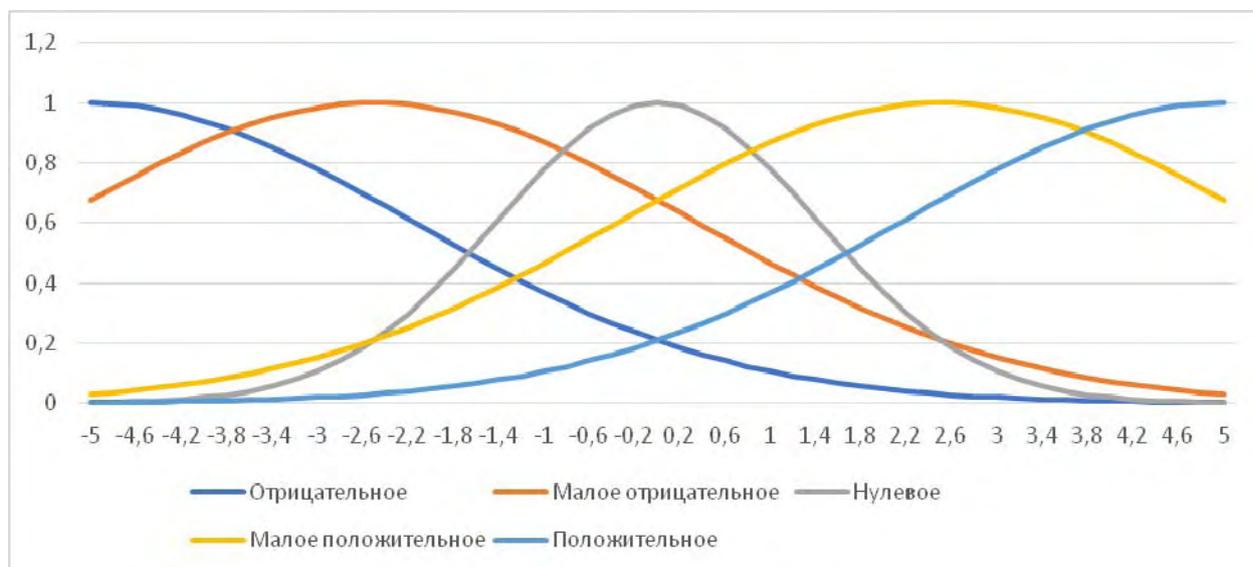


Рис. 3. Функции принадлежности нечетких множеств для переменной «Отклонение скорости воздуха»

На рис. 4 продемонстрирован фрагмент базы правил для элементов системы управления. На пересечении строки и столбца указано значение выходного параметра в случае, если входные переменные приняли значения, которым соответствуют выбранный столбец и строка. Например, первое правило в первой таблице формулируется следующим образом:

**ЕСЛИ**

Отклонение скорости воздуха=Отрицательное

**И**

Минимальный угол открытия=Нулевой

**ТО**

Приращение частоты вращения=Положительное

	<b>N</b>	<b>NZ</b>	<b>Z</b>	<b>PZ</b>	<b>P</b>
<b>S</b>	NL	NM	Z	PM	PL

	<b>N</b>	<b>NZ</b>	<b>Z</b>	<b>PZ</b>	<b>P</b>
<b>Z</b>	P	PZ	Z	NZ	N

Рис. 4. Фрагмент базы правил для нечеткого вывода:  
слева – таблица для вентилятора, справа – таблица для регулятора

Для вычисления степени истинности правила используется операция умножения значений функций принадлежности для входящих в antecedent правила переменных.

Результирующее значение выходного сигнала рассчитывается по формуле:

$$y = \frac{\sum_k y_k \cdot \mu(y_k)}{\sum_k \mu(y_k)}$$

где  $y_k$  – правило из базы правил, а  $\mu(y_k)$  – вычисленная степень его истинности.

В результате имитационного моделирования алгоритмов ПИД-регулирования и нечеткого регулирования были полученные следующие результаты (рис. 5, 6):

1. При значительном перераспределении требуемого расхода воздуха по регуляторам система под управлением нечеткого алгоритма остается устойчивой, в то время как в ПИД-регулируемой системе начинается колебательный процесс и требуется перенастройка коэффициентов.
2. Амплитуда колебаний выходного параметра до выхода на заданный уровень у нечеткого регулятора меньше, чем у ПИД-регулятора.
3. Скорость сходимости приблизительно одинаковая у обоих алгоритмов.

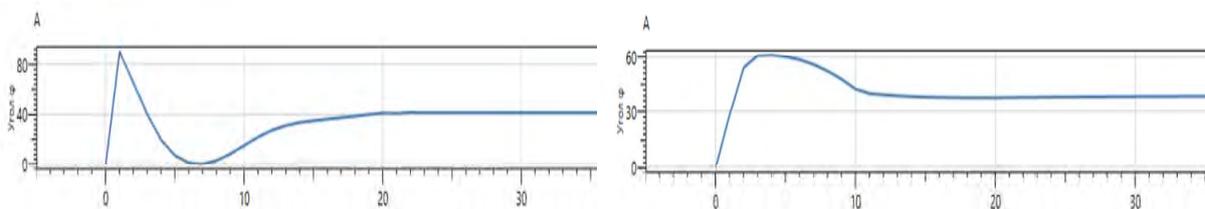


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования работы ПИД-алгоритма и нечеткого алгоритма для регулятора после настройки ПИД-алгоритма для заданного воздухораспределения

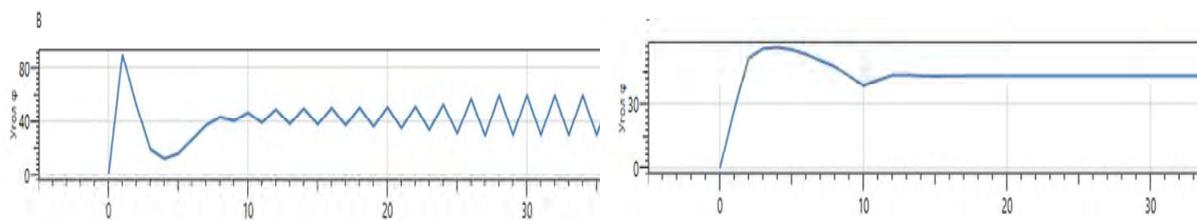


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования работы ПИД-алгоритма и нечеткого алгоритма для регулятора после значительного изменения требуемых расходов воздуха

Дальнейшее направление исследований состоит в разработке алгоритмов автокоррекции системы в процессе ее эксплуатации на основе данных о ее работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hardcastle S. Strategic mine ventilation control: a source of potential energy savings / Hardcastle S., Kocsis C., Lacroix R. // *Proceedings of Montreal Energy & Mines*. – Montreal, 2007. – P. 255-263.
2. Kashnikov A.V. Applying machine learning techniques to mine ventilation control systems / Kashnikov A.V., Levin L. // *Proceedings of 2017 20<sup>th</sup> IEEE International conference on Soft Computing and Measurements SCM'2017*. – 2017. – P. 391-393. – DOI: 10.1109/SCM.2017.7970595
3. Кашников А.В. Динамический расчет количества воздуха в условиях применения систем автоматического управления проветриванием рудников // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН*. – Пермь, 2016. – С. 259-260.
4. Круглов Ю.В. Основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников / Ю.В. Круглов, Л.Ю. Левин // *Изв. ТулГУ. Науки и Земле*. – 2010. – Вып. 2. – С. 104-109.
5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.; пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
6. Круглов Ю.В. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии / Ю.В. Круглов, М.А. Семин // *Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2013. – № 9. – С. 106-115.
7. Казаков Б.П. Способ оптимизации параметров работы нескольких главных вентиляторных установок для проектирования энергоэффективных режимов проветривания рудников сложной топологии / Казаков Б.П., Мальцев С.В., Семин М.А. // *Изв. вузов. Горн. журн.* – 2017. – № 1. – С. 101-108.
8. Казаков Б.П. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников сложной топологии / Б.П. Казаков, С.В. Мальцев, М.А. Семин // *Горн. информ.-аналит. бюл.: «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке»*. Т. 1. – 2017. – № 4, спец. вып. 5-1. – С. 51-58.

С.С. АНДРЕЙКО  
*Горный институт УрО РАН*  
**ПРОБЛЕМА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ  
ПРИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ СЛОЕВОЙ ВЫЕМКИ  
ТРЕТЬЕГО КАЛИЙНОГО ПЛАСТА В УСЛОВИЯХ  
СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ**

*«Если существует два способа  
сделать что-либо, один из которых  
ведет к катастрофе, то кто-нибудь  
изберет именно этот способ»*

*Закон Мерфи*

Газодинамические явления в рудниках ОАО «Беларуськалий», сопровождающиеся гибелью шахтеров, не происходили с сентября 1983 года, т.е. практически 35 лет. Как показывает практика ведения горных работ на пластах, опасных по газодинамическим явлениям, в настоящее время на Старобинском месторождении калийных солей решена значительная часть вопросов, связанных с предотвращением внезапных газодинамических явлений (ГДЯ). Разработаны и внедрены эффективные методы контроля предупредительных признаков и предвестников ГДЯ, а также эффективные способы предотвращения известных видов газодинамических явлений [1-10]. Исследования природы, механизма, разработку теории газодинамических явлений и методов борьбы с новыми их видами продолжаются и в настоящее время [12-18]. Однако, практика ведения горных работ на Третьем калийном пласте в условиях рудников ОАО «Беларуськалий» в 2018 году показала, что проблема ГДЯ далека еще от своего окончательного решения и самое пристальное внимание следует уделить влиянию человеческого фактора на опасность проявления газодинамических явлений различного вида.

На руднике 3 РУ ОАО «Беларуськалий» 9 марта 2018 года на подземном горном участке № 10 при выполнении комплексом ПКС-8 № 4 зарубки на технологическую сбойку № 22-б западного столба горизонта -620 м произошел внезапный выброс соли и газа. Интенсивность внезапного выброса соли и газа составила порядка 600 м<sup>3</sup> горной массы. Проходческий комбайн и самоходный вагон оказались полностью засыпаны выброшенной породой. Машинист горных выемочных машин М. Иванов 1973 года рождения и горнорабочий очистного забоя Д. Вальков 1985 года рождения погибли.

На данном участке шахтного поля проводились испытания новой для рудников ОАО «Беларуськалий» технологической схемы выемки 4 сильвинитового слоя III калийного горизонта через длительный (не менее 25 лет) промежуток времени после его подработки лавой по слоям 2, 2-3 и 3 (рисунок 1). На шахтных полях калийных рудников ОАО «Беларуськалий» имеются участки Третьего калийного пласта на III калийном горизонте, которые из-за сложных геологических условий или ограничений на вынимаемую мощность по фактору водозащитной толщи были отработаны только по слоям 2, 2-3 и 3, а 4 сильвинитовый слой был временно законсервирован. В настоящее время на основании результатов специальных исследований, проведенных УП «Институт горного дела» г. Солигорск (д.т.н. В.А. Губанов, д.т.н. Б.И. Петровский, к.т.н. А.Л. Поляков и др.), доказана возможность проведения и поддержания в безопасном состоянии подготовительных выработок для выемки подработанного 25-30 лет назад 4 сильвинитового слоя и списанных запасов в охранных междустолбовых целиках [11]. Техноло-

гия такой выемки подработанных запасов определяется правильным выбором мест заложения и привязки к пласту подготовительных выработок выемочного столба, который обеспечивает их устойчивость в течение всего периода эксплуатации в конкретных горнотехнических условиях ведения горных работ. На рисунке 2 приведен пример технологической выемки 4 сильвинитового слоя лавой № 11-3 на 22-а западной панели III калийного горизонта (–620 м) рудника 3 РУ после его подработки более 30 лет назад лавой № 7 по слоям 2, 2-3 и 3 Третьего калийного пласта. Как видно из рисунка 1 подготовка 22-а панели для отработки лавой № 11-3 осуществлена проведением пяти выработок: панельного вентиляционного штрека 12 и штреков лавы – конвейерного 6, вентиляционного 7, транспортного 8, вспомогательного вентиляционного 9. В первую очередь одним ходом комбайна ПКС-8 проходятся конвейерный 6 и транспортный штрек 8 под выработанным пространством смежной лавы № 35 (в зоне разгрузки) с оставлением в кровле до 0,3 м 3 сильвинитового слоя. Такое расположение конвейерного и транспортного штреков позволяет очистным забоем лавы № 11-3 кроме 4 сильвинитового слоя производить выемку запасов слоев 2, 2-3 и 3 в межпанельном целике. После расширения конвейерного штрека до 3,8 м осуществляется проходка вентиляционного штрека 7 и вспомогательного вентиляционного штрека 9 с использованием технологических сбоек 18. Вентиляционный штрек шириной 3,0 м располагается в разрушенном и спрессованном целике между конвейерным штреком 10 на 22-й западной панели и конвейерным штреком 1 лавы № 7 и используется в качестве запасного выхода, а вспомогательный вентиляционный штрек располагается в межпанельном целике на расстоянии 5,0 м от разгружающего штрека 4 лавы № 7. Панельный вентиляционный штрек 12 пройден в целике между выемочными столбами лав № 6 и № 7. Примерно по такой же схеме велась подготовка выемочного столба лавы № 11-4, где произошел внезапный выброс соли и газа.

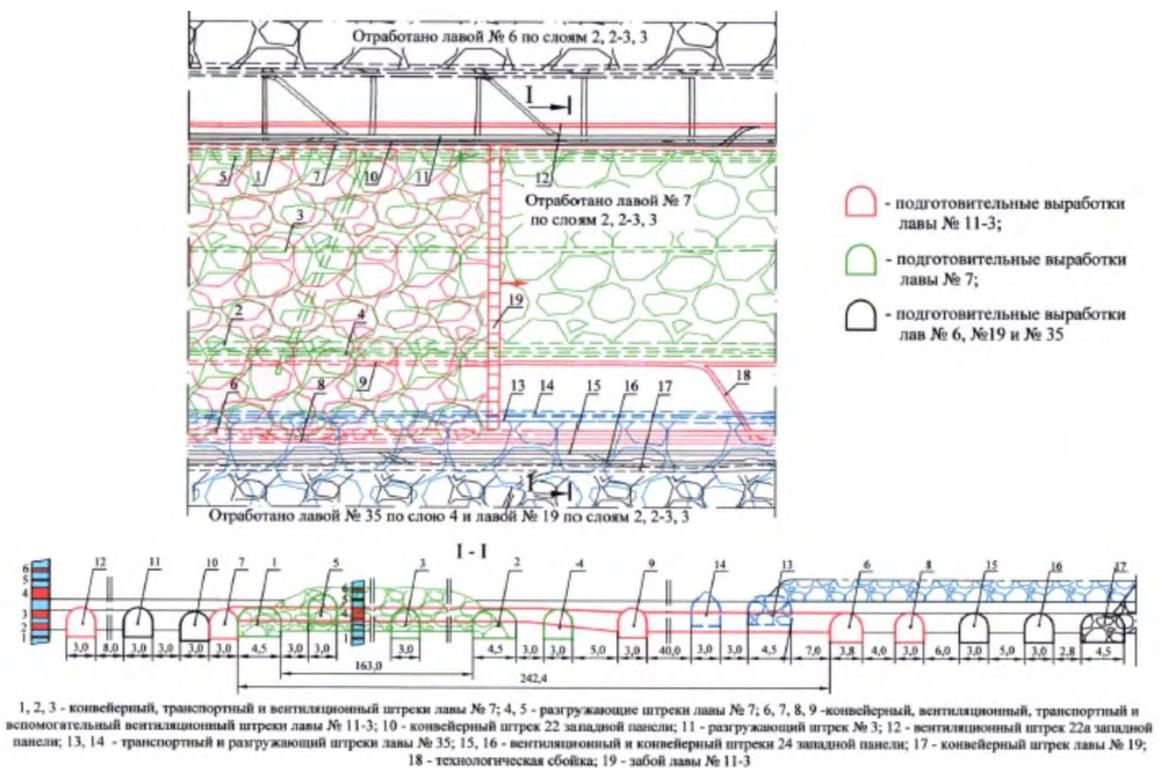


Рис. 1. Пример технологической схемы выемки 4 сильвинитового слоя III калийного горизонта через длительный (не менее 25 лет) промежуток времени после его подработки лавой по слоям 2, 2-3 и 3 [11]

В настоящее время горные работы в рудниках ОАО «Беларуськалий» на пластах, опасных по газодинамическим явлениям, ведутся в соответствии с требованиями «Инструкции по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по газодинамическим явлениям. – Солигорск-Пермь: 2017.–93 с.», далее по тексту «Инструкции...». Обследование места внезапного выброса соли и газа на сопряжении конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5 показало, что в выработке отсутствуют предупредительные признаки выброса соли и газа, такие как: погружение слоев под углом от 15° до 30°; полное замещение продуктивных слоев или их частичное замещение каменной солью более чем на 50 %; постепенное утончение верхних сильвинитовых прослоек по 3 слою; появление в кровле выработки трещин разрыва (трещин, «опеоряющих» «мульду погружения»), ориентированных по касательной относительно контура выбросоопасной зоны.

В тоже время сегодня нельзя дать однозначного ответа на вопрос о присутствии в выработке предвестников выброса соли и газа. Достоверно можно сказать, что в выработке отсутствовала только часть предвестников выброса соли и газа, таких как: погружение слоев под углом 30° и более; полное или частичное замещение продуктивных слоев глинисто-карналлитовыми породами; появление 4 сильвинитового слоя на стенках или в забое горной выработки. Была ли в выработке другая часть предвестников в виде потрескивания массива и отскакивание кусочков породы, резкого увеличения газовыделения в выработку и развивающегося прогиба пород кровли, с образованием зияющих (открытых) трещин, сейчас установить невозможно, т.к. люди, которые могли зафиксировать эти предвестники, находясь в момент выброса в выработке, погибли.

Отдельно следует остановиться применяемых в данной выработке параметрах профилактических мероприятий по предотвращению газодинамических явлений из кровли выработки. В соответствии с требованиями п. 5.1.1.1 «Инструкции...» при проходке подготовительных (капитальных, разведочных) и очистных выработок (за исключением лав) на III калийном горизонте, должно применяться бурение шпуров в кровлю этих выработок: мелкошпуровое профилактическое бурение дегазационных шпуров и профилактическое бурение глубоких дегазационных шпуров (глубокое профилактическое бурение). Бурение дегазационных шпуров проводится с целью снижения давления свободных газов в породах кровли выработок. В связи с тем, что кровля выработки располагалась ниже 4 сильвинитового слоя, то при проходке конвейерного штрека лавы № 11-4 в соответствии с требованиями п. 5.1.1.3 «Инструкции...» должны были применяться следующие параметры мелкошпурового профилактического бурения: в кровлю бурятся шпуры глубиной не менее 1,2 м, с шагом не более чем через 2,5 м вдоль выработки по мере проходки. Бурение осуществляется по оси выработки или с любой стороны от нее. Здесь особо следует отметить тот момент, что шпуры профилактического бурения должны буриться сразу по мере проходки, а не потом, когда выработка пройдена. Обследование конвейерного штрека лавы № 11-4 показало, что все шпуры мелкошпурового профилактического бурения в выработке пробурены по центру выработки вертикально и в замковой части. На рисунке 2 показано расположение буровой установки на комбайне ПКС-8.

Как видно из рисунка 2 расположение буровой установки на комбайне ПКС-8 по мере проходки выработки позволяет бурить шпуры мелкошпурового профилактического бурения только с левой стороны по направлению проходки выработки под углом. Расположение вертикальных шпуров мелкошпурового профилактического бурения по центру выработки однозначно свидетельствует о бурении шпуров после проходки выработки, возможно поинтервального бурения.



Рис. 2. Расположение буровой установки на комбайне ПКС-8

Таким образом, уже на стадии проходки конвейерного штрека лавы № 11-4 имело место нарушение требований п. 5.1.1.3 «Инструкции...» в части мелкошпурового профилактического бурения сразу по мере проходки выработки. В соответствии с требованиями п. 5.1.1.4 «Инструкции...» бурение глубоких дегазационных шпуров осуществляется во всех выработках, ширина которых 4,5 м и более. При этом в данной ситуации должны были применяться следующие параметры глубокого профилактического бурения: глубина шпуров 6,0 м; шаг бурения – не более 6,0 м. Схема места внезапного выброса соли и газа представлена на рисунке 3, где красными точками показаны предполагаемые шпуры глубокого профилактического бурения.

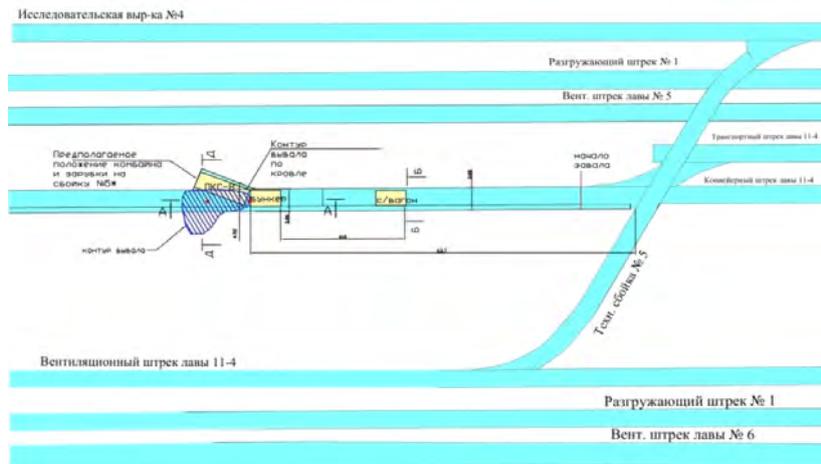


Рис. 3. Выкопировка из плана горных работ места внезапного выброса соли и газа с предполагаемым расположением глубоких дегазационных шпуров на сопряжении конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5 (рудник 3 РУ, выемочный столб лавы № 11-4, III калийный горизонт)

На рисунке 4 представлено предполагаемое расположение глубоких дегазационных шпуров на сопряжении конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5 относительно полости внезапного выброса соли и газа.

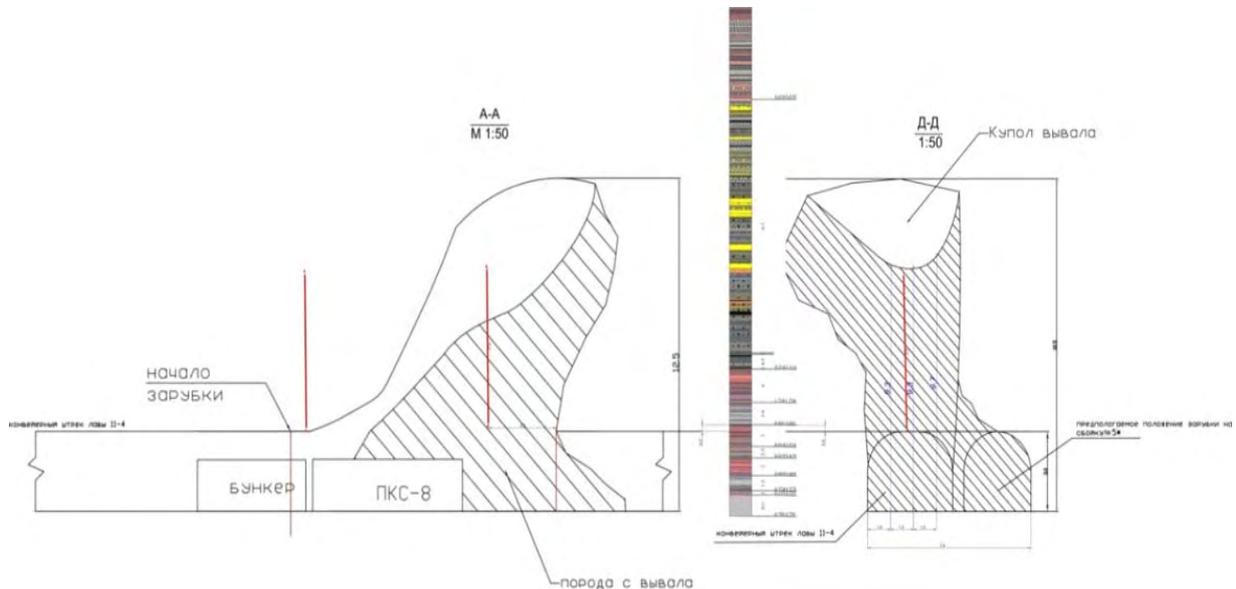


Рис. 4. Предполагаемое расположение глубоких дегазационных шпуров на сопряжении конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5 относительно полости внезапного выброса соли и газа

Как видно из рисунка 4 в месте сопряжения конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5 в соответствии с требованиями п. 5.1.1.4 «Инструкции...» должно быть пробурено два глубоких дегазационных шпура. При обследовании места внезапного выброса соли и газа первый глубокий дегазационный шпур по направлению проходки не обнаружен. Можно предположить, что этот шпур намеревались пробурить после предварительного расширения выработки до 0,7 м. Однако и в этом случае часть шпура была бы видна на обнажении пород в полости внезапного выброса соли и газа. Следовательно, с большой долей вероятности, можно предполагать отсутствие первого глубокого дегазационного шпура по направлению проходки сопряжения конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5. Из рисунка 4 также видно, что второй глубокий дегазационный шпур по направлению проходки сопряжения пространственно располагается в полости внезапного выброса соли и газа. Как показывает практика ведения горных работ на пластах, опасных по газодинамическим явлениям на рудниках ОАО «Беларуськалий», при наличии этого шпура в процессе его бурения должны были вскрываться и пересекаться в мульде погружения наиболее газоносные породы глинисто-карналлитовой пачки. В таком случае процесс бурения второго глубокого дегазационного шпура должен был бы сопровождаться как минимум интенсивным газовыделением, а также выбросом бурового штыба, зажатием буровых штанг и т.д. В соответствии с п. 3.8 «Инструкции...» резкое увеличение газовыделения в выработку уже является предвестником выброса соли и газа. Далее в соответствии с п. 4.2 «Инструкции...» рабочие должны были немедленно прекратить работу, удалиться в безопасное место. Доказать наличие или отсутствие бурения второго глубокого дегазационного шпура на сопряжении конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5 в настоящее время практически невозможно, т.к. его

предполагаемое местоложение находится в полости внезапного выброса породы и газа в области разрушенных соляных пород. Соляные породы в полости внезапного выброса соли и газ мелко раздроблены, поэтому при разборке завала следы этого шпура в кусках породы вряд ли будут обнаружены. В тоже время косвенные признаки (нарушение параметров мелкошпурового профилактического бурения, отсутствие первого глубокого дегазационного шпура, пересечение при его наличии вторым глубоким дегазационным шпуром газоносных пород глинисто-карбонатной пачки в мульде погружения с последующим интенсивным газовыделением) позволяют предполагать отсутствие первого и второго глубоких дегазационных шпуров на сопряжении конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5, что является нарушением требований п. 5.1.1.4 «Инструкции...».

Человеческий фактор часто становится официальным объяснением причин того или иного происшествия, аварии или катастрофы. Известно, что значительная доля опасностей в техногенной сфере возникает по вине человека. С ним связано свыше 60% аварий на объектах с повышенным риском, к которым относятся и рудники. В данной ситуации под «человеческим фактором» будем понимать возможность того, что при проходке сопряжения конвейерного штрека лавы № 11-4 с технологической сбойкой № 5 машинистом горновыемочной машины – комбайна ПКС-8 было принято неверное решение о бурении глубоких дегазационных шпуров после разделки сопряжения, что является нарушением требований п. 5.1.1.4 «Инструкции...» и которое, с большой долей вероятности, повлекло за собой воздействие поражающих факторов внезапного выброса соли и газа на шахтеров со смертельным исходом.

Человеческая личность – это до сих пор достаточно загадочное и многогранное явление, поэтому предсказать поведение конкретного человека в той или иной ситуации со стопроцентной уверенностью практически невозможно. Существующий уровень развития технологии подземной разработки не позволяет полностью исключить человека из процесса принятия решений, следовательно, при ведении горных работ на пластах, опасных по ГДЯ, остается только надеяться на уровень подготовки шахтеров и следованию требованиям «Инструкции...». Для повышения уровня подготовки лиц горного надзора участков и шахтеров можно рекомендовать следующие мероприятия:

1. Провести дополнительное обучение горных мастеров и горнорабочих забойной группы предупредительным признакам и предвестникам ГДЯ, а также особенностям ведения подготовительных горных работ при реализации технологической схемы выемки 4 сильвинитового слоя III калийного горизонта через длительный (более 25 лет) промежуток времени после подработки лавой по слоям 2, 2-3 и 3 Третьего пласта.

2. Подготовить для горных участков (мастеров, рабочих забойной группы) сборник схем (иллюстраций) с примерами геологического строения слоев 2, 2-3 и 3 Третьего калийного пласта при наличии предупредительных признаков внезапного выброса соли и газа и периодически два раза в год осуществлять тестирование по схемам;

3. При ведении подготовительных горных работ в межпанельных целиках при реализации технологической схемы выемки 4 сильвинитового слоя Третьего калийного горизонта через длительный (более 25 лет) промежуток времени после подработки лавой по слоям 2, 2-3 и 3 разделку сопряжений проводить в присутствии лица технического надзора горного участка.

Выполнить корректировку п. 5.1.1.4 «Инструкции...» и изложить в следующей редакции:

– бурение глубоких дегазационных шпуров осуществляется во всех выработках, ширина которых 4,5 м и более. При этом применяются следующие параметры (таблица 5.1):

– бурение глубоких дегазационных шпуров в выработках производить до начала расширения выработки буровой установкой, расположенной на комбайне. Первый шпур бурится до начала расширения. В выработках, проходимых комбайнами типа ПКС, (ПК), КРП-3 при бурении дегазационных шпуров во время проходки буровыми станками, расположенными на комбайне, допускается перед бурением первого глубокого дегазационного шпура предварительное расширение выработки до 0,7 м. При оформлении сопряжения расстояние от второго глубокого дегазационного шпура до «утюга» должно быть не более 3,0 м. Допускается заблаговременное бурение глубоких дегазационных шпуров в местах предполагаемого расположения сопряжений буровыми станками, расположенными на комбайне, самоходными буровыми станками и буровыми колонками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейко С.С. Анализ геологических условий возникновения газодинамических явлений на Старобинском месторождении калийных солей / Андрейко С.С., Прушак В.Я., Щерба В.Я. // Горная механика. – 2002. – № 1. – С. 89-94.
2. Андрейко С.С. Проблемы безопасной разработки калийных пластов: цели, тенденции и результаты // Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов: материалы междунар. конф. и науч. сес. ГИ УрО РАН. – Пермь, 2003. – С. 115-118.
3. Андрейко С.С. Результаты исследований по прогнозированию и предотвращению газодинамических явлений на Верхнекамском и Старобинском месторождениях калийных солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2006 г. – Пермь, 2007. – С. 137-139.
4. Андрейко С.С. Борьба с газодинамическими явлениями при разработке Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Е.А. Нестеров // Науч. исслед. и инновации. – 2009. – Т. 3, № 4. – С. 34-37.
5. Андрейко С.С. Современные проблемы науки и производства в области горного дела: учеб пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2010. – 338 с.
6. Андрейко С.С. Теория и практика отработки калийных пластов, опасных по газодинамическим явлениям // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. – Пермь, 2004. – С. 255-258.
7. Андрейко С.С. Состояние и перспективы развития способов управления газодинамическими процессами при отработке калийных пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2005 г. – Пермь, 2006. – С. 157-159.
8. Определение критической величины газового давления, способного вызвать газодинамические явления при разработке сильвинитового пласта / С.С. Андрейко, Т.А. Лялина, О.В. Иванов, Е.А. Нестеров // Изв. вузов. Горн. журн. – 2013. – № 5. – С. 22-28.
9. Исследование газоносности соляных пород третьего калийного пласта на шахтном поле Краснослободского рудника / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Е.А. Нестеров, И.И. Головатый, С.П. Береснев // Горн. журн. – 2013. – № 6. – С. 69-73.
10. Исследование газоносности пород пласта третьего калийного горизонта Старобинского месторождения / В.А. Тараканов, И.И. Головатый, С.П. Береснев, С.С. Андрейко, О.В. Иванов // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.25-27.
11. Инструкция по применению систем разработки на Старобинском месторождении / УП «ИГД», ОАО «Беларуськалий». – Солигорск, 2018. – 146 с.

12. Подлесный, И.А. Геомеханическое моделирование внезапных разрушений пород почвы горных выработок/ И.А. Подлесный, С.П. Береснев, С.С. Андрейко, С.В. Некрасов, Н.А. Литвиновская//Горный журнал. – 2010.–№ 8.–С. 28–30.

13. Геомеханическое моделирование внезапных разрушений пород почвы горных выработок / И.А. Подлесный, С.П. Береснев, С.С. Андрейко, С.В. Некрасов, Н.А. Литвиновская // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.28-30.

14. Нестеров Е.А. Исследование газодинамической опасности пород III калийного горизонта шахтного поля вводимого в эксплуатацию Краснослободского рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2012. – С. 232-234.

15. Андрейко С.С. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений из почвы при проходке подготовительных выработок в подработанном массиве соляных пород / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Н.А. Литвиновская. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2015. – 159 с.

16. Литвиновская Н.А. Газоносность и газодинамические характеристики пород почвы горных выработок в наработанном соляном массиве // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. «Горная и нефтяная электромеханика – 2015». / ПНИПУ. – Пермь, 2015. – Т. 1. – С. 136-142.

17. Литвиновская Н.А. Газоносность и газодинамические характеристики пород почвы при слоевой выемке третьего калийного пласта в условиях рудников ОАО «Беларуськалий» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 315-317.

18. Андрейко С.С. Предотвращение газодинамических явлений из почвы горных выработок в условиях применения различных вариантов столбовой системы разработки Третьего калийного пласта на рудниках ОАО «Беларуськалий» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 341-345.

УДК 622.4

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.81

Н.И. АЛЫМЕНКО

*Горный институт УрО РАН*

### **ПРОВЕТРИВАНИЕ РУДНИКА «КАРАЛЬВЕЕМ»**

Работниками Горного института УрО РАН при участии инженерно-технических работников рудника проведены исследования проветривания рудника «Каральвеем».

**Цель** – определение состояния вентиляции рудника (участков «Безымянный» и «Промоина»), выявление недостатков и разработка рекомендаций по улучшению проветривания рудника.

#### **Основные факторы, вентиляционной сети рудника:**

- проветривание рудника производится нагнетательным способом по фланговой схеме;
- ГВУ состоит из 2 осевых вентиляторов ВОД-21М; (+35 град.);
- ГВУ в реверсивном режиме обеспечивает производительность не менее 60% от нормального режима проветривания.

## 1. Результаты замеров работы ГВУ

Результаты замеров параметров работы ГВУ сведены в таблицу 2.1. При проведении ВДС в работе был вентилятор № 2 с углом установки лопаток рабочих колес +35°. Реверсивный режим работы вентилятора № 2 был выполнен с тем же углом установки лопаток рабочих колес.

Параметры работы ГВУ, сведены в таблицу 2.1. Из таблицы 2.1 видно, что утечки в районе ГВУ в нормальном режиме проветривания ВУ-2 составляют 3,89 м<sup>3</sup>/с или 3,96 % от производительности ГВУ – 98,13 м<sup>3</sup>/с. Подача свежего воздуха в рудник ГВУ – 94,24 м<sup>3</sup>/с. По результатам воздушно-депресссионной съемки вентилятор ГВУ развивает давление в 1304,0 Па. Аэродинамическое сопротивление, на которое работает ГВУ, составляет 0,135417 Нс<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>, а эквивалентное отверстие составляет 3,23 м<sup>2</sup>. Рудник можно считать средней тяжести проветривания.

Таблица 2.1

Расчетные параметры работы ГВУ

№ п/п	Наименование параметра	ВУ-2 +35°	ВУ-2 +35° (реверс)
1	Производительность, м <sup>3</sup> /с	98,13	65,62
2	Поверхностные утечки воздуха (суммарные), м <sup>3</sup> /с, (%)	3,89 (5,35)	2,15 (6,60)
3	Количество воздуха, подаваемого в рудник, м <sup>3</sup> /с	94,24	63,47
4	Развиваемое статическое давление, Па	1304	723
5	Мощность воздушного потока, Вт	127966	47507
6	Мощность, потребляемая из электрической сети, Вт	218232	197488
7	Статический к.п.д., %	58,64	24,06
8	Удельный расход энергии, Вт*с/м <sup>3</sup>	0,62	0,84
9	Аэродинамическое сопротивление, на которое работает ГВУ, Нс <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>	0,135417	0,168133
10	Эквивалентное отверстие, на которое работает ГВУ, м <sup>2</sup>	3,23	2,90

Затем ВУ-2 была переведена в реверсивный режим работы (+35°). Время перевода в реверсивный режим 6,2 мин. Аэродинамическое сопротивление, на которое работает ГВУ увеличилось и стало 0,168133 Нс<sup>2</sup>/м<sup>8</sup>, это объясняется влиянием естественной тяги, а также местными сопротивления на сопряжениях горных выработок. После реверсивного режима проветривания ВУ-2 была включена в нормальный режим проветривания.

Режимы работы ВУ-2 (таблица 2.1) и анализ ВДС в 2014 году позволили сделать следующие вывод: аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети рудника значительно снизилось за счет расширения сети горных выработок.

Для дальнейшего анализа были рассмотрены аэродинамические характеристики вентилятора ГВУ и характеристика вентиляционной сети, на которую работает ГВУ.

Аэродинамические характеристики ВУ-2 получены при работе вентилятора ГВУ на разных режимах.

Кривые характеристик описываются уравнением вида

$$H = A + BQ + CQ^2,$$

где H – развиваемое давление вентилятора, даПа.

Все замеренные параметры были приведены к стандартным атмосферным условиям [1, 2]: давление 101330 Па, температура 20 град. С и отсутствию естественной тяги.

Таблица 2.2

Значения коэффициентов для описания  
аэродинамических характеристик ВОД-21М № 2

Угол установки лопаток рабочих колес, град.	A	B	C
45	236,702	5,367	-0,0506
40	72,144	10,224	-0,0903
35	191,911	6,912	-0,0813
30	24,013	12,570	-0,1383
25	-106,107	17,984	-0,2071
20	-73,422	18,653	-0,2695
15	204,320	5,702	-0,1795

Аэродинамические характеристики, построенные по приведенным в таблицах зависимостям, отличаются от паспортных на 0,77-3,29 %. Для инженерных расчетов целесообразно пользоваться заводскими аэродинамическими характеристиками, которые приводятся для стандартных атмосферных условий (рисунок 2.1), или аналитическими зависимостями, приведенными в таблице 2.2, которые также отражают стандартные атмосферные условия.

Характеристики вентиляционной сети, внешних утечек воздуха и вентилятора ГВУ показаны на рисунке 2.1. При изменении окружающей температуры и температуры в руднике режим работы вентиляторов будет меняться в широких пределах.

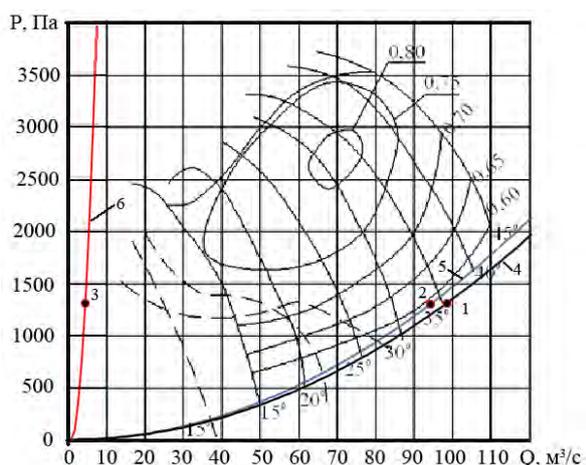


Рис. 2.1. Нормальный режим

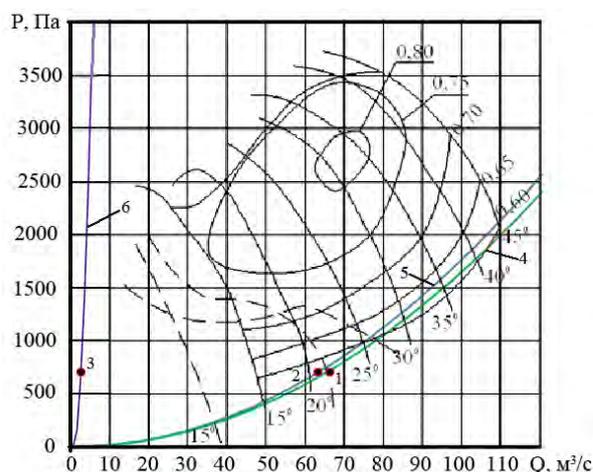


Рис.2.2. Реверсивный режим

На рисунках 2.1 и 2.2 показаны аэродинамические характеристики вентилятора ВОД-21М и характеристики вентиляционной сети рудника в нормальном и реверсивном режиме проветривания: 1 – рабочая точка вентилятора ГВУ; 2 – количество воздуха, поступающее в рудник при давлении на вентиляторе ГВУ 1304 Па; 3 – количество внешних утечек при давлении на вентиляторе ГВУ 1304 Па; 4 – аэродинамическая ха-

рактика вентиляционной сети, на которую работает вентилятор ГВУ; 5 – аэродинамическая характеристика вентиляционной сети рудника; 6 – аэродинамическая характеристика внешних утечек воздуха.

Расход воздуха в реверсивном режиме подаваемого в рудник более 60% по сравнению с нормальным режимом проветривания.

## 2. Депрессия рудника

Величина общерудничной депрессии определяется из выражения

$$h_{ш} = h_p + k_n * h_p + h_e, \text{ Па,}$$

где:  $h_p$  – суммарная расчётная депрессия прямолинейных участков для данного расчётного маршрута, Па;  $h_e$  – депрессия естественной тяги, Па;  $k_n$  – коэффициент, учитывающий депрессию местных сопротивлений на всём пути движения воздуха, берётся как часть расчётной депрессии  $h_p$ ,  $k_n = 0,25$ .

Депрессия естественной тяги определена аналитическим способом по формуле:

$$h_e = \gamma_{cp} * H * \frac{t_n - t_{cp}}{273 + t_{cp}}, \text{ мм вод.ст.,}$$

где:  $\gamma_{cp}$  – среднеконтурный удельный вес воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – разность отметок воздухоподающей и воздуховыдающей выработок, м;  $t_n$  – температура наружного воздуха в устье воздухоподающей выработки, °С;  $t_{cp}$  – средняя температура рудничного воздуха, °С.

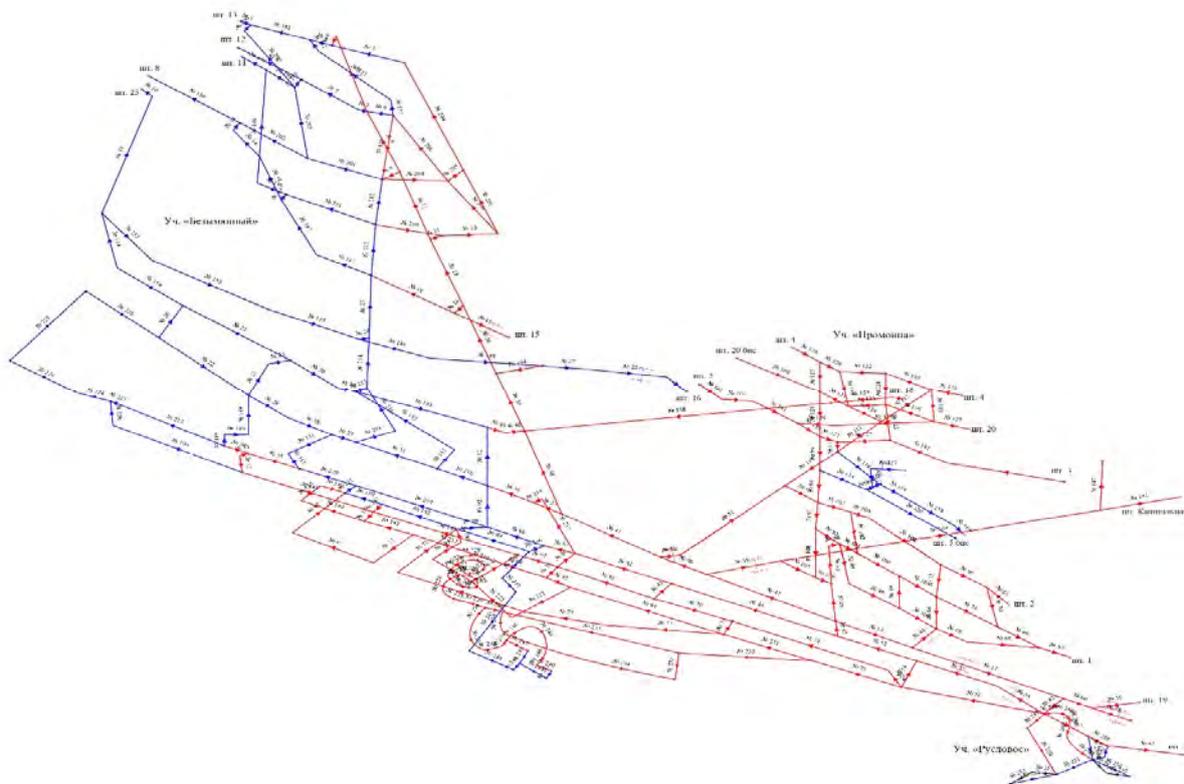


Рис. 2. Аксанометрия рудника «Каральвеем»

При отработке запасов участков «Безмянный» и «Промоина» в отработку будет включен в работу участок «Русловое», что изменит количество воздуха, поступающее в рудник на разные участки, но оставит производительность рудника на прежнем уровне.

### 3. Расчёт расхода воздуха для проветривания рудника

В нормальном режиме определяется по формуле:

$$Q = k (\sum Q_{\text{уч}} + \sum Q_{\text{пр}} + \sum Q_{\text{к}} + \sum Q_{\text{пв}} + \sum Q_{\text{ут}}) \text{ м}^3/\text{с},$$

где:  $k$  – коэффициент учитывающий неравномерность распределения воздуха ( $k = 1,05$  при одном горизонте,  $k = 1,1$  при двух горизонтах,  $k = 1,2$  при трёх и более);  $\sum Q_{\text{уч}}$  – сумма количества воздуха для проветривания выемочных участков, принимаются наибольшие расходы воздуха полученные при расчётах по всем факторам,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\sum Q_{\text{пр}}$  – сумма количества воздуха для обособленного проветривания проходческих выработок, проводимых за пределами выемочных участков,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\sum Q_{\text{к}}$  – сумма количества воздуха для обособленного проветривания технологических камер,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\sum Q_{\text{пв}}$  – сумма количества воздуха для обособленного проветривания поддерживаемых выработок,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\sum Q_{\text{ут}}$  – сумма утечек воздуха через вентиляционные сооружения за пределами выемочных блоков,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Количество воздуха для проветривания рудника на участках «Промоина» и «Безымянный», «гор. 480м – 370м и «гор. 520м» составит при:

$$T = 30 \text{ мин},$$

$$Q = 1,2 \times (23,60 + 22,75 + 11,01 + 3,52 + 60,60 + 1,06 + 4,26 + 1,06) = 153,43 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$Q_{\text{ГВУ}} = 1,05 \times 153,43 = 161,10 \text{ м}^3/\text{с},$$

где 1,05 – коэффициент утечек в районе ГВУ.

Угол установки лопаток рабочего колеса вентилятора ГВУ + 45° (летний период).

Расчет потребности в свежем воздухе для проветривания подземных горных работ, с учетом производства геологоразведочных работ, выполнен по норме расхода 5  $\text{м}^3/\text{мин}$  на 1 л.с. мощности ДВС. Общепринятой практикой является сокращение нормы расхода свежего воздуха на 1 л.с.

Кроме того, применение на проходке геологоразведочных выработок ПДМ Того-151 также даст значительное снижение потребности рудника в свежем воздухе. Обоснование применения оптимальной нормы воздуха на 1 л.с. для транспорта с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) в условиях рудника и применение ПДМ Того-151 создает значительные резервы мощности ГВУ рудника.

При завершении работ на участках «Безымянный» и «Промоина», горные работы будут сконцентрированы на горизонтах 480м – 355м. При неизменной производственной мощности рудника и при норме воздуха на 1 л.с. техники с ДВС 2,5  $\text{м}^3/\text{мин}$  расчетное количество воздуха существенно снизится и ГВУ обеспечит подачу потребного количества воздуха в рудник [3]. Такой режим проветривания обеспечивает ГВУ при угле установки лопаток рабочих колес +45°.

### 4. Естественная тяга

Величина естественной тяги, приведенная в таблицах рассчитана по среднемесячным, максимальным и минимальным значениям температуры наружного воздуха и температуры воздуха в руднике. На рисунках 3.1-3.3 видна динамика изменения естественной тяги в течение года на участках рудника отнесенным к гор. 520 м, месту расположения ГВУ. Влияние естественной тяги на работу ГВУ значительно [4].

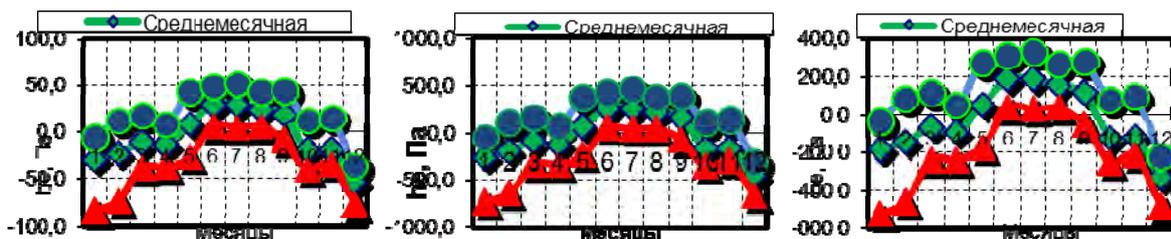


Рис. 4.1. Гор. 480 м и 520 м. Рис. 4.2. Гор. 520 м и 876 м. Рис. 4.3. Гор. 520 м и 777 м.

Максимальные и минимальные значения естественной тяги, построенные по изменению температур наружного воздуха в течении года. Естественная тяга большую часть года помогает работе ГВУ, а в теплое время года работает в противонапоре с ГВУ, что приводит к снижению производительности ГВУ и снижению поступления воздуха в горные выработки. В некоторых выработках за счет естественной тяги, в зависимости от температуры наружного воздуха и температуры воздуха в руднике, может произойти как увеличение расхода воздуха в горных выработках, так и снижение расхода, вплоть до прекращения движения и опрокидывания струй. Исходя из этого, режим работы вентиляторов ГВУ должен обеспечивать воздухом места ведения горных работ, как в нормальном режиме проветривания, так и в реверсивном.

### Рекомендации

1. Для более эффективного перераспределения воздуха по участкам вентиляционной сети рудника в основных узлах должны использоваться вентиляционные двери с регулируемыми вентиляционными окнами.
2. Необходимо установить капитальные регулируемые вентиляционные двери на штольне №19 в районе сопряжения с вентиляционным восстающий № 1 или вентиляционные двери должны быть перенесены от сопряжения со штольней «Капитальная», для снижения аэродинамического сопротивления участка вентиляционной сети и более эффективного распределения воздушной струю по участкам рудника;
3. Необходимо установить ППВУ на базе вентилятора ВМЭ-8 для распределения воздушной струи по рабочим зонам гор.355м в районе съезда;
4. Необходимо установить шлюзовые ворота с регулируемыми вентиляционными окнами на гор. 430 м для эффективного распределения воздушной струю по участкам гор. 430м-355м рудника.
5. Необходимо увеличить производительность ГВУ рудника для обеспечения потребным количеством воздуха рабочих зон рудника, за счет установки лопаток рабочего колеса вентилятора на  $+45^{\circ}$  в летний период.
6. Для инженерных расчетов целесообразно пользоваться заводскими аэродинамическими характеристиками вентиляторов ГВУ рудника, которые приводятся для стандартных атмосферных условий.
7. При дальнейшей работе на нижележащих горизонтах необходимо разработать специальные технические условия по разбавлению свежим воздухом отработавших газов машин с ДВС путем снижения потребного количества воздуха на 1 л.с. с  $5 \text{ м}^3/\text{мин}$  до  $2,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ , что позволит использовать большее количество техники с ДВС в руднике, не нарушая ЕПБ.
8. Для рассмотрения вопроса, о дальнейшем снижении количества воздуха требуемого для проветривания рудника, необходимо разработать методику отбора проб отработанных газов в машинах с ДВС для снижения нормы количества воздуха на 1 л.с. номинальной мощности двигателя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудничная вентиляция: справ. / под ред. К.З. Ушакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 440 с.: ил.
2. Справочник по рудничной вентиляции / под ред. А.И. Ксенофоновой. – М. Госгортехиздат, 1962. – 692 с.: ил.
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Вып. 78: утв. 11.12.2013, № 32935. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 276 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).
4. Воздушно-депресссионная съемка рудника «Каральвеем» ОАО «Рудник Каральвеем»: отчет по договору на оказание услуг №15/2017 от 13 марта 2017 г. / ГИ УрО РАН; отв. исполн. Н.И. Алыменко. – Пермь; Билибино, 2017. – 63 с.

УДК 622.831.322

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.82

О.В. ИВАНОВ

*Горный институт УрО РАН*

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГАЗОНОСНОСТИ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД В ВЫРАБОТКАХ ОКОЛОСТВОЛЬНОГО ДВОРА РУДНИКА ГРЕМЯЧИНСКОГО ГОКА**

Гремячинское месторождение калийных солей расположено на юге Волгоградской области в Котельниковском районе. В настоящее время его освоение и разработку осуществляет ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий». Для промышленного освоения запасов калийных солей на Гремячинском месторождении ведется строительство рудника по добыче сильвинитовой руды с производственной мощностью 7,3 млн. тонн в год для последующей ее переработки в калийные удобрения на обогатительной фабрике.

По характеру связи с породой газы подразделяются на свободные, связанные и растворенные. Свободные газы находятся в открытых макропорах и трещинах породы под давлением, теоретически достигающим величины напряжений массива. Связанные газы представлены газами сорбированными, к которым относятся газы, удерживаемые на поверхности открытых микротрещин и пор, и газами окклюдированными, которые содержатся в закрытых порах горных пород.

Методика проведения экспериментальных исследований газоносности и газодинамических характеристик пород базального доломит-ангидрит-галитового пласта, пластов перекрывающей каменной соли и калийно-магниевого солей в условиях рудника Гремячинского ГОКа включала: определение газоносности пород по свободным газам и определение компонентного состава свободных газов при условии их истечения из исследовательских шпуров [1, 2]. В ходе исследований по существующей методике в забоях горных выработок околоствольного двора бурились шпуры диаметром 42 мм на глубину до 4,0 м, выполнялись замеры объема свободных газов, выделившихся из загерметизированных шпуров и начального давления газов в загерметизированной части шпура, установившегося за 30 сек. Производился отбор проб выделившихся свободных газов для определения компонентного состава свободных газов, а также отбирались образцы пород для определения газоносности по связанным газам. Химический анализ

состава свободных газов и связанных газов проводился на газовом хроматографе СР–450 GC компании Varian.

Методика определения газоносности пород по связанным газам заключается в замере объема выделившихся газов при сухой механической дезинтеграции образцов пород с постоянным контролем давления и температуры в изолированном от атмосферы сосуде, а также в отборе и хроматографическом анализе компонентного состава газов [3, 4].

В результате выполненных шахтных исследований установлено, что газоносность по свободным газам доломитовых, ангидритовых и ангидрит-галитовых пород базального доломит-ангидрит-галитового пласта не превышает  $0,05 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , что практически на порядок ниже значения повышенной газоносности ( $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) и в 100 раз ниже газоносности соляных пород, опасных по газодинамическим явлениям. Максимальное начальное давление свободных газов в массиве не превышает атмосферное, начальная скорость газовыделения менее  $0,03 \text{ л/мин}$ , что также в 50-100 раз ниже начальной скорости газовыделения в газоносных и выбросоопасных соляных породах.

Химический анализ компонентного состава свободных газов показал отсутствие в составе выделившихся газов горючих компонентов.

Таким образом, установлено, что доломитовые, ангидритовые и ангидрит-галитовые породы базального доломит-ангидрит-галитового пласта в выработках околотовольного двора рудника Гремячинского ГОКа не газоносны по свободным горючим и ядовитым газам.

Газоносность по свободным газам каменной соли не превышает  $0,20 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , что в два раза ниже значения повышенной газоносности ( $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) и в 5 раз ниже газоносности соляных пород, опасных по газодинамическим явлениям. Максимальное начальное давление свободных газов в массиве не превышает  $0,191 \text{ МПа}$ , начальная скорость газовыделения менее  $0,05 \text{ л/мин}$ , что также в десятки раз ниже начальной скорости газовыделения в газоносных и выбросоопасных соляных породах. Отбор проб на анализ компонентного состава свободных газов в галитовых породах пласта перекрывающей каменной соли из-за низкого объема выделившихся газов не проводился.

Газоносность по свободным газам карналлитовых пород в забое вспомогательного транспортного уклона № 1 изменяется от  $0,15 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $1,16 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , при среднем значении  $0,30 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Максимальное начальное давление свободных газов в массиве составило  $0,207 \text{ МПа}$ , начальная скорость газовыделения при этом составила  $0,44 \text{ л/мин}$ . Компонентный состав свободных газов:  $\text{CH}_4$  – 32,31%;  $\text{H}_2$  – 4,69%;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 0,436%;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0,020%;  $i\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,001%;  $n\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,005%;  $\text{N}_2$  – 62,51%;  $\text{CO}_2$  и другие газы – 0,02%. Средняя газоносность по условному метану составляет  $0,48 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Суммарное содержание горючих газов (метан + водород) составляет 37,01%. Суммарное содержание углеводородов метанового ряда – 0,463%.

Газоносность по свободным газам карналлит-галитовых пород изменяется от  $0,02 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $0,32 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , при среднем значении  $0,17 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Максимальное начальное давление свободных газов в массиве составило  $0,193 \text{ МПа}$ , начальная скорость газовыделения при этом составила  $0,21 \text{ л/мин}$ .

Газоносность по свободным газам сильвинитовых пород в забое камеры навески исполнительного органа изменяется от  $0,02 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $2,12 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , при среднем значении  $0,31 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Максимальное начальное давление свободных газов в массиве составило  $0,225 \text{ МПа}$ , начальная скорость газовыделения при этом составила  $1,09 \text{ л/мин}$ . Средний компонентный состав свободных газов:  $\text{CH}_4$  – 20,99%;  $\text{H}_2$  – 6,48%;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 0,493%;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0,077%;  $i\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,040%;  $n\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,117%;  $i\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 0,114%;  $n\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 0,082%;  $n\text{C}_6\text{H}_{14}$  – 0,028%;  $\text{N}_2$  – 71,52%;  $\text{CO}_2$  и другие газы – 0,05%. Средняя газоносность по условному

метану составляет  $0,48 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Суммарное содержание горючих газов (метан + водород) составляет 27,47%. Суммарное содержание углеводородов метанового ряда – 0,95%.

Таким образом, установлено, что породы пласта перекрывающей каменной соли в выработках околоствольного двора и уклонах, вскрывающих продуктивный пласт, рудника Гремячинского ГОКа малогазоносны по свободным газам. Карналлитовые, карналлит-галитовые и сильвинитовые породы пласта калийно-магниевых солей весьма газоносны, при этом значения газоносности их в отдельных замерах достигают значений в выбросоопасных соляных породах.

Газоносность пород базального доломит-ангидрит-галитового пласта по связанным газам изменяется от 0,006 до  $0,054 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , при среднем значении  $0,025 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , что в 4-10 раза ниже значения повышенной газоносности по связанным газам газоносных и выбросоопасных соляных пород. Минимальное значение газоносности по связанным газам отмечается в ангидритовых породах, максимальное значение – в доломитовых. По компонентному составу связанные газы – метаново-азотные. Максимальное содержание метана в составе связанных газов – 7,6% обнаружено в доломитовых породах. При этом суммарное содержание углеводородов метанового ряда достигает 8,35%, содержание азота – 83,45%. Связанные газы в процессе ведения горных работ в атмосферу горных выработок не выделяются. Для выделения связанных газов в атмосферу горных выработок необходимо разрушение (измельчение) горных пород до пылеобразного состояния с размером частиц  $1 \times 10^{-4} \div 1 \times 10^{-6} \text{ м}$ .

Газоносность галитовых пород пласта перекрывающей каменной соли по связанным газам изменяется от 0,016 до  $0,033 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , при среднем значении  $0,028 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , что в 5 раз ниже значения газоносности по связанным газам соляных пород, опасных по газодинамическим явлениям. По компонентному составу связанные газы – метаново-азотные. Максимальное содержание метана в составе связанных газов – 3,74%. При этом суммарное содержание углеводородов метанового ряда достигает 0,57%, содержание азота – 95,63%.

Газоносность сильвинитовых пород пласта калийно-магниевых солей по связанным газам изменяется от 0,012 до  $0,040 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , при среднем значении  $0,029 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , что также в 5 раз ниже значения газоносности по связанным газам соляных пород, опасных по газодинамическим явлениям. По компонентному составу связанные газы – метаново-азотные. Максимальное содержание метана в составе связанных газов – 18,99%. В составе связанных газов сильвинитовых пород обнаружен водород, максимальное значение которого достигает 1,23%. При этом суммарное содержание углеводородов метанового ряда достигает 0,88%, содержание азота – 78,83%.

Газоносность карналлитовых пород пласта калийно-магниевых солей по связанным газам изменяется от 0,011 до  $0,072 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , при среднем значении  $0,039 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , что почти в 2 раза ниже значения газоносности по связанным газам соляных пород, опасных по газодинамическим явлениям. Максимальное значение газоносности по связанным газам ( $0,072 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ), зафиксированное в линзе карналлитовых пород в пласте калийно-магниевых солей в забое камеры навески исполнительного органа, приближается к значениям газоносности по связанным газам соляных пород, опасных по газодинамическим явлениям. По компонентному составу связанные газы – метаново-азотные. Максимальное содержание метана в составе связанных газов – 24,10%. В составе связанных газов карналлитовых пород также обнаружен водород, максимальное значение которого достигает 0,65%. При этом суммарное содержание углеводородов метанового ряда достигает 0,21%, содержание азота – 74,98%.

Данные о газоносности по свободным и связанным газам пород базального доломит-ангидрит-галитового пласта, пластов перекрывающей каменной соли и калийно-магниевых солей распространяются на площадь месторождения, в пределах кото-

рой осуществляется проходка выработок околоствольного двора рудника Гремячинского ГОКа. На других участках шахтного поля рудника Гремячинского ГОКа необходимо проводить дополнительные исследования для количественной оценки газоносности пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование газоносности продуктивных калийных пластов на новых участках шахтных полей калийных рудников ОАО «Уралкалий и ОАО «Сильвинит» / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Е.А. Нестеров, Н.А. Литвиновская // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2010. – № 4. – С. 186-190.
2. Нестеров Е.А. Газоносность калийных пород по связанным газам в условиях Краснослободского рудника / Е.А. Нестеров, О.В. Иванов, С.С. Андрейко // Науч. исслед. и инновации. – 2010. – Т. 4, № 1. – С. 89-91.
3. Инструкция по эксплуатации планетарных шаровых мельниц тип РМ100/РМ200. Retsch GmbH & Co. КГ, Наан, Germany, Doc.Nr. D 98.540/640.9999. –2004. –32 с.
4. Иванов О.В. Методика и результаты определения газоносности соляных пород по связанным газам методом сухой механической дезинтеграции // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 312-314.

УДК 621.63:622.45

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.83

А.А. КАМЕНСКИХ

*Горный институт УрО РАН*

#### **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СХЕМЫ ПРОВЕТРИВАНИЯ РУДНИКА «МОЛОДЕЖНЫЙ»**

Рудник ведет добычу олова на месторождении «Фестивальное». Находится рудник в Хабаровском крае недалеко от Комсомольска на Амуре. Добираться до рудника необходимо через Хабаровск, и далее 450 км по грунтовке на автомобиле.

Рудник был введен в эксплуатацию в 1971 году по проекту, разработанному в 1963 году. После полной остановки рудника в 2009 году старые вентиляционные установки главного проветривания ВОКД 2,4 и ВОД-21 были выведены из рабочего состояния и в последующем демонтированы, а здания ГВУ подверглись частичному разрушению, восстановление которых, на данный момент, является экономически нецелесообразным.

Для безопасного ведения горных работ предусматривается временная схема вентиляции. При данной схеме проветривание горных выработок рудника "Молодежный" предусмотрена передвижная вентиляционная установка на базе вентиляторов ВМЭ-12А, которая служит в качестве вентилятора главного проветривания.

С 2013 года рудник пытаются реанимировать и выйти на проектную производительность в 600 тыс. тонн руды в год. Сейчас производительность рудника составляет 240 тыс. тонн в год. Пик добычи руды достигал 1,2 млн. тонн руды в год.

В мировом масштабе Россия добывает 1/100 часть олова, но при большом потреблении этого оказывается недостаточно, чтобы обеспечить нужды промышленности.

Была поставлена следующая задача: выбрать вентилятор главного проветривания, который сможет обеспечить проветривание рудника при выходе на максимальную производительность и с максимальным удалением горных работ. Сотрудники рудника настаивали на установке вентилятора эжекторного типа на базе существующих вентиляторов рудника.

Для построения математическая модель, на которой проводились вычисления, были произведены замеры необходимых параметров по всему руднику.

Как оказалось, в процессе исследования, в сбойке между штольной Капитальная и штольной Транспортная был установлен вентилятор эжекторного типа на базе вентилятора ВО-12,5. На рис. 1 представлена схема вскрытия р. Молодежный.

Изначально месторождение было вскрыто тремя вертикальными стволами. Предусматривалось проветривание северной и южной части участка рудника по нагнетательной схеме вентиляционной установкой главного проветривания ВОКД 2,4, расположенной на поверхности в районе ствола Эксплуатационно-вспомогательном. ВОД-21 располагался на Вентиляционном стволе.

На данном этапе, в основном, идет отработка запасов на вышележащих горизонтах: 525, 585, 650 метров и опустились на 500 горизонт, далее планируют вести отработки до 310 горизонта, а в процессе будут проводить новые изыскания.

Рудник «Молодежный» относится к типу нагорных рудников, проветривание которых заключается в отсутствии единой сборной исходящей струи воздуха и значительным влиянием на проветривание естественной тяги.

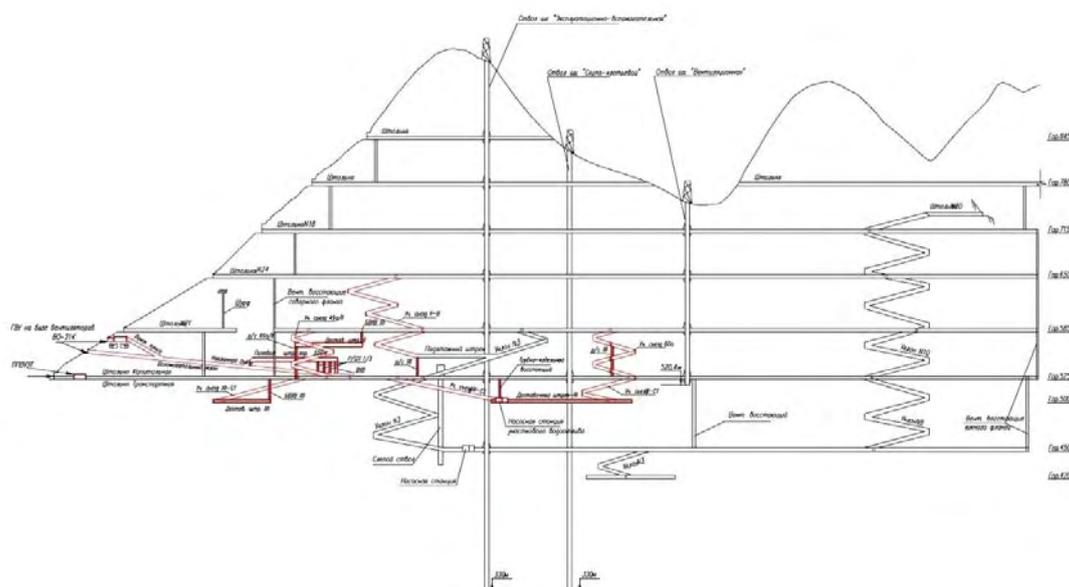


Рис. 1. Схема вскрытия р. Молодежный

Месторождение «Фестивальное» не склонно к горным ударам и не опасно по внезапным выбросам горючих газов. Руды и породы не склонны к самовозгоранию.

Среднегодовая температура воздуха составляет  $+ 2,5^{\circ}$ . Наиболее низкая температура воздуха опускается до  $40 - 43^{\circ}$  (январь); максимально жаркий период приходится на июль, когда температура достигает  $35^{\circ} - 38^{\circ}$  С. Сезонное промерзание грунтов происходит на глубину  $2,5 - 3,0$  м.

Естественная тяга большую часть года помогает работе подземной передвижной вентиляторной установке эжекторного типа (ППВУЭТ), а в теплое время года работает в противонапоре с ППВУЭТ. Максимальная амплитуда колебаний естественной тяги в течение года составляет около  $701$  Па, при этом, оказывает существенное влияние на работу ППВУЭТ.

Как выяснилось, в результате обработанных данных, установленный вентилятор не обеспечит расчетное количество воздуха ( $150 \text{ м}^3/\text{с}$ ) при максимальном развитии горных работ.

Для рудника «Молодежный» наиболее рационально использовать в качестве ГВУ вентилятор типа ВО-21К с электродвигателем 500 кВт и частотой вращения 1000 об/мин, который обеспечит необходимые параметры проветривания рудника как на три года вперед, так и на максимальное развитие горных работ с учетом влияния естественной тяги на режимы работы ГВУ [14].

Далее были построены характеристики рудника при развитии горных работ на три года вперед (рис.2) и при максимальном развитии (рис.3), которые были наложены на аэродинамические характеристики подходящего для проветривания вентилятора ВО-21К.

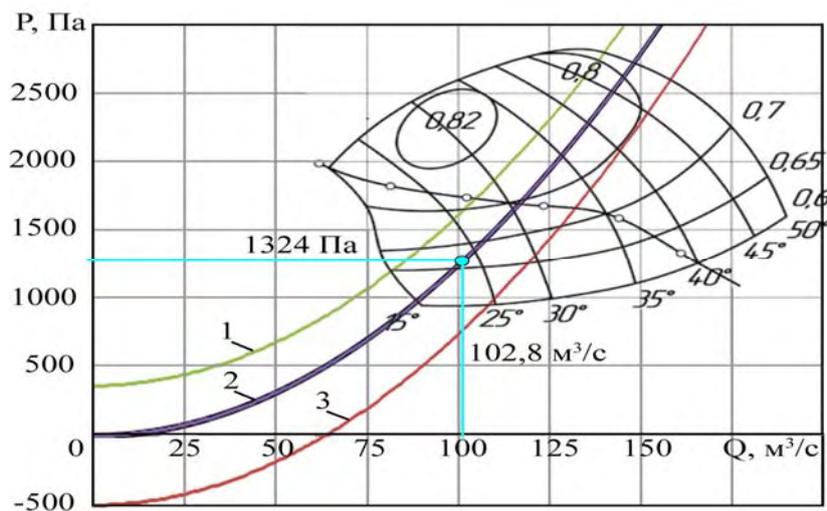


Рис. 2. Расположение рабочей точки при работе вентиляторов ВО-21К при развитии горных работ на три года вперед: 1 – характеристика вентиляционной сети рудника с учетом влияния максимальной положительной естественной тяги; 2 – характеристика вентиляционной сети рудника, приведенная к нормальным атмосферным условиям; 3 – характеристика вентиляционной сети рудника с учетом влияния максимальной отрицательной естественной тяги

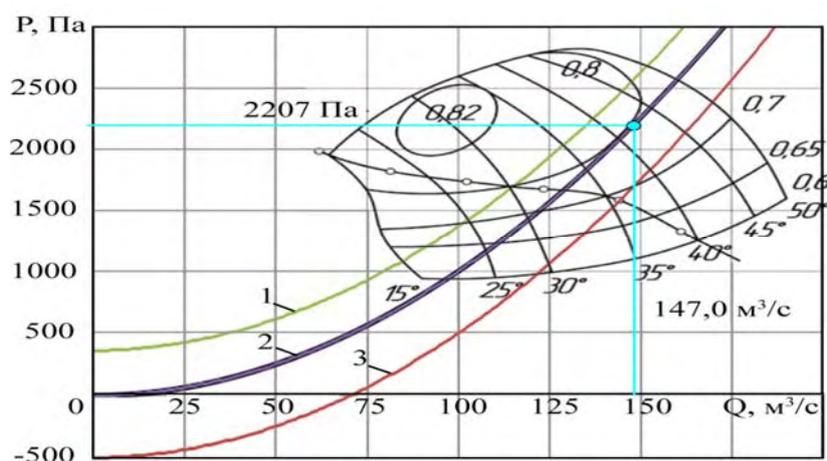


Рис. 3. Расположение рабочей точки при работе вентиляторов ВО-21К при максимальном развитии горных работ: 1 – характеристика вентиляционной сети рудника с учетом влияния максимальной положительной естественной тяги; 2 – характеристика вентиляционной сети рудника, приведенная к нормальным атмосферным условиям; 3 – характеристика вентиляционной сети рудника с учетом влияния максимальной отрицательной естественной тяги

В результате построения расчетной модели вентиляционной сети рудника при максимальном развитии горных работ аэродинамическое сопротивление, преодолеваемое ГВУ, равно  $0,102131 \text{ Нс}^2/\text{м}^8$ , необходимое для проветривания рудника количество воздуха  $147,0 \text{ м}^3/\text{с}$ . Вентилятор ГВУ должен развивать давление  $2209 \text{ Па}$  при производительности  $147,0 \text{ м}^3/\text{с}$ . Такой режим работы обеспечат вентиляторы ВО-21К, либо 5 параллельно установленных вентиляторов ВМЭ-12 с углом установки лопаток рабочих колес  $+35^\circ$ .

В результате проведенного исследования предложены следующие рекомендации:

1. Основываясь на полученных результатах проведенных натурных замерах, расчете на разработанной математической модели рудника при развитии горных работ, как на три года, так и при максимальном развитии, необходимо установить для обеспечения расчетным количеством воздуха рабочих мест рудника «Молодежный» на весь период отработки месторождения вентиляторы типа ВО-21К в качестве ГВУ в одном из следующих мест (для выбора конкретного места установки вентиляторов ГВУ необходимо провести дополнительные исследования):

- в устье штольни «Капитальная» гор. 525 м.
- в устье штольни «Транспортная» гор. 525 м
- в устье Наклонного съезда.

2. Для эффективного распределения воздушной струи по рабочим участкам рудника необходимо установить регулирующие устройства (двери), согласно, результатов воздухораспределения на математической модели рудника «Молодежный» при развитии горных работ, как на три года, так и при максимальном развитии.

3. Осуществлять контроль закрытия вентиляционных ворот, согласно, расчетных схем.

4. Поставить перемычки на временно не используемых горизонтах для сокращения количества воздуха, используемого для проветривания поддерживаемых выработок.

5. Необходимо пройти новый уклон с большим сечением ( $16 \text{ м}^2$ ), как новые выработки, спроектированные под технику с ДВС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проветривание рудника «Двойной» / Каменских А.А., Алыменко Н.И., Петров А.И., Николаев А.В. // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горношахтного и нефтепромыслового оборудования: материалы конф. – 2015. – Т. 1. – С. 200-204.

2. Расположение главной вентиляторной установки / Н.И. Алыменко, А.А. Каменских, А.В. Николаев, А.И. Петров // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. «Горная электромеханика – 2014» / ПНИПУ [и др.]. – Пермь, 2014. – С. 126-130.

3. Каменских А.А. Вентиляторные установки рудника «Двойной» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 318-321.

4. Numerical modeling of heat and mass transfer during hot and cool air mixing in air supply shaft in underground mine / N.I. Alymenko, A.A. Kamenskikh, A.V. Nikolaev, A.L. Petrov // Eurasian mining. – 2016. – № 2. – С. 45-47.

Н.А. ЛИТВИНОВСКАЯ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ  
И ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ  
ВО ВРЕМЕНИ ДАВЛЕНИЯ СВОБОДНЫХ ГАЗОВ В ПОРОДАХ ПОЧВЫ ПОД-  
ГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В РУДНИКАХ  
ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»**

Исследование динамики изменения во времени давления свободных газов в породах почвы подготовительных горных выработок в различных горнотехнических условиях необходимо для выбора эффективного способа предотвращения газодинамических явлений из почвы на сопряжении лава-штрек при отработке слоев II, II-III, III при слоевой выемке Третьего пласта.

В соответствии с существующими, в настоящее время, представлениями о механизме образования очаговых скоплений свободного газа в породах 12 глинисто-мергелистого горизонта аккумуляция свободных газов происходила в зонах динамического влияния разрывных нарушений. Именно внутренняя структура разрывных нарушений определяет конкретные условия локализации очаговых скоплений свободного газа в породах Старобинского месторождения калийных солей. В зоне влияния очистных горных работ (передового опорного давления) в породах почвы происходит увеличение или уменьшение давления свободного газа в очаговых скоплениях. Увеличение давления газа в породах почвы горных выработок создает дополнительную нагрузку и активизирует процесс расслоения и разрушения пород, что может привести к новому притоку газа в эти зоны. Такая взаимосвязь между напряженно-деформированным состоянием пород почвы, объемом газа и его давлением происходит в виде своего рода «цепной реакции», которая при определенном механическом состоянии пород почвы может привести к их газодинамическому разрушению в виде выброса соли и газа.

Исследования проводились на всех рудниках ОАО «Беларуськалий». Всего было пробурено 9 исследовательских скважин на глубину, обеспечивающую перебуривание контакта с 12 глинисто-мергелистым горизонтом. Скважины надежно герметизировались бетонной пробкой с металлической трубкой, к которой через штуцер подключался манометр для измерения давления свободного газа в камере.

Наиболее часто встречающиеся графики изменения давления свободного газа представлены на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1 во времени наблюдается постепенный рост давления свободных газов в измерительной камере. Максимум давления свободных газов в измерительной камере был достигнут на 47 сутки наблюдений и составил 0,288 МПа. Далее на графике наблюдается снижение величины давления свободных газов примерно на 40%, которое на 54 сутки наблюдений составило 0,205 МПа. Такая динамика изменения во времени величины давления свободных газов в измерительной камере станции объясняется воздействием на породы почвы передового опорного давления лавы 13н-2. По мере нарастания величины передового опорного давления увеличивалось и давление свободных газов в измерительной камере станции. Спад величины давления свободных газов может быть объяснен изменением газодинамических характеристик пород почвы при их надработке лавой, отрабатывающей IV сильвинитовый слой. По-видимому, при достижении величины давления, превышающей 0,288 МПа, в породах почвы градиент давления превышает градиент фильтрации. В этом случае под действием передового опорного началась фильтрация газа из измерительной камеры в окружающие породы, и давление понизилось до величины 0,205 МПа.

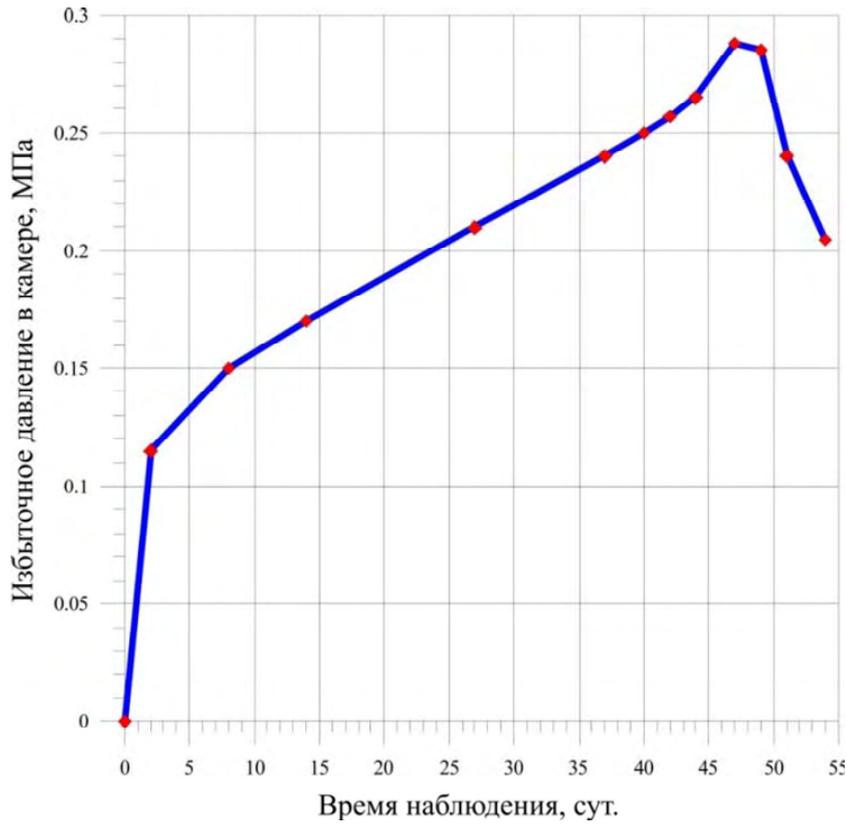


Рис. 1. График изменения во времени давления свободных газов в измерительной камере станции транспортном штреке лавы 13н-2 ЗРУ

В тоже время на некоторых участках наблюдалась картина представленная на рисунке 2.

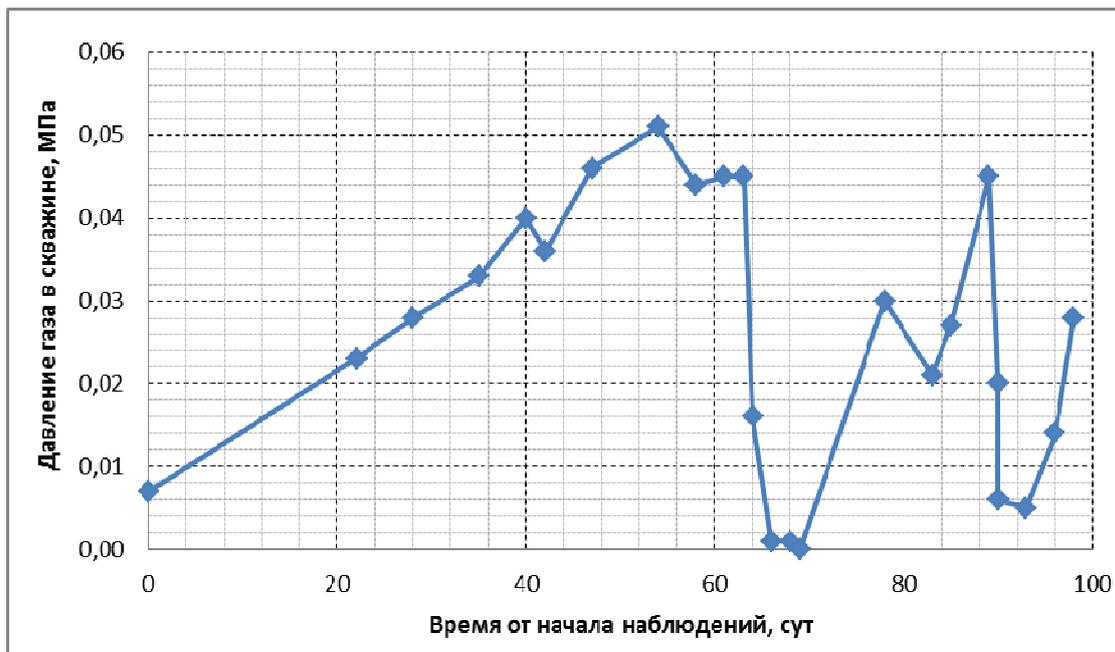


Рис. 2. График изменения во времени давления свободных газов в измерительной камере замерной станции в конвейерном штреке 12А-2 4 РУ

Как видно из рисунка 2 во времени наблюдается постепенный рост давления свободных газов в измерительной камере. Максимум значений давления свободных газов в измерительной камере был достигнут на 54 сутки наблюдений и составил 0,05 МПа. Далее на графике наблюдается снижение величины давления свободных газов, которое на 69 сутки наблюдений упало до нуля. Такая динамика изменения во времени величины давления свободных газов в измерительной камере станции конвейерного штрека объясняется воздействием на породы почвы передового опорного давления лавы 12А-2 и расположением замерной станции в поле лавы на расстоянии от межпанельного целика около 47 м. По мере нарастания величины передового опорного давления увеличивалось и давление свободных газов в измерительной камере станции. Спад величины давления свободных газов на 69 сутки наблюдений до нуля с одной стороны может быть объяснен изменением газодинамических характеристик пород почвы при их наработке лавой, обрабатывающей IV сильвинитовый слой. Породы почвы, наработанные лавой 12А-1, несомненно, изменили свои фильтрационные свойства. Здесь, по-видимому, давление газа, так же как и в предыдущем случае, превышает градиент фильтрации и газ начинает распределяться по глинистым прослойкам в массиве.

Далее на графике вновь наблюдается повышение давления свободных газов в измерительной камере на 89 сутки до величины 0,045 МПа, а затем давление свободных газов на 93 сутки снижается до 0,01 МПа. Далее вновь наблюдается некоторый рост давления свободных газов в измерительной камере, которое, на 98 сутки наблюдений, достигает величины 0,028 МПа. По-видимому, такие пульсационные изменения давления свободных газов в измерительной камере замерной станции конвейерного штрека лавы 12А-2 обусловлены: местоположением замерной станции в поле лавы; совместным влиянием вариаций величины передового опорного давления и газодинамических характеристик пород почвы; наличием путей фильтрации газа из измерительной камеры.

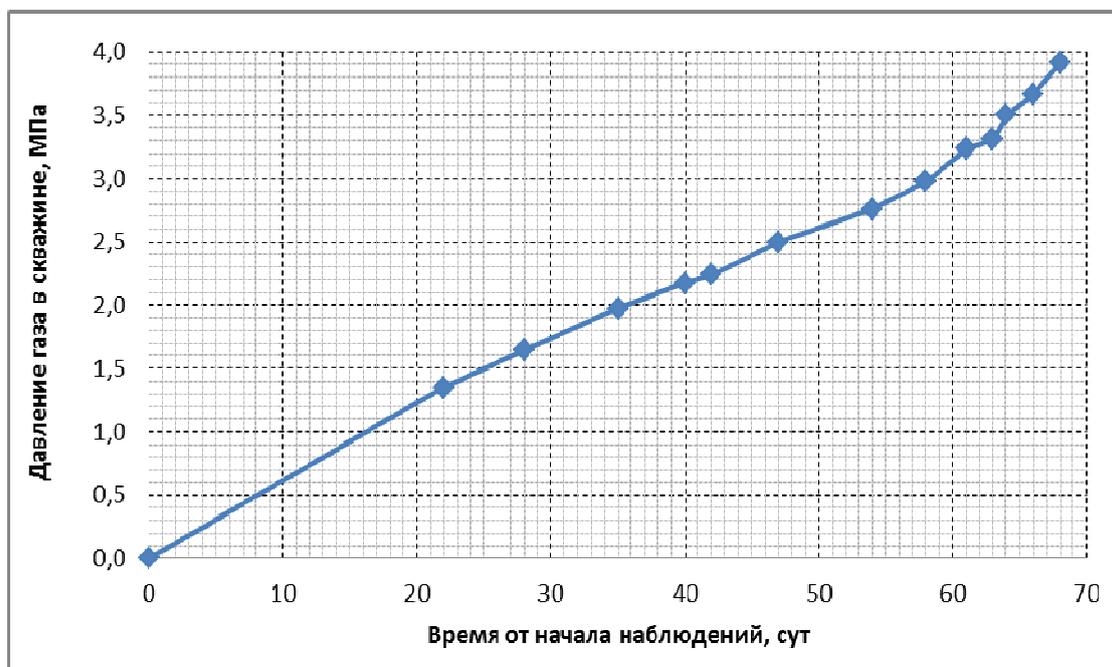


Рис. 3. График изменения во времени давления свободных газов в измерительной камере станции вентиляционного штрека 12А-2 4 РУ

На рисунке 3 представлен ещё один характерный график. Такое монотонно нарастающее давление свободных газов наблюдается на участках близкорасположенных к межпанельным целикам. По-видимому, это связано с отсутствием расслоений, по которым газ мог бы мигрировать в массив.

На участках, где проводились исследовательские работы по измерению газодинамических характеристик и газоносности свободных газов, там где были пробурены шпуры до контакта с 12 глинисто-мергелистым горизонтом, давление свободных газов в измерительных станциях вообще не фиксировалось или достигало незначительных величин, а потом его значение опускалось до 0 Мпа. Видимо, здесь сказывается эффект дегазации от исследовательских шпуров.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- При наличии скопления свободных газов в породах 12 глинисто-мергелистого горизонта по мере приближения очистного забоя происходит нарастание давления свободных газов в замерных станциях.

- При превышении градиента давления над градиентом фильтрации, происходит фильтрация свободных газов по образовавшимся трещинам и расслоениям в зоне передового опорного давления и падение давления свободных газов в замерных станциях.

- Отсутствие в течение длительного времени избыточного давления свободных газов в породах 12 глинисто-мергелистого горизонта в некоторых замерных станциях, расположенных в выемочном столбе даже в зоне передового опорного давления свидетельствует о неравномерном распределении свободных газов в породах 12 глинисто-мергелистый горизонт, обусловленном литологической и тектонической неоднородностью отдельных его участков.

- При расстоянии от межпанельных целиков менее 30 м породы почвы находятся в зоне изгиба, которая включает в себя часть зон повышенного горного давления и разгрузки. В пределах этой зоны протекают активные стадии процессов сдвижения, деформирования массива и перераспределения горного давления. В этой области породы почвы еще не имеют фильтрационных каналов, связывающих их с породами, где проявился эффект надработки, т.е. сохраняют при этом запас энергии сжатого газа. Росту давления газа в породах почвы горных выработок в этой области способствует опорное давление на породы почвы междувыработочных целиков. В таких горнотехнических условиях и при таком давлении свободных газов в породах почвы весьма вероятна динамическая форма разрушения в виде внезапного выброса соли и газа.

- При реализации технологических схем слоевой выемки Третьего калийного горизонта лавами, дегазацию пород почвы целесообразно проводить в подготовительных выработках, пройденных по слоям 2, 2-3, 3. Особенно необходима дегазация на участках, где ширина выработки превышает 3,0 м (сопряжения выработок).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований (проект № 18-05-371А)*

Е.А. НЕСТЕРОВ, В.М. МАЛЬЦЕВ  
*Горный институт УрО РАН*  
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА  
ЗОНЫ ЭФФЕКТИВНОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ ТОРПЕДИРОВАНИИ КАРНАЛЛИТОВОГО ПЛАСТА**

В условиях Верхнекамского месторождения калийных солей из всех действующих рудников добыча карналлитовой породы осуществляется только на СКРУ-1. Карналлит нашел свое применение в различных производственных областях: строительстве, автомобилестроении, авиации, нефтяной и химической промышленности.

Разработка сильвинитовых и карналлитовых пород осложняется различными видами газодинамических явлений, последствия которых приводят к значительным материальным ущербам предприятию, нарушению ритмичности работы, а также могут исчисляться человеческими жизнями.[1] Основная доля газодинамических явления при разработке карналлитового пласта В происходит из верхнего б слоя, который является самым выбросоопасным. Средняя мощность пласта В составляет 8 м. Газоносность карналлитовых пород по свободным газам может достигать  $1,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Добыча карналлитовой породы на протяжении нескольких десятков лет в условиях СКРУ-1 ПАО «Уралкалий» осуществляется с применением комбайновых комплексов. Для безопасной механизированной отработки карналлитового пласта В применяется торпедирование (профилактическая отработка) карналлитовых пород [2,3].

Под торпедированием карналлитового пласта понимается взрывание зарядов взрывчатого вещества в шпурах с целью образования в массиве области повышенной трещиноватости, обеспечивающей снижение горного давления в призабойной зоне пласта, его дегазацию и предотвращение выбросов соли и газа.

Данный способ используется при комбайновой технологии отработки первого выемочного слоя пласта  $V_k$ , а также перед отработкой последнего выемочного слоя пласта  $V_k$  при недостаточной мощности междупластия Б-В.

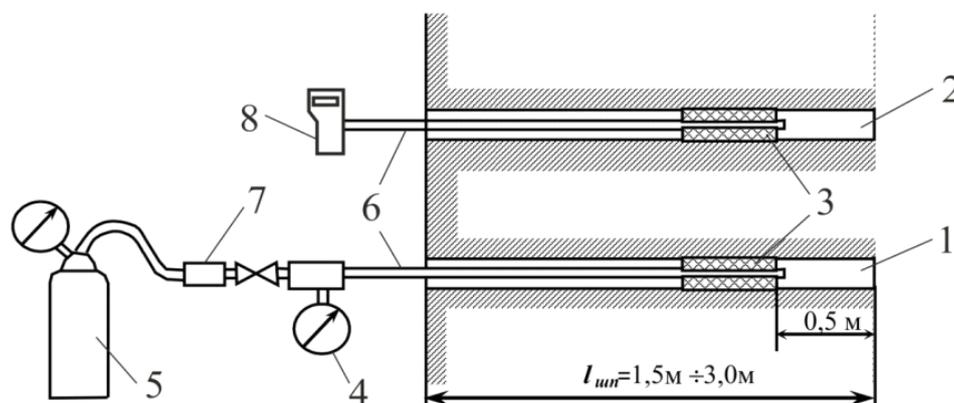
В связи с тем, что на предприятии возникла необходимость применения другого взрывчатого вещества, необходимо проведение опытных работ по определению радиуса зоны эффективного трещинообразования при применении ВВ V класса Угленит Э-6.

Методика определения радиуса зоны эффективного трещинообразования  $R_{эф}$  заключается в сравнении газопроницаемости карналлитовых пород до и после торпедирования [3].

Для определения газопроницаемости карналлита в массиве в левой стенке очистной камеры № 100 11 восточной панели рудника СКРУ-1 на глубину 3,0 м пробурены два параллельных шпура: рабочий и контрольный на расстоянии 25 см друг от друга. Шпуры герметизировались механическими герметизаторами на глубину не менее 1,5 м. К герметизатору рабочего шпура присоединялся манометр для определения давления газа в газовой камере. Газ под давлением 5-15 атм подавался в шпур по трубопроводу. К штуцеру герметизатора контрольного шпура присоединялся расходомер (DPI 740). После подачи в рабочий шпур газа при определенном давлении измерялся расход газа из контрольного шпура. Таких измерений проведено 3 при разном давлении в рабочем шпуре (рис. 1).

В правой стенке очистной камеры № 100 на расстоянии 10 м друг от друга пробурены 3 торпедируемых шпура диаметром 42 мм глубиной 4 м, масса заряда

Угленита Э-6 2,4 кг в каждом шпуре. По принятой методике на различном расстоянии от торпедируемого шпура бурились рабочий и контрольный шпуры. В рабочий шпур подавался газ под давлением, в контрольном шпуре определялся расход. Результаты исследований по определению радиуса зоны эффективного трещинообразования представлены в таблице 1.



- |                      |                    |
|----------------------|--------------------|
| 1 - рабочий шпур     | 5 - газовый баллон |
| 2 - контрольный шпур | 6 - трубопровод    |
| 3 - герметизатор     | 7 - редуктор       |
| 4 - манометр         | 8 - расходомер     |

Рис. 1. Схема к определению коэффициента газопроницаемости

Таблица 1

Результаты опытных измерений

Расстояние от торпедируемого шпура, м	Давление сжатого воздуха в рабочем шпуре, кгс/см <sup>2</sup>	Объемный расход газа, см <sup>3</sup> /сек	Коэффициент газопроницаемости, мДарси
1	2	3	4
<b>в массиве до торпедирования</b>			
	6,5	0,007226	$5,308 \times 10^{-3}$
	7,5	0,012750	$6,993 \times 10^{-3}$
	8,5	0,018370	$7,813 \times 10^{-3}$
1	2	3	4
<b>после торпедирования</b>			
0,8	9	0,236274	$89,498 \times 10^{-3}$
1,0	8,5	0,165085	$70,212 \times 10^{-3}$
1,2	10	0,123581	$37,827 \times 10^{-3}$
1,3	9,5	0,081153	$27,554 \times 10^{-3}$
1,4	9,5	0,035031	$11,894 \times 10^{-3}$
1,5	9,5	0,036205	$12,293 \times 10^{-3}$
1,6	9,5	0,031435	$10,673 \times 10^{-3}$
1,8	9	0,010735	$4,066 \times 10^{-3}$

Таким образом, коэффициент газопроницаемости в массиве до торпедирования равен:  $K = (5,308+6,993+7,813) \times 10^{-3} / 3 = 6,705 \times 10^{-3}$  мДарси (среднее значение).

По результатам экспериментальных исследований согласно методике расчета, содержащейся в технологическом регламенте, определен радиус эффективного трещинообразования при использовании Угленита Э-6 в условиях отработки карналлитового пласта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейко С.С. Газодинамические явления в калийных рудниках: методы прогнозирования и способы предотвращения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во. ПГТУ, 2007. – 208 с.
2. Нестерова С.Ю. Технология дегазации выбросоопасных пород при механизированной выемке карналлита // Изв. вузов. Горн. журн. – 2008. – № 8. – С. 47-52.
3. Технологический регламент механизированной отработки карналлитового пласта В на руднике СКРУ-1 ПАО «Уралкалий». – Пермь;Березники, 2016 г. – 48 с.

УДК 622.831.322

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.86

Д.А. БОБРОВ

*Горный институт УрО РАН*

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОНОСНОСТИ ПОРОД СОЛЯНЫХ И ГЛИНИСТО-КАРБОНАТНЫХ ПАЧЕК, РАСПОЛОЖЕННЫХ ПО ГЕОЛОГИЧЕСКОМУ РАЗРЕЗУ МЕЖДУ III И IV КАЛИЙНЫМИ ГОРИЗОНТАМИ, ПРИ ПРОХОДКЕ ВСКРЫВАЮЩИХ УКЛОНОВ НА ШАХТНОМ ПОЛЕ РУДНИКА 2 РУ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»**

В статье приведены результаты исследований, целью которых являлась количественная оценка показателей газоносности и газодинамических характеристик пород глинисто-карбонатных и соляных пачек, расположенных по геологическому разрезу Старобинского месторождения калийных солей между III и IV калийными горизонтами. Шахтные экспериментальные исследования газоносности и газодинамических характеристик пород глинисто-карбонатных и соляных пачек проводились во вскрывающихся IV калийный горизонт уклонах на шахтном поле рудника 2 РУ ОАО «Беларуськалий». Методикой шахтных экспериментальных исследований предусматривалась количественная оценка следующих показателей: газоносности по свободным газам, начальной скорости газовыделения и давления свободных газов в породах 12, 10, 8 глинисто-карбонатных пачек, а также 11 и 9 соляных пачек.[1-3]

Геологическое строение глинисто-карбонатных пачек в условиях Старобинского месторождения калийных солей характеризуется: частым чередованием прослоев глин с доломито–известковыми глинистыми породами, неслоистых и слабо слоистых пород; наличием слоев песчаников и алевролитов; наличием в верхней части пачек слоев каменной соли, играющих своего рода роль «газонепроницаемых экранов»; наличием в породах пачек органического вещества (до 1%). Все эти особенности геологического строения глинисто-карбонатных пачек позволяют предполагать протекание в толще пород процессов образования свободных газов и, соответственно, формирование приконтактных и очаговых скоплений свободных газов, которые при ведении горных работ – проходке вскрывающихся уклонов, могут быть очагами газодинамических явлений.

Породы 11, 9 и 7 соляных пачек содержат слои и прослои несоляных пород – галопелитов, мощность которых колеблется от долей миллиметров до нескольких десятков сантиметров. К таким галопелитовым слоям и прослоям, как показывает практика ведения горных работ в калийных рудниках, могут быть приурочены приконтактные скопления свободных газов, которые также могут быть очагами таких газодинамических явлений, как внезапные обрушения (разрушения) пород кровли (почвы) горных выработок, сопровождающиеся газовыделением.[4, 5 ]

Для обеспечения безопасности ведения горных работ при проходке вскрывающих уклонов были разработаны временные рекомендации по безопасному ведению горных работ при проходке вскрывающих уклонов по 12, 10 и 8 глинисто-карбонатным пачкам (ГКП) и 11, 9 и 7 соляным пачкам (СП) при вскрытии IV калийного горизонта на шахтном поле рудника 2 РУ ОАО «Беларуськалий», которые включают параметры профилактического дегазационного бурения, параметры буровзрывных работ для торпедирования и дегазации приконтурной части уклонов при появлении предвестников газодинамических явлений, а также рекомендации по контролю предупредительных признаков и предвестников газодинамических явлений.

В процессе проходки вскрывающих уклонов предусмотрено научное сопровождение, заключающееся в проведении научно-исследовательских работ по изучению газоносности и газодинамических характеристик нижележащей толщи пород для своевременной корректировки и уточнению мероприятий по обеспечению безопасной проходки уклонов, вскрывающих IV калийный горизонт на шахтном поле рудника 2 РУ.

Газоносность пород изучалась путем отбора проб и замеров характеристик выделяющихся из исследовательских скважин газов [6, 7]. По мере проходки уклонов, вскрывающих IV калийный горизонт, скважины бурились поинтервально в почву выработки нормально к напластованию пород.

При проходке транспортного, конвейерного и вентиляционного уклонов, вскрывающих IV калийный горизонт на шахтном поле рудника 2РУ, пробурено 14 скважин с целью определения газоносности и газодинамических характеристик пород слоя подстилающей каменной соли и 12 глинисто-карбонатной пачки, а также 5 комплектов по 3 скважины в каждом для исследования газоносности пород 10, 8 глинисто-карбонатных и 11, 9 соляных пачек. Всего в процессе научного сопровождения проходки вскрывающих уклонов было пробурено 29 исследовательских скважин. Распределение показателей газоносности пород по свободным газам и начальной скорости газовой выделению в исследовательских скважинах по геологическому разрезу толщи пород между III и IV калийными горизонтами на шахтном поле рудника 2 РУ представлены на рисунке 1.

Как видно из рисунка, наиболее газоносными являются породы четвертого (верхнего) слоя мощностью 6,1 м 12 глинисто-карбонатной пачки, отнесенной к опасным по газодинамическим явлениям. Газоносность по свободным газам изменяется от  $1,33 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $2,44 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , что в 12-20 раз превышает газоносность других слоев 12 глинисто-карбонатной пачки, расположенных ниже по геологическому разрезу.

К этому же слою приурочены максимумы начальной скорости газовой выделению, которые превышают начальную скорость газовой выделению других пород 12 глинисто-карбонатной пачки, расположенных ниже по геологическому разрезу, в 5-8 раз, а также высока вероятность нахождения скоплений свободных газов, которые в соответствующих горнотехнических условиях могут представлять собой очаги газодинамических явлений.

Газоносность по свободным газам и газодинамические характеристики пород 10 и 8 глинисто-мергелистых пачек существенно ниже показателей 12 глинисто-

карбонатной пачки. Газоносность пород по свободным газам 10 и 8 ГКП изменяется от  $0,10 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $0,25 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Начальная скорость газовыделения свободных газов изменяется в пределах от  $0,03 \text{ л/мин}$  до  $0,41 \text{ л/мин}$ . Давление свободных газов в массиве не превышает  $0,192 \text{ МПа}$ .

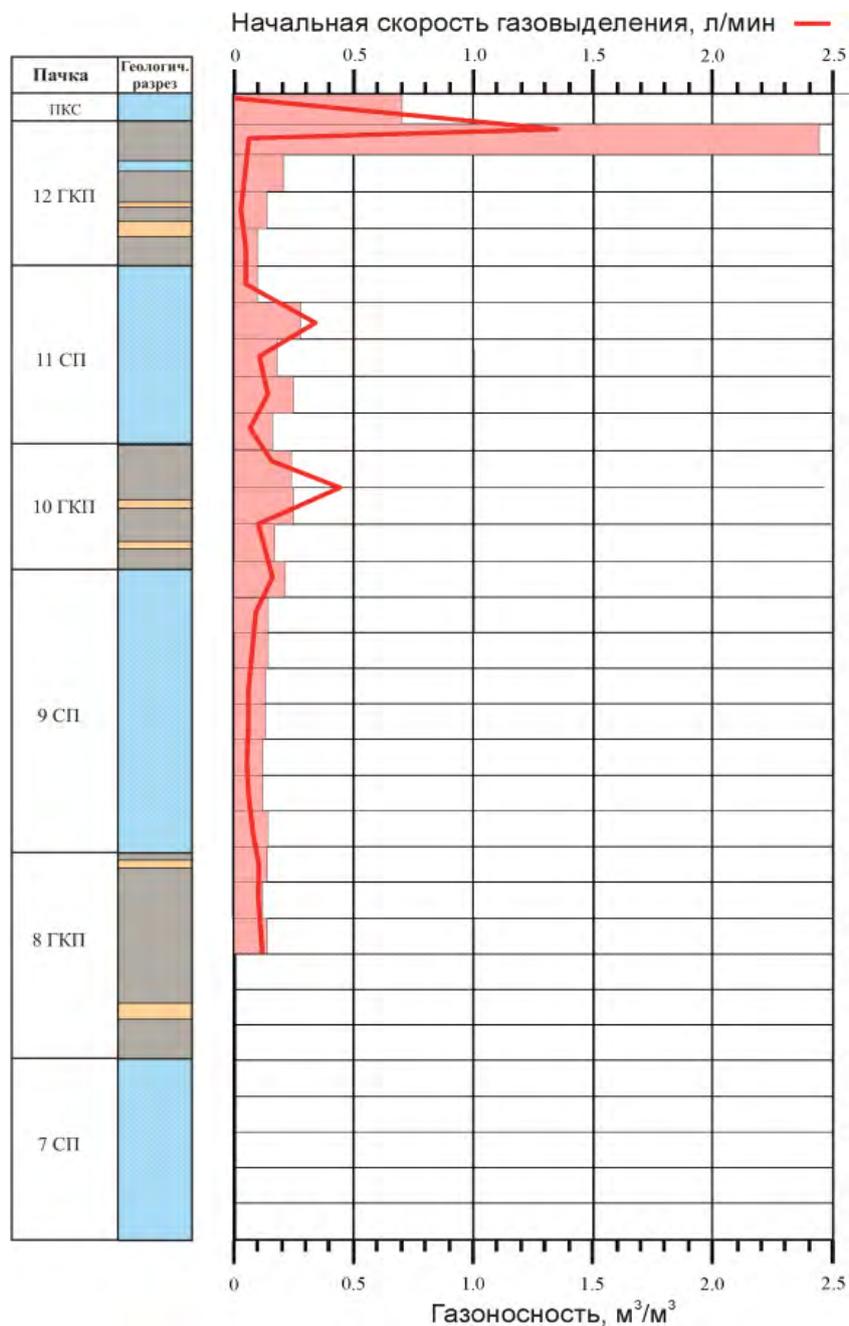


Рис. 1. Газоносность пород и начальная скорость газовыделения в скважинах по разрезу толщи пород между III и IV калийными горизонтами

В породах 11 и 9 соляных пачек газоносность по свободным газам изменяется от  $0,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$  до  $0,29 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , а начальная скорость газовыделения – от  $0,03 \text{ л/мин}$  до  $0,33 \text{ л/мин}$ . При этом максимальные значения газоносности ( $0,29 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) и начальной скорости газовыделения ( $0,33 \text{ л/мин}$ ) приурочены к галопелитовым прослойкам. Давление свободных газов в породах 11 и 9 соляных пачек не превышает  $0,192 \text{ МПа}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуряков Н.М. Управление состоянием массива горных пород. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
2. Андрейко С.С. Газодинамические явления в калийных рудниках: Генезис, прогноз и управление / С.С. Андрейко, П.А. Калугин, В.Я. Щерба; под. ред. В.Я. Прушака. – Минск: Выш. шк., 2000. – 335 с.: ил.
3. Андрейко С.С. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений из почвы при проходке подготовительных выработок в подработанном массиве соляных пород / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Н.А. Литвиновская. – Пермь: изд-во ПНИПУ, 2015. – 159 с.
4. Исследование газоносности пород пласта третьего калийного горизонта Старобинского месторождения / В.А. Тараканов, И.И. Головатый, С.П. Береснев, С.С. Андрейко, О.В. Иванов // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.25-27.
5. Исследование механизма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта / С.П. Береснев, В.В. Сенюк, В.И. Гончар, С.С. Андрейко, Н.А. Литвиновская // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.31-33.
6. Исследование газоносности соляных пород третьего калийного пласта на шахтном поле Краснослободского рудника / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Е.А. Нестеров, И.И. Головатый, С.П. Береснев // Горн. журн. – 2013. – № 6. – С. 69-73.
7. Исследование газоносности продуктивных калийных пластов на новых участках шахтных полей калийных рудников ОАО «Уралкалий» и ОАО «Сильвинит» / С.С. Андрейко, О.В. Иванов, Е.А. Нестеров, Н.А. Литвиновская // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2010. – № 4. – С. 186-190.

УДК 622.831.322

DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.87

Е.В. ЛУКЬЯНЕЦ

*Горный институт УрО РАН*

### **АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРОЯВЛЕНИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В НАДВИГОВЫХ И СДВИГОВЫХ ЗОНАХ НА ШАХТНОМ ПОЛЕ РУДНИКА БКПРУ-2**

Анализ геологических условий газодинамических явлений показал, что практически все случаи интенсивных газовыделений при проходке подготовительных выработок соотносятся со складчатыми и разрывными дислокациями, образующие современный структурный план шахтного поля Березниковского калийного рудоуправления 2 ПАО «Уралкалий».

Поэтому предметом исследования в данной статье являются надвиговые и сдвиговые зоны на шахтном поле рудника БКПРУ-2. Целью работы является изучение механизма формирования зон, опасных по газодинамическим явлениям, в надвиговых и сдвиговых зонах с учетом факторов газоносности и тектонического строения разрабатываемых калийных пластов на шахтном поле рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий».

В процессе выполнения научно-исследовательских работ выполнен анализ и обобщение геологической информации на шахтном поле рудника БКПРУ-2, оцифрованы геологические разрезы, построены детальная структурная карта шахтного поля по пласту АБ и выделены надвиговые и сдвиговые зоны (рис. 1).

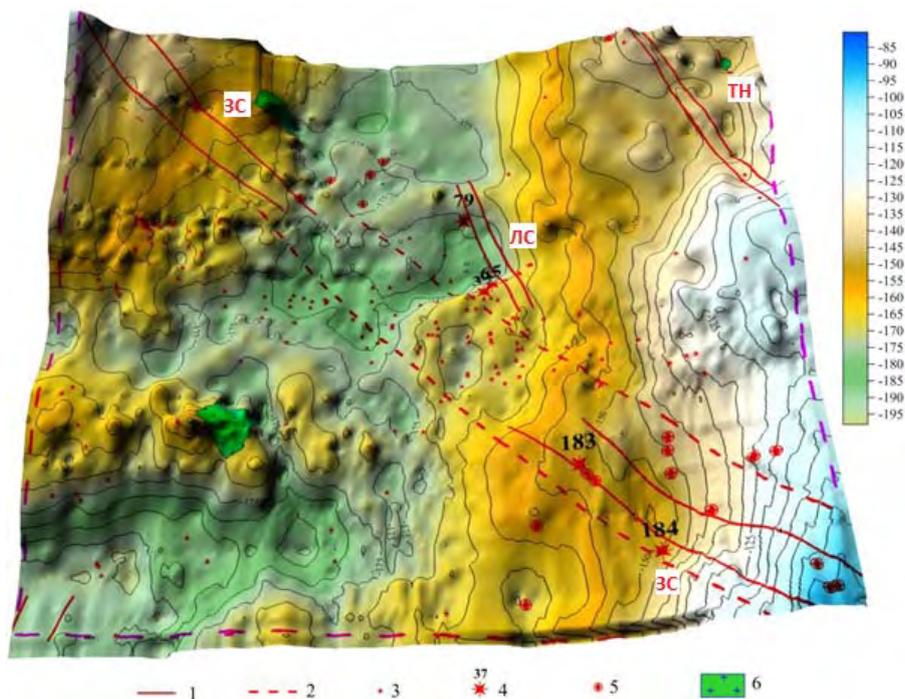


Рис. 1. Рельеф поверхности пласта АБ шахтного поля рудника БКРУ-2:  
 1 – линии сдвига, надвига и сброса; 2 – зона влияния Зырянского сдвига;  
 3 – зафиксированные газодинамические явления; 4 – характерные газодинамические явления из забоя и стенок выработки; 5 – точки повышенной газоносности; 6 – зоны замещения пласта АБ; ТН- Троицкий надвиг; ЛС- листрический сброс;  
 ЗС – Зырянский сдвиг

Общий анализ структурно–тектонических условий в северо-западной части шахтного поля показывает, что на пространственное перераспределение свободных газов в северо-западной части БКРУ-2 могли влиять следующие факторы:

1. Положение самого Зырянского сдвига и зоны его влияния. Зафиксированный разворот простираения складок, примыкающих к сдвиговой зоне, дает основание считать, что прилегающий к нему соляной массив был подвержен деформации, в процессе развития которой могли высвободиться межзерновые и часть внутризерновых газовых включений. Кроме этого сама сдвиговая зона могла служить путем восходящей миграции газонасыщенных водных растворов из подстилающей толщи пород.

2. Пространственное положение границы между участками карналлитового и сильвинитового состава пласта Б, как фронта высвобождения газа при замещении первичных солей вторичными и дегазации газонасыщенных водных растворов.

3. Присутствие крупной зоны галитизации, вскрытой на 14 западной панели и являющейся, вероятно, эпицентром радиальной миграции водных растворов, вызвавших сильвинитизацию карналлитовых пород. Она контролируется пересечением субширотного прогиба и субмеридионального гребня. Вероятно, в местах пересечения подобных структур и формируются субвертикальные зоны перетока водных растворов и высвобожденных при растворении соляных пород газов и дегазации газонасыщенных водных растворов [1-4].

Анализ рельефа поверхности пласта АБ шахтного поля рудника БКРУ-2 показывает, что 4 ГДЯ произошли в зоне Троицкого надвига, 13 - в зоне влияния Листрического сброса, а 42 газодинамических явлений произошло в зоне влияния Зырянского сдвига. В целом можно констатировать, что примерно 90% газодинамических

явлений на пласте АБ приурочено к зонам сдвигов и надвигов. Кроме этого 70 произошедших ГДЯ связано с процессами эпигенетических изменений соляных пород под воздействием агрессивных водных растворов при их латеральной миграции от крупной зоны замещения продуктивных пластов каменной солью, расположенной на 5, 7 и 9 западных панелях рудника БКПРУ-2. На фоне этого можно утверждать о двух механизмах образования очагов газодинамических явлений на БКПРУ-2. Во-первых, формирование части очагов газодинамических явлений связано с процессами эпигенетических изменений соляных пород под воздействием агрессивных водных растворов при их латеральной миграции от зон замещения продуктивных пластов каменной солью. Аккумуляция свободных газов в этом случае происходила, в основном, вблизи контуров развития карналлитовых и смешанных (карналлит + сильвинит) пород пластов АБ, В и других пластов сильвинит-карналлитовой зоны [4].

Во-вторых, механизм образования очагов, приуроченных зонам влияния сдвигов и надвигов связан, по-видимому, с освобождением связанных газов под воздействием деформационных процессов в зонах влияния сдвигов и надвигов и последующей их аккумуляцией в трещинах отрыва и трещин складок (рис. 2).

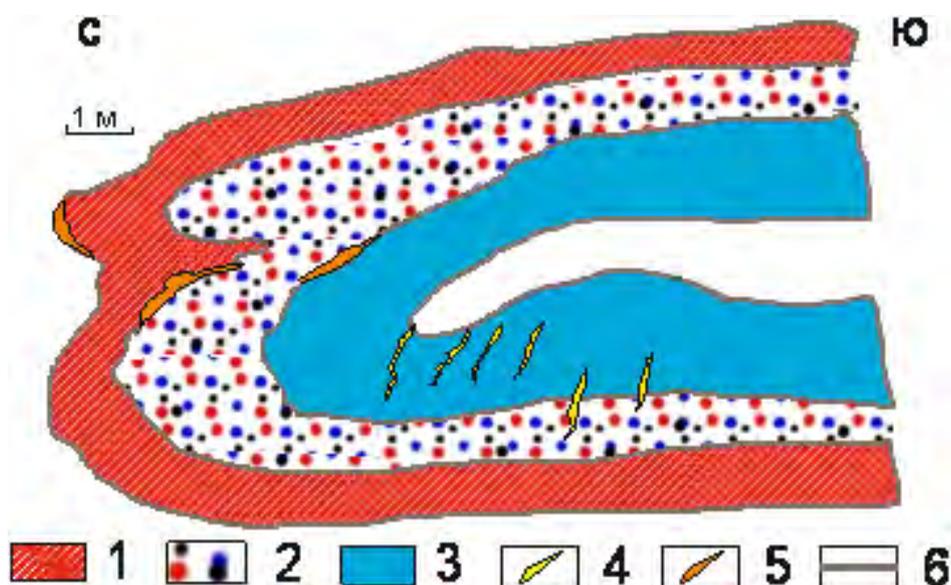


Рис. 2. Схема формирования очагов газодинамических явлений в пределах зон влияния сдвигов и надвигов на шахтном поле рудника БКПРУ-2:

- 1 – пласт А (полосчатый сильвинит); 2 – пласт Б (пестрый сильвинит); 3 – пласт Б-В (каменная соль); 4 – трещины отрыва; 5 - трещины отслоения (складок); 6 – глинистые прослойки

В виду тектонических процессов и процессов складкообразования происходит раскрытие трещин двух видов. Первая группа - трещины отслоения (складок), которые представлены секущими трещинами. Трещины складок по длине сомкнуты, но имеют отдельные участки с раскрытием - от долей до 11 см (среднее 1-1,5 см). Продольные трещины развиты, главным образом, на соляных поднятиях и обычно приурочены к замковым частям антиклинальных и синклиналиных складок. Они обнаружены в интервале пластов от А до Г. Длина трещин колеблется в интервале 0,5-20,0 м, ширина - 2,0-20 см [2]. В процессе формирования выбросоопасных зон складчатые структуры отслоения несут две функции: во-первых, они формируют «газовый коллектор» и зону пониженной прочности пород, во-вторых, собирают газ с окружающих участков пласта по принципу вакуумного насоса [5].

Вторые из представленных на рис. 2 трещин – трещины отрыва, среди которых встречаются как одиночные, так и группы трещин. Длина трещин - первые метры, высота - до 1,7 м, раскрытие - от долей до 11 см (среднее 1-1,5 см). Трещины обычно сухие, реже заполнены рыжеватым рассолом, и тяготеют к пластам каменной соли и участкам развития крупноблочного пестрого сильвинита.

Очевидно, что внутри области соляных пород в интервале от пласта каменной соли КрI-A до пласта В, содержащих свободные газы, возникнет перепад давления – газовая депрессия (геологический вакуум), величина которой будет определяться соотношением давления свободных газов на контуре раскрывшейся геологической трещины и давления в полости раскрывшейся геологической трещины [6]. Известно, что свободные газы в соляном породном массиве находятся макропорах, микротрещинах, трещинах, на границах зерен, в слоях и прослойках соленосных глин, на контактах разностей соляных пород. Поэтому, при превышении давления свободных газов на контуре раскрывающейся геологической трещины над давлением в полости данной трещины по флюидопроводникам (наиболее слабыми контактами – слоями и прослойками соленосных глин, микротрещиноватостью пород и границами зерен) начнется приток свободных газов из окружающего соляного породного массива в секущую трещину. Таким образом, раскрывшаяся трещина концентрирует в себе свободные газы, а замкнутость полости трещины будет препятствовать транзиту свободных газов как вверх по геологическому разрезу, так и в латеральном направлении.

Таким образом, на шахтном поле рудника БКПРУ-2 прослеживается приуроченность очагов газодинамических явлений и участков с повышенной газоносностью пород пласта АБ к зонам формирования тектонических структур, в т.ч. в зонах влияния сдвигов и надвигов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейко С.С. Механизм образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 196 с.
2. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН; [отв. ред. В.И. Раевский]. – Пермь: [Соликам. тип.], 2001. – 429 с.: ил.
3. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с.
4. Андрейко С.С. Анализ факторов газоносности и тектонического строения сильвинитовых пластов в надвиговых и сдвиговых зонах шахтных полей рудников БКПРУ-2 и БКПРУ-4 ПАО «Уралкалий» / Андрейко С.С., Лукьянец Е.В. // Вестн. Кузбасского гос. технич. ун-та. – 2017. – № 6. – С. 31-41.
5. Копнин В.И. Структурно-тектонические условия газодинамических явлений на Березниковских калийных рудниках и вопросы прогнозирования выбросоопасных зон / Копнин В.И., Пшеничников А.Г. // Разработка калийных месторождений: Межвуз. сб. науч. тр. –Пермь, 1984. – С.96-99.
6. Нестеров Е.А. Механизм образования внезапных отжимов призабойной части пород в соляном породном массиве // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 244-246.

Д.Г. ЗАКИРОВ, М.А. МУХАМЕДШИН  
*Горный институт УрО РАН*  
**ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ ЭКОНОМИКИ ПЕРМСКОГО КРАЯ,  
РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ**

Энергоемкость Российской экономики в 2-2,5 раза выше, чем в передовых странах мира. В себестоимости выпускаемой продукции доля энергетической составляющей в среднем в регионе 15%, а на крупных энергоемких производствах достигает до 50%, что отрицательно влияет на конкурентоспособность выпускаемой продукции. [1]

Президентом России поставлена задача к 2020 году снизить энергоемкость ВВП не менее, чем на 40% от уровня 2007 года.

Федеральный закон № 261 ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» предписывает ряд мер энергопотребителям, энергопроизводителям бюджетной сферы и ЖКХ для выполнения данного задания. [2]

Для снижения энергоемкости на промышленных предприятиях нашим институтом особое внимание уделялось научно-исследовательской работе и разработке эффективных технологий по повышению энергетической эффективности.

Нами разработаны научные основы создания энергоэффективной экономики Пермского края, комплексная инновационная система управления энергоэффективностью и экологизации производства, программа внедрения собственных автономных источников энергоснабжения.

Разработанная инновационная система управления энергоэффективности получила признание со стороны МинПромЭнерго России, Комитета по возобновляемым источникам энергии Союза научных инженерных организаций и рекомендована для внедрения в других регионах России. [5].

Ежегодно организовывались и проводились Международные и Российские конференции, направленные на повышение энергетической эффективности, выполнен ряд издательских проектов, 18 лет выпускался ежеквартальный журнал «Энергосбережение, проблемы энергетики Западного Урала», удостоенный премии Международной выставки и внесен в «Золотой фонд прессы».

Была проведена большая научно-техническая и издательская работа. В 2000 году написано и издано учебное пособие «Энергосбережение», в 2002 году научное издание «Пермская область на пути к энергоэффективной экономике, в 2007 году «Управление энергоэффективностью в регионе», в 2012 году книга «Энергетика. Энергоэффективность. Известные энергетики». Изданы тезисы докладов Международных и межрегиональных научно-практических конференций.

Совместно с Ассоциацией энергетиков Западного Урала и НП «Сотрудничество» в течение 20 лет проводилась большая организационная, информационная работа, мониторинг проводимой работы. На всех предприятиях входящих в состав Ассоциации энергетиков Западного Урала и НП «Сотрудничество» неоднократно были проведены энергетические аудиты, разработаны Программы энергосбережения, внедрены автоматизированные системы учета потребления энергоресурсов, новые энергосберегающие технологии и оборудование, строятся автономные источники энергии.

Организуется и проводится ежегодный конкурс на «Лучшее энергоэффективное предприятие Западного Урала», «Лучшую энергосервисную компанию», «Лучший энергетик Западного Урала».

Разработаны меры морального поощрения бережливых людей награждением медалью Ассоциации энергетиков Западного Урала «За вклад в повышение энергоэффективности в регионе».

Благодаря активной совместной работе с Правительством Пермского края достигнуты хорошие результаты, значительно снижается энергоемкость производства, что подтверждается в государственном докладе «О состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности».

Темпы снижения энергоемкости ВРП кг. у. т./10 тыс. руб. в Пермском крае самые высокие по сравнению с нашими соседями и передовыми регионами РФ. Данные представлены в таблице [3].

Таблица

Наименование	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	Снижение за 4 года	Процент снижения
Нижегородская область	247	234	203	179	68	27,53
Пензенская область	177	153	153	138	29	16,3
Республика Башкортостан	232	227	214	199	33	14,2
Республика Марий Эл	211	197	159	131	80	37,9
Республика Мордовия	264	234	228	174	90	34,09
Республика Татарстан	184	153	144	124	60	32,6
<b>Пермский край</b>	<b>328</b>	<b>308</b>	<b>217</b>	<b>191</b>	<b>137</b>	<b>41,76</b>
Самарская область	278	249	255	203	75	26,97
Саратовская область	244	215	194	168	76	31,15
Удмуртская республика	168	187	166	141	27	16,07
Ульяновская область	210	191	176	161	49	23,3
Чувашская республика	194	180	173	157	37	19,07
Свердловская область	263	238	212	195	68	25,85
Челябинская область	460	423	376	312	148	32,17

По темпам снижения энергоемкости ВРП Пермский край перевыполнил задание, установленное Президентом РФ досрочно. По данным показателям 2015 года снизилась энергоемкость ВРП более, чем на 50% по сравнению с 2007 годом. В 2007 году энергоемкость ВРП Пермского края составляла 390 кг у.т./10 тыс. рублей.

Пермский край занимает одно из первых мест по России. Это подтверждается в сводном анализе мониторинга реализации Государственной политики на региональном уровне (стр. 114) государственного доклада «О состоянии энергосбережения и повышения энергетической эффективности», в котором отмечено, что наиболее значительное сокращение энергоемкости ВРП в текущих ценах составило в Пермском крае. [3]

В рамках мониторинга государственной политики на региональном уровне Минэнерго РФ был произведен комплексный анализ реализации государственной политики в области энергосбережения и энергетической эффективности, в котором рассматрива-

лись следующие ключевые направления государственной политики на региональном уровне:

- система управления;
- технологическое регулирование;
- популяризация и пропаганда;
- механизмы поддержки реализации государственной политики;
- технические параметры.

При активной, целенаправленной работе, внедрении передовых технологий и разработок можно значительно снизить энергоемкость производства.

В 2017 году по результатам проведенных многолетних исследований и выполненной работы издана книга «Многолетний опыт повышения энергоэффективности на предприятиях Западного Урала. Известные энергетики промышленных предприятий» [7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики: Указ президента РФ от 4 июня 2008 г. № 889.
2. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»: принят Гос. Думой 11.11.2009, одобрен СФ 18.11.2009, № 261-ФЗ.
3. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2016 г. / Минэнерго России. – М., 2017. –
4. Закиров Д.Г. Пермская область: на пути к энергоэффективной экономике. – Пермь, 2002. – 300 с. – (Промышленность Прикамья в XXI веке)
5. Закиров Д.Г. Управление энергоэффективностью в регионе. – Пермь: Астер, 2007. – 382 с.
6. Закиров Д.Г. Энергетика. Энергоэффективность. Известные энергетики: [посвящ. 70-летию образования Перм. Энергосистемы и 15-летию создания Ассоц. Энергетиков Зап. Урала]. – Пермь: ИПК «Звезда, 2012 – 543 с.: ил.
7. Закиров Д.Г. Многолетний опыт повышения энергоэффективности на предприятиях Западного Урала. Известные энергетики промышленных предприятий. – Пермь, 2017. – 464 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

<b>Чайковский И.И.</b> Новый генетический тип рассолов Верхнекамского месторождения .....	3
<b>Коротченкова О.В.</b> Минералогические особенности соляных пород Гремячинского месторождения калийных солей .....	8
<b>Чиркова Е.П.</b> Марганцевый и медный минералого-геохимические рубежи в разрезе подстилающей соли Верхнекамского месторождения .....	12
<b>Горбунов А.А., Пузик А.Ю.</b> Сульфиды платиновых металлов Сарановского месторождения .....	15
<b>Фадеева Т.В.</b> О находках кокколитов в солях Верхнекамского месторождения .....	21
<b>Мирошниченко С.А.</b> Использование ГИС технологий при решении задач разработки водохозяйственного баланса для крупного нефтеперерабатывающего предприятия .....	23
<b>Тиунов А.А.</b> Особенности гидродинамического моделирования русловых процессов (на примере р. Чепца в районе пос. Балезино) .....	26
<b>Лаврова Н.В.</b> Гидратационные процессы в Кунгурской Ледяной пещере .....	30
<b>Богомаз М.В.</b> Уточнение плана и морфометрических показателей Кунгурской Ледяной пещеры.....	31
<b>Казанцева А.С.</b> О формировании химического и изотопного состава подземных вод на границе Ксенофоновского и Соликамского карстовых районов .....	37
<b>Красиков А.В.</b> Структурные элементы грота Длинный в Кунгурской Ледяной пещере .....	41
<b>Глоба К.Н.</b> Маркшейдерский мониторинг в Кунгурской Ледяной пещере .....	46
<b>Бачурин Б.А.</b> Геохимические аспекты техногенеза Кизеловского угольного бассейна.....	48
<b>Фетисова Н.Ф.</b> Оценка естественной нейтрализации кислых шахтных вод в условиях Коспашского месторождения Кизеловского угольного бассейна.....	52
<b>Одинцова Т.А.</b> Генетические разности битумоидов солей Верхнекамского месторождения.....	55
<b>Борисов А.А.</b> Вариации диоксида углерода в почвенных газах Пермского Прикамья.....	60
<b>Сметанников А.Ф., Оносов Д.В., Оносова Е.Ф.</b> Результаты применения комплексных удобрений пролонгированного действия для зерновых культур, многолетних трав и картофеля .....	64
<b>Борисов А.С.</b> Особенности распределения золота в терригенно-карбонатных комплексах на Западном склоне Урала.....	70
<b>Пузик А.Ю.</b> Изучение хвостов обогащения руд Сарановской шахты «Рудная» на главном Сарановском месторождении.....	74

### МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

<b>Барях А.А.</b> Актуальные задачи геомеханики Верхнекамского месторождения солей .....	78
<b>Самоделкина Н.А.</b> Упругопластическое деформирование слоистых породных массивов .....	82
<b>Лобанов С.Ю.</b> Геомеханическое обоснование безопасных условий отработки сближенных силвинитовых пластов.....	85

<b>Телегина Е.А.</b> Влияние глубины ведения горных работ на извлечение калийной руды из недр .....	90
<b>Федосеев А.К.</b> О подходах к геомеханическому описанию газодинамических явлений в слоистом газонасыщенном соляном массиве .....	96
<b>Девятков С.Ю.</b> Обоснование условий образования провалов на земной поверхности при аварийных затоплениях калийных рудников .....	98
<b>Ломакин И.С.</b> Описание некоторых локальных эффектов развития процессов сдвижения земной поверхности.....	101
<b>Цаюков А.А., Ломакин И.С.</b> О деформационном критерии оценки устойчивости междукамерных целиков .....	106
<b>Асанов В.А.</b> Экспериментальное обеспечение проектирования параметров системы разработки на шахтных полях Верхнекамского месторождения калийных солей .....	110
<b>Паньков И.С.</b> О методе теоретической оценки величины бокового распора при действии тектонических сил в массиве горных пород .....	114
<b>Токсаров В.Н.</b> Восстановление ориентировки осей главных напряжений в породном массиве Сарбайского карьера по результатам изучения трещиноватости .....	119
<b>Аникин В.В.</b> Геомеханическое обоснование безопасности строительства промышленного объекта (газопровода), расположенного в зоне подработки в пределах б ЗП и блоков 4, 5, 6 шахтного поля рудника БКПРУ-1 .....	122
<b>Евсеев А.В.</b> Обоснование рациональных схем отработки силвинитовых пластов в условиях высокого содержания глины .....	125
<b>Ударцев А.А.</b> Использование оптической системы VIC-3D для изучения полей деформаций при испытании образцов горных пород.....	128
<b>Кузьминых В.С.</b> Построение паспортов прочности по результатам многоступенчатых испытаний на сдвиг со сжатием образцов Якшинского месторождения .....	132
<b>Морозов И.А.</b> Метод объемного многоступенчатого нагружения как инструмент определения прочностных характеристик соляных пород .....	135

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

<b>Бычков С.Г.</b> Аномальные временные ряды записи гравиметров .....	140
<b>Геник И.В.</b> Статистические характеристики геофизических полей и их взаимосвязи при региональных работах на нефть и газ .....	143
<b>Долгаль А.С.</b> Элементы искусственного интеллекта в монтажном методе интерпретации гравитационных аномалий.....	146
<b>Мичурин А.В.</b> Комплексная интерпретация геофизических данных при поисках медно-порфирового оруденения .....	150
<b>Новикова П.Н.</b> Применение микромагнитной съемки для обнаружения подземного коллектора .....	153
<b>Простолупов Г.В.</b> Оптимальные параметры реализации метода Polus2d при решении обратной задачи гравиметрии.....	156
<b>Симанов А.А.</b> Гравиметрический мониторинг карстово-суффозионных процессов в районах интенсивного освоения недр .....	161
<b>Чадаев М.С.</b> Вертикальное проецирование аномального гравитационного поля в системе ВЕКТОР .....	163
<b>Щербинина Г.П.</b> Реконструкция тектонических элементов по результатам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных .....	167
<b>Шулаков Д.Ю.</b> Использование скважинных датчиков для повышения регистрационных возможностей локальных сейсмических сетей .....	173

<b>Блинова Т.С.</b> Выделение геодинамически неустойчивых зон Южного Предуралья .....	176
<b>Баранов Ю.В.</b> Микросейсмический мониторинг развития зон трещиноватости при гидроразрыве пласта .....	179
<b>Бутырин П.Г.</b> Технологический максимум. Итоги разработки и эксплуатации сейсмического регистратора «Ермак-5» за 2017-2018 годы .....	181
<b>Верхоланцев А.В.</b> Анализ факторов, влияющих на величину сейсмического воздействия взрывных работ .....	184
<b>Некрасова Л.В.</b> Влияние ротационного режима Земли на сейсмичность на рудниках и шахтах .....	188
<b>Санфиоров И.А., Нежданов А.В.</b> Обоснование интегральных сейсморазведочных оценок техногенной изменчивости физических свойств породного массива .....	190
<b>Ярославцев А.Г.</b> Методические особенности малоуглубинной сейсморазведки 3D на потенциально опасных участках ВКМКС .....	193
<b>Никифорова А.И.</b> Точность структурных построений по результатам малоуглубинных сейсмических исследований в сложных геологических условиях .....	196
<b>Жикин А.А.</b> Сравнительный анализ идеологии цифровой обработки разнообъектных малоуглубинных сейсморазведочных исследований на месторождениях твердых полезных ископаемых .....	200
<b>Герасимова И.Ю.</b> Моделирование волновых полей для условий Верхнекамского месторождения калийных солей .....	203
<b>Никифоров В.В.</b> Детализация особенностей инженерно-геологического строения на участке ускоренных оседаний .....	206
<b>Бабкин А.И.</b> Применение разноуровневых поверхностных и шахтных сейсмоакустических исследований на участках ускоренных оседаний земной поверхности .....	210
<b>Семерикова И.И.</b> Изучение волновых процессов в массиве трещиноватых пород сейсмическими методами .....	213
<b>Тарантин М.В.</b> О повышении точности скоростного анализа при обработке данных сейсморазведки .....	218
<b>Фатькин К.Б.</b> Прогноз типа насыщения нарушенных зон водозащитной толщи с использованием AVO-анализа .....	221
<b>Байбакова Т.В.</b> Примеры интерпретации сейсморазведочных данных при изучении сложных геологических объектов в пределах ВКМКС .....	224
<b>Бобров В.Ю.</b> Оценка информационных возможностей процедур группирования в малоуглубинной сейсморазведке .....	227
<b>Тайницкий А.А.</b> Решение обратной задачи ВЭЗ методом минимизации эмпирического риска для группы зондирований .....	230
<b>Христенко Л.А.</b> Метод эмпирической модовой декомпозиции при выделении информативных компонент результатов электропрофилирования .....	233
<b>Паршаков Е.И.</b> Использование статистических характеристик и методов безэталонной классификации при интерпретации результатов электропрофилирования .....	238
<b>Ширяев К.Н.</b> Граф обработки данных мониторинговых электрометрических наблюдений .....	240

#### РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

<b>Казаков Б.П.</b> Направления совершенствования теплообменных аппаратов в системах подготовки и кондиционирования рудничного воздуха .....	245
--	-----

<b>Исаевич А.Г.</b> Исследование пылевой обстановки на рудниках ОАО «Беларуськалий», опыт снижения запыленности атмосферы рабочих мест .....	249
<b>Гришин Е.Л., Трушкова Н.А.</b> Обеспечение безопасности ведения горных работ в современных условиях добычи полезных ископаемых .....	254
<b>Зайцев А.В.</b> Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем нормализации теплового режима глубоких рудников.....	257
<b>Семин М.А.</b> Разработка численного метода решения двумерной обратной задачи Стефана применительно к проблеме контроля состояния ледопородного ограждения .....	262
<b>Паршаков О.С.</b> Контроль и управление состоянием ледопородных ограждений при строительстве шахтных стволов.....	266
<b>Пугин А.В.</b> Исследование динамики тепловых полей при размораживании ледопородных ограждений строящихся стволов.....	272
<b>Кормщиков Д.С.</b> Разработка технических решений системы контроля отклонений проводников ствола .....	275
<b>Мальцев С.В.</b> Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции.....	277
<b>Шалимов А.В.</b> Система интерактивной обработки результатов воздушно-депресссионной съёмки рудников.....	282
<b>Накаряков Е.В.</b> Особенности проветривания калийных рудников при подземном размещении главных вентиляторных установок.....	287
<b>Колесов Е.В.</b> Обоснование последовательного проветривания рабочих зон нескольких тупиковых выработок.....	291
<b>Кашников А.В.</b> Применение нечеткой логики при реализации систем автоматического управления проветриванием .....	296
<b>Андрейко С.С.</b> Проблема газодинамических явлений при совершенствовании технологии слоевой выемки Третьего калийного пласта в условиях Старобинского месторождения калийных солей .....	300
<b>Алыменко Н.И.</b> Проветривание рудника «Каральвеем» .....	307
<b>Иванов О.В.</b> Результаты исследований газоносности и газодинамических характеристик пород в выработках околоствольного двора рудника Гремячинского ГОКа.....	313
<b>Каменских А.А.</b> Рекомендации по совершенствованию схемы проветривания рудника «Молодежный».....	316
<b>Литвиновская Н.А., Бобров Д.А.</b> Исследования в различных геологических и горнотехнических условиях динамики изменения во времени давления свободных газов в породах почвы подготовительных выработок в рудниках ОАО «Беларуськалий».....	320
<b>Нестеров Е.А., Мальцев В.М.</b> Экспериментальное определение радиуса зоны эффективного трещинообразования при торпедировании карналлитового пласта .....	324
<b>Бобров Д.А.</b> Результаты исследования газоносности пород соляных и глинисто-карбонатных пачек, расположенных по геологическому разрезу между III и IV калийными горизонтами, при проходке вскрывающих уклонов на шахтном поле рудника 2 РУ ОАО «Беларуськалий».....	326
<b>Лукьянец Е.В.</b> Анализ структурно-тектонических условий проявления газодинамических явлений в надвиговых и сдвиговых зонах на шахтном поле рудника БКПРУ-2 .....	329
<b>Закиров Д.Г., Мухамедшин М.А.</b> Исследование, разработка и создание научных основ энергоэффективной экономики Пермского края, результаты внедрения.....	333

Научное издание

**СТРАТЕГИЯ И ПРОЦЕССЫ  
ОСВОЕНИЯ ГЕОРЕСУРСОВ**

**Сборник научных трудов**

**Выпуск 16**

Ответственный за выпуск  
*к.г.-м.н. Степанов Ю.И.*

Техническое редактирование,  
компьютерная верстка  
*Баталин А.Б.*

НИСО УрО РАН № 16  
Подписано в печать 25.07.2018 г. Формат 60x84 1/8

Тираж 300 экз.

Отпечатано сектором научно-технической информации  
ГИ УрО РАН  
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а