

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

Главный редактор

академик РАН, д.т.н., проф. А.А. Барях

Зам. главного редактора

д.г.-м.н. С.Г. Бычков

Ответственный секретарь

д.т.н. М.А. Семин

Редакционная коллегия

д.т.н., проф. С.С. Андрейко, д.г.н. О.И. Кадебская,

д.т.н. Л.Ю. Левин, д.г.н. А.П. Лепихин,

академик РАН, д.т.н., проф. В.П. Матвеевко,

д.т.н., проф. И.А. Санфиоров, д.г.-м.н. И.И. Чайковский

ISSN 2658-5227

СОДЕРЖАНИЕ

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

Базарова Е.П., Кадебская О.И., Коротченкова О.В., Силушкина Э.А.

Первые данные о криоминеральных образованиях пещеры Трофимовская (Иркутская область).....	3
<i>Бортников М.П.</i> Голубое озеро в Самарской области	8
<i>Наугольных С.В., Наумкин Д.В.</i> Графические реконструкции в геолого-палеонтологической экспозиции музея Карста и спелеологии Горного института УрО РАН (на примере трилобита <i>Parasegaurus</i> из ордовика Прибалтики).....	18
<i>Наумкин Д.В., Богомаз М.В.</i> Карты и планы Кунгурской Ледяной пещеры. Картографическое наследие трех веков	25
<i>Сохин М.Ю.</i> Результаты обследования юго-западного шахтного поля Яныш-Такильских каменоломен	36
<i>Тиунов А.А.</i> Вычислительный эксперимент по формированию обратных течений в верхней части Воткинского водохранилища (нижний бьеф Камского водохранилища)	44

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

<i>Мальцев В.М., Аникин В.В.</i> Зависимость импульса взрыва шпурового заряда от величины радиального зазора для патронов ВВ стандартного диаметра.....	54
<i>Поспелов Д.А., Токсаров В.Н.</i> Результаты скважинных испытаний по определению деформационных свойств горных пород в условиях глубокого калийного рудника	59

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

<i>Бобров В.Ю.</i> Опробование импульсного механизированного источника упругих колебаний с опытным молотом	65
<i>Герасимова И.Ю.</i> Применение данных метода первых волн для уточнения скоростного закона в верхнем интервале малых глубин	72
<i>Долгаль А.С.</i> Истокообразная аппроксимация региональных аномалий силы тяжести	77
<i>Зубрикова Е.С., Лучников М.С.</i> Локализация горизонтов-коллекторов в надсолевой толще пород методом сопротивлений с целью закачки избыточных рассолов	86

<i>Иванов Л.А., Туманов В.В.</i> Построение геоэлектрического разреза скопления свободного метана в трещинном коллекторе по данным петрофизики угленосных формаций.....	91
<i>Иванов Л.А.</i> Об условиях микросейсмического излучения отдельно взятого разлома в связи с выявлением аномальных скоплений метана	99
<i>Новикова П.Н.</i> Многоэтапное прогнозирование геомагнитных вариаций	113

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

<i>Андрейко С.С.</i> Газодинамические явления при проходке подготовительных горных выработок во вмещающих породах в подземном руднике «Удачный»	118
<i>Литвиновская Н.А.</i> Газоносность и газодинамические характеристики пород кровли подготовительных выработок, пройденных в выработанном пространстве камерной системы разработки на третьем калийном пласте рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий».....	128
<i>Лядов В.О.</i> Компонентный состав свободных газов в породах пласта калийно-магниевых солей в условиях Гремячинского ГОКа.....	133
<i>Папулов А.С.</i> Оценка влияния нефтяных месторождений на газоносность по свободным газам соляных пород в условиях шахтного поля рудника ООО «Еврохим-Усольский калийный комбинат»	138
<i>Пересторонин М.О.</i> Оценка эффективности снижения температуры воздуха в тупиковых забоях рудников Норильского промышленного района за счет использования водолеяной смеси	144
<i>Пугин А.В., Богомяков А.В., Оглоблина А.А., Агеева К.М.</i> Особенности эксплуатации ледопородного ограждения в условиях действующего рудника.....	152
<i>Стариков А.Н.</i> Исследование неравномерности газовыделения для определения газообильности рабочих зон на рудниках ВМКМС.....	158

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.4

DOI:10.7242/echo.2023.1.1

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О КРИОМИНЕРАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ ПЕЩЕРЫ ТРОФИМОВСКАЯ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Е.П. Базарова¹, О.И. Кадебская², О.В. Коротченкова², Э.А. Силушкина³

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск

²Горный институт УрО РАН, г. Пермь

³Восточно-Сибирский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации

Аннотация: Оледенение в Трофимовской пещере носит сезонный характер. Ледяные образования имеют мерзлотный и сублимационный генезис. Криоминеральные образования представлены мелкозернистыми формами (криогенная мука) и сложены карбонатными минералами (кальцит, лансфордит). Образование лансфордита связано с переотложением магния, содержащегося во вмещающих алевролитах, с доломитовым цементом. Криогенная мука была образована путем быстрого замораживания раствора. Слабое развитие криоминеральных образований на поверхности ледяных форм связано с низкой соленостью раствора, что, по-видимому, обусловлено образованием сезонных ледяных образований исключительно за счет конденсационных вод.

Ключевые слова: пещеры, пещерные отложения, криогенез, лансфордит.

Пещера Трофимовская находится в северных предгорьях Восточного Саяна в верховьях р. Уныл (правый приток р. Уды). Исследование пещеры было начато в 1995 г. спелеологами Иркутского областного спелеоклуба, ранее полость посещалась местными жителями. В данной работе впервые приводится характеристика ледяных и связанных с ними криоминеральных образований п. Трофимовская.

Отбор проб проводился во время тренировочно-исследовательского выезда зимой 2019 г. (руководитель Э.А. Силушкина). Были взяты образцы вмещающих пород, ледяных и криоминеральных образований. Содержания петрогенных компонентов определялись в ЦКП Института земной коры СО РАН в г. Иркутске методом силикатного анализа аналитиком М.М. Самойленко; химический состав пещерного льда определялся методами титриметрии, гравиметрии и атомно-адсорбционной спектроскопии аналитиком Л.А. Дурбан. Исследование морфологии и химического состава криоминеральных образований проводилось в Горном институте УрО РАН в г. Пермь на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350/X-max 20. Образцы после высушивания при комнатной температуре напылялись углеродом и исследовались в камере с высоким вакуумом.

Вход в п. Трофимовская расположен на крутом залесенном склоне и представляет собой воронку с отвесными стенами размером 40 на 16 м и глубиной 29 м (рис. 1а), на дне которой находится конус, сложенный глыбами и щебнем вмещающих пород. В южной части воронки расположено озеро размером 8 на 5 м (глубина не измерялась). На момент посещения пещеры в январе 2019 г. озеро было замерзшим. Под северной стеной воронки находится щелевидный проход в подземную часть карстовой системы. Протяженность пещеры составляет 512 м при амплитуде 86 м (по данным А.Г. Докучаева и В.Н. Реутского, 1996 г.). Подземная часть системы представляет собой наклонную галерею шириной до 20 м и высотой до 8 м при средней ширине и высоте 10 и 5 м, соответственно, с двумя небольшими ответвлениями. На полу галереи наблюдается большое количество обломочно-

го материала, в пониженных местах пол покрыт глиной. На отдельных участках стен встречаются небольшие натечные коры и кораллиты.

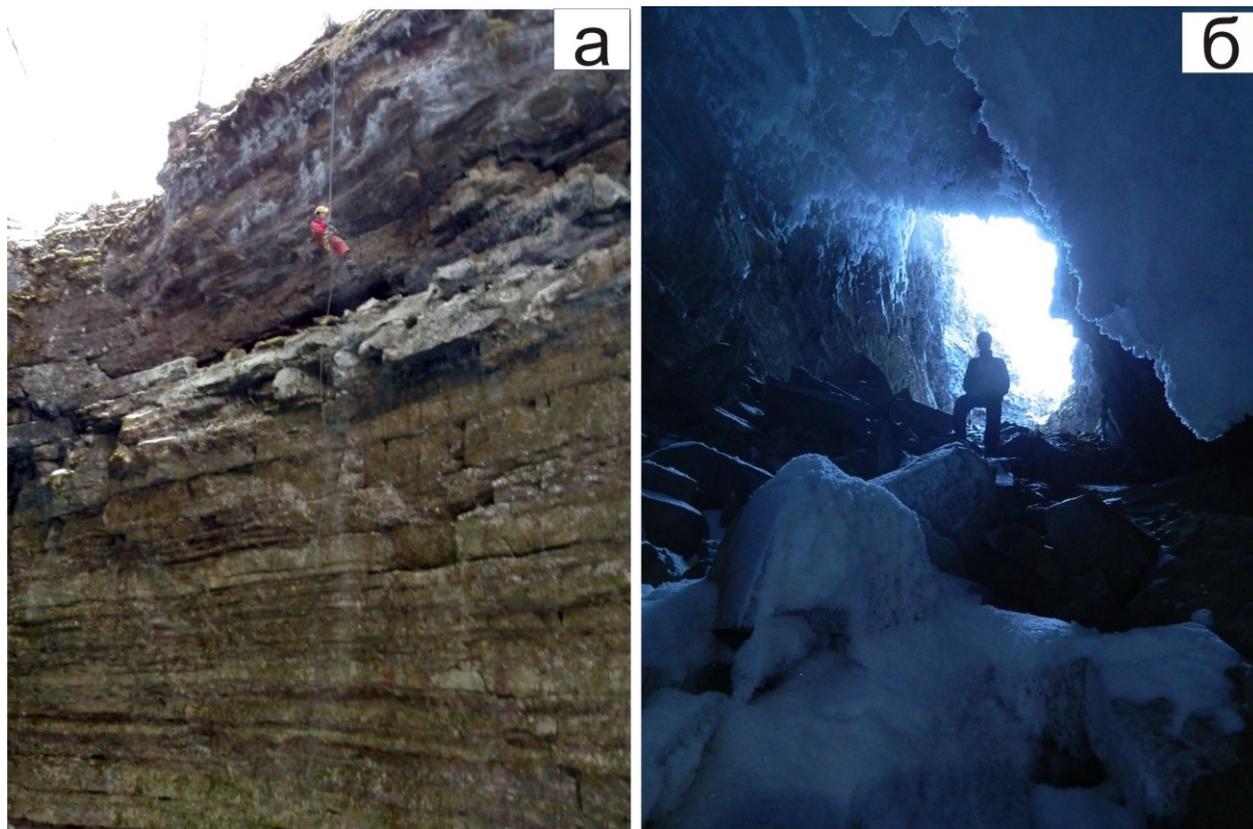


Рис. 1. Западная стена входной воронки (а) и привходовая часть пещеры, обильно покрытая кристаллами сублимационного льда (б). Авторы фото: Е.Ю. Распопов (а), Е.П. Шумкина (б)

Пещера заложена в породах тагульской свиты верхнего рифея, представленных переслаиванием доломитов, песчаников и алевролитов [1]. Химический состав вмещающих пород приводится в таблице 1. Образцы сложены преимущественно кварцем, полевым шпатом и доломитом. В алевролитах доломит обычно образует мелкозернистый цемент, в который погружены остроугольные обломки кварца и полевого шпата, иногда зерна доломита слагают отдельные прожилки в породе. В некоторых случаях вместо доломита роль цемента в алевролитах выполняет гетит, и в химическом составе таких образцов повышено содержание железа (табл. 1, обр. 1).

Постоянные водотоки в пещере отсутствуют, но в дальней части отмечаются небольшие лужи и наносы почвы с растительными остатками, указывающие на присутствие временного водотока. По-видимому, в период дождей и снеготаяния поверхностные воды стекают в дальнюю часть галереи по системе трещин (на существование трещин, сообщающихся с поверхностью, также указывает широко развитая в дальней части галереи зимой изморозь и маломощные ледяные коры). В зимний период вода в пещере имеет конденсационное происхождение.

Вследствие проникновения холодного воздуха по трещинам п. Трофимовская характеризуется весьма интенсивным воздухообменом с поверхностью. Зимой 2019 г. ток воздуха из полости был настолько силен, что в безветренный день наблюдалось покачивание веток кустарника над входным отверстием. Выходящий из пещеры влажный воздух способствует формированию на стенах и потолке в

привходовой части массивных отложений сублимационного льда, которые, осыпаясь, образуют сугробы на полу (рис. 1б).

Таблица 1

Химический состав вмещающих пород п. Трофимовская (мас. %)

Компоненты	Номера образцов			
	1	2	3	4
SiO ₂	50,31	57,29	51,73	59,94
TiO ₂	0,52	0,89	0,25	0,93
Al ₂ O ₃	13,88	10,98	4,9	19,92
Fe ₂ O ₃	6,12	0,4	1,09	1,78
FeO	0,67	0,42	0,49	0,36
MnO	0,45	0,05	0,2	<нпо
MgO	0,69	3,84	7,65	1,8
CaO	7,44	6,68	11,61	0,35
Na ₂ O	0,05	0,09	0,09	0,06
K ₂ O	11,03	8,78	4,57	11,37
P ₂ O ₅	4,76	0,39	0,18	0,21
H ₂ O ⁻	0,37	0,11	<нпо	0,17
ппп	1,95	1,24	0,55	2,94
CO ₂	1,12	9,08	16,56	0,13
Сумма	99,37	100,23	99,87	99,96

Примечание. 1 – алевролит с гетитовым цементом, 2 – 3 – доломитистый алевролит, 4 – алевролит; <нпо – содержание компонентов ниже предела обнаружения. Пределы обнаружения петрогенных окислов (мас. %): TiO₂ – 0,02, Al₂O₃ – 0,25, MnO – 0,01, K₂O – 0,01, Fe₂O₃ – 0,2, FeO – 0,02, P₂O₅ – 0,03, H₂O⁻ – 0,01, потери при прокаливании (ппп) – 0,02.

Вследствие своей морфологии пещера характеризуется относительно четкой микроклиматической зональностью: выравнивающая (I), переходная (II) и нейтральная (III) зоны (рис. 2). В дальней части галереи также можно выделить выравнивающую и переходную зоны, но меньшей протяженности.

Распространение ледяных образований приурочено к первым двум зонам, при этом в выравнивающей зоне наблюдались преимущественно сублимационные, а в переходной – конжеляционные льды (сталактиты, сталагмиты, драпировки, небольшие покровные наледи, рис. 3).

В январе 2019 г. температура в нейтральной зоне пещеры составляла +4°C, а в переходной зоне – -1°C. При этом в переходной зоне на потолке наблюдались многочисленные капли воды, указывающие на положительную температуру в верхней части хода.

Отбор образцов проводился в переходной зоне. Были взяты образцы льда и криогенного материала с поверхности ледяного сталагмита. Расплав ледяного сталагмита имеет гидрокарбонатно-магниевый-кальциевый состав (табл. 2).

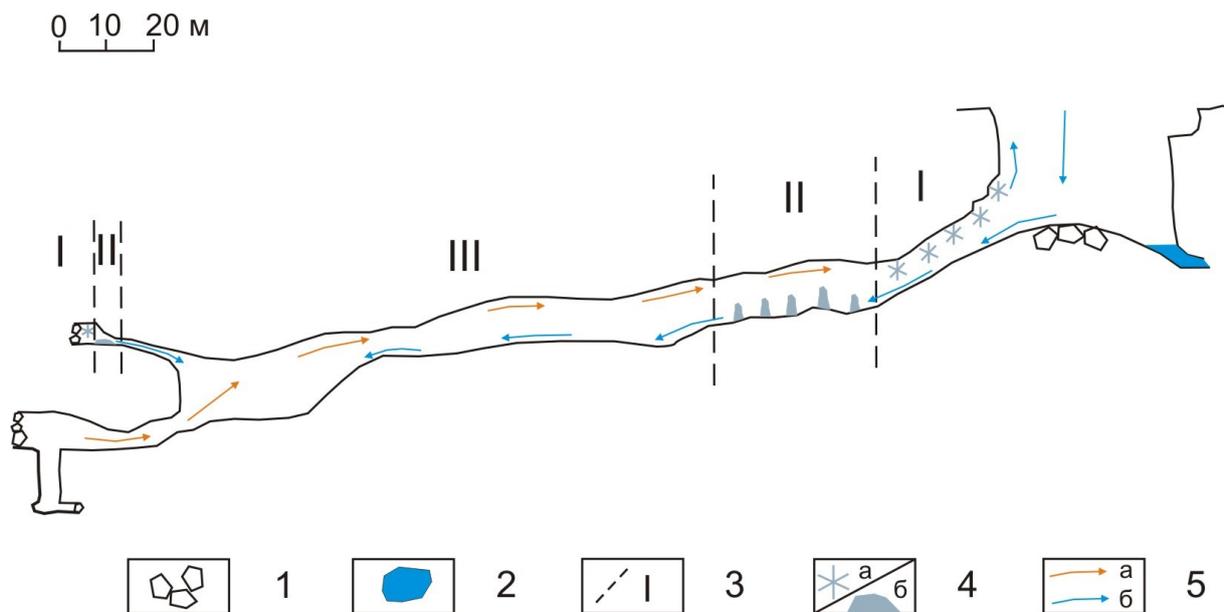


Рис. 2. Схема п. Трофимовская (по данным топоъемки А.Г. Докучаева и В.Н. Реутского, 1996 г.).
1 – глыбовые завалы, 2 – озеро, 3 – границы и номера микроклиматических зон, 4 – ледяные образования (а – сублимационные, б – конжеляционные), 5 – направления воздушных потоков (а – теплый, б – холодный воздух).

Данные о ледяных образованиях и направлении воздушных потоков приводятся на момент исследования (январь 2019 г.)

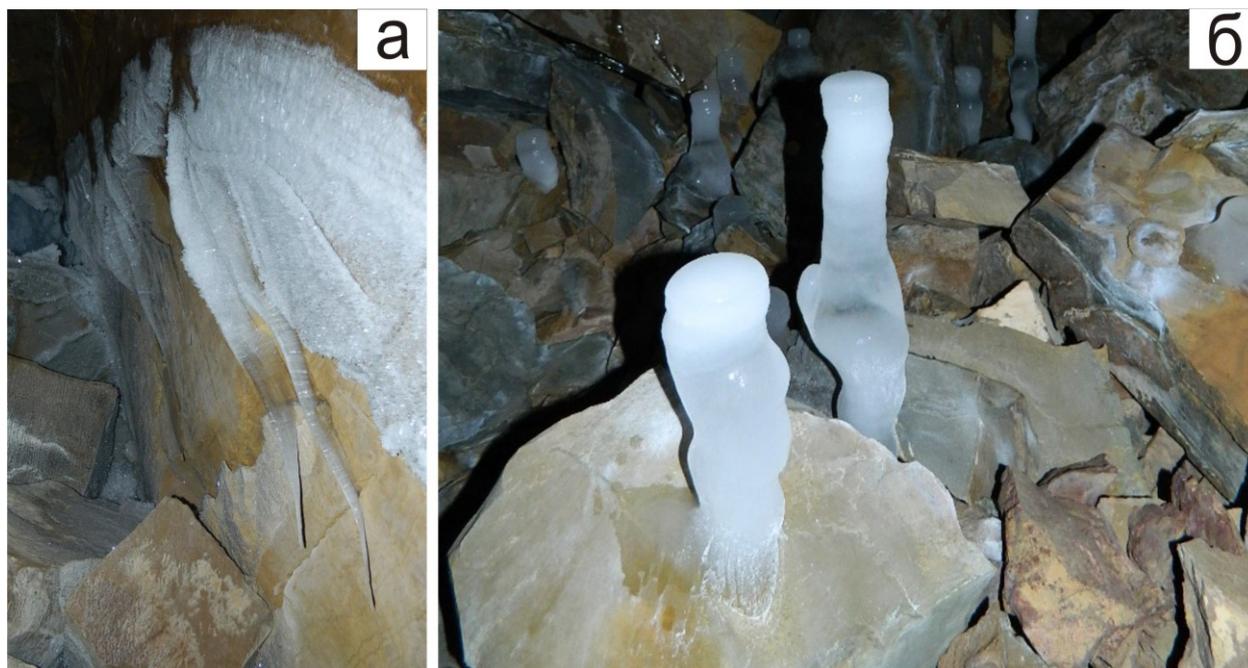


Рис. 3. Ледяные драпировки (а) и сталагмиты (б) в привходовой части пещеры.
На поверхности сталагмитов наблюдается налет криоминеральных образований. Фото Е.П. Шумкиной

Криоминеральные образования п. Трофимовской сложены магниезальным кальцитом (до 5,3 мас. % MgO) и лансфордитом ($MgCO_3 \cdot 5H_2O$). Кальцит образует сферолиты размером до 20 микрон; лансфордит представлен кристаллами и их сростками размером до 200 микрон. На поверхности кристаллов заметны трещины обезвоживания.

Таблица 2

Химический состав и минерализация ледяного сталагмита
из п. Трофимовская

Минерализация, мг/л	рН		Содержание компонентов							
			НСО ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ²⁺	NO ₃ ⁻
165,18		мг/л	117,16	10,0	1,06	20,44	11,31	0,57	0,43	2,21
	6,4	мг- экв/л	1,92	0,21	0,03	1,02	0,93	0,01	0,02	0,04
		%-экв	87,52	9,49	1,37	51,43	46,89	0,74	0,94	1,62

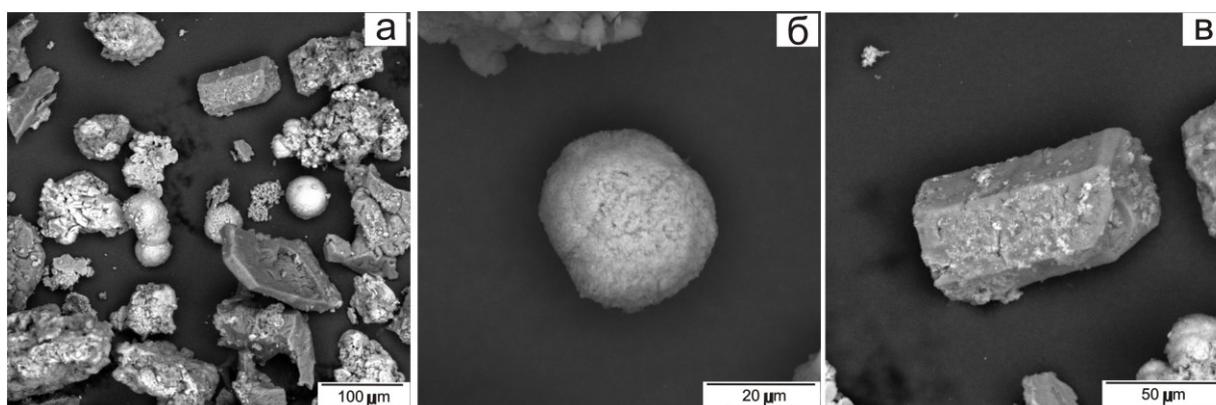


Рис. 4. Морфология криогенной муки из п. Трофимовская:
а – общий вид, б – кальцитовый сферолит, в – кристалл лансфордита с трещинами усыхания

Конжеляционные ледяные образования в переходной зоне, имеют, по-видимому, конденсационное происхождение. Выходящий из пещеры теплый влажный воздух оседает каплями на потолке, а при падении на замороженный пол капли замерзают, формируя сталагмиты с плоской вершиной. Известно, что конденсационная влага обладает низкой минерализацией и высокой способностью растворять горную породу [2], таким образом можно предположить, что насыщение раствора ионами происходит только в короткий период после осаждения воды на потолок и стены пещеры и до падения капли, вследствие чего минерализация расплава льда невысокая, и криогенный остаток на сталагмитах развит слабо. Присутствие магниезальных минералов (Mg-кальцита и лансфордита) в составе криогенных образований обусловлено составом вмещающих пород, содержание MgO в которых за счет доломитового цемента и доломитовых прослоев доходит до 7,65 мас.%. Размер частиц криогенного материала не превышает 200 микрон, поэтому данные образования можно отнести к криогенной «муке», формирующейся при быстром замерзании раствора. При испарении льда частицы образуют тонкую мучнистую пленку на поверхности ледяных сталагмитов.

*В работе задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология»
Института земной коры СО РАН в рамках гранта №075-15-2021-682.*

*Авторы благодарят Э.А. Силушкину за помощь в сборе образцов, а также аналитиков
М.М. Самойленко и Л.А. Дурбан за проделанные анализы и Е.П. Шумкину
и Е.Ю. Распопова за предоставленные фотографии.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Объяснительная записка к государственной геологической карте Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-47 – Нижнеудинск, СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012.
2. Дублянский В.Н. Занимательная спелеология. – Челябинск: Урал-ЛТД, 2000. – 525 с.: ил.

УДК 911.5:551.44

DOI:10.7242/echo.2023.1.2

ГОЛУБОЕ ОЗЕРО В САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

М.П. Бортников

*Самарский государственный технический университет,
Самарская спелеологическая комиссия*

Аннотация: Проведено описание озера Голубое в Самарской области и карстового массива, на котором оно расположено. Определена интенсивность карста. Описаны поверхностные карстовые формы и водопункты. Выделена новая водоносная зона поддолинной циркуляции подземных вод с русловым типом резервуаров. Проведена топографическая съемка карстового урочища и района Голубого озера по состоянию на 2018 год. Представлена история исследований описанной территории по литературным источникам.

Ключевые слова: карст, озеро, подземные воды, Самарская область.

1. Географическое положение

Голубое озеро (или Голубое-1) расположено в Сергиевском районе Самарской области в 112 км северо-восточнее областного центра и в 2,5 км северо-восточнее пос. Старое Якушкино.

Озеро находится в своеобразном урочище (Рис. 1), которое относится к Бугульминско-Белебеевской возвышенности, орографического района Кинельских Яров, провинции Высокого Заволжья. Последняя расположена здесь в пределах денудационной равнины олигоценового возраста [1].

Гидрографически урочище относится к бассейну р. Сок. Озеро заложено в нижней части водораздельного склона на границе с верхнепойменной террасой, правобережной части долины р. Шунгут, являющейся притоком р. Сок второго порядка. Надпойменных террас река не образовала. Абсолютные отметки тылового шва долины 88 м. Ширина правобережной части 60-90 м, а общая ширина долины 0,3-0,4 км. В целом поверхность верхней поймы выровненная, осложненная руслами ручьев, карстовыми воронками и заболоченными западинами. От нижней поймы она отделена уступом высотой 1-3 м. Урез воды в р. Шунгут 84,7 м.

Правобережный водораздельный склон у тылового шва долины имеет четкую границу. Он выпуклый, углы наклона достигают 20 градусов и более. Выше по склону рельеф становится пологим, с углами наклона до 2-8 градусов. Осложнен оврагами и карстовыми воронками. У Голубого озера водораздельный склон представляет собой устье балки шириной 100 м, которая образована слиянием трех карстованных оврагов. Левобережный водораздельный склон пологий плоско-выпуклый с углами наклона до 2-4 градусов. Тыловой шов долины в рельефе просматривается плохо. Таким образом, поперечный профиль долины р. Шунгут имеет асимметричное строение.

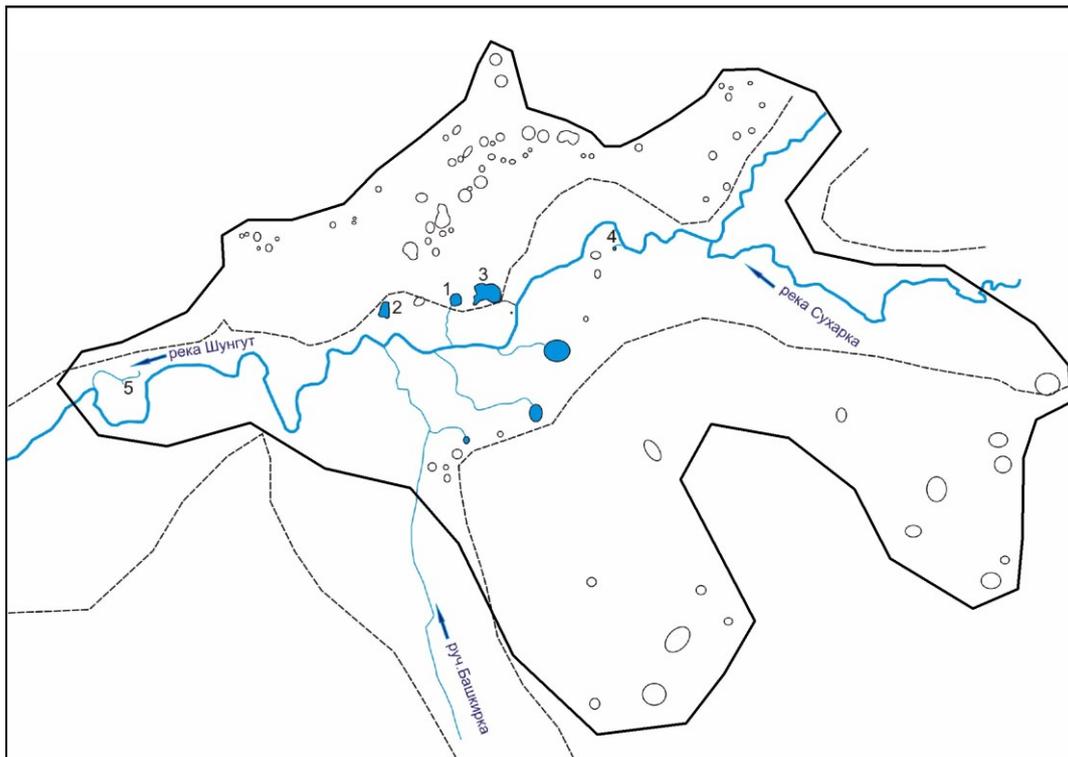


Рис. 1. Карстовое урочище Голубого озера.

1 – Голубое-1, 2 – Голубое-2, 3 – Черное, 4 – Голубое-4, 5 – Якушкинский источник

В карстово-спелеологическом отношении урочище представляет карстовое поле, которое лежит в Кинелько-Ярском районе Сокско-Шешминского округа области Южно-Татарского свода и Сокской седловины [2]. Поле имеет неправильную форму площадью 2,3 кв.км. Плотность поверхностных карстовых форм 37 шт. на кв.км. Коэффициент площадной закарстованности 2,6%. Поле занимает нижние части водораздельных склонов обеих берегов и долину реки. Большая часть карстовых воронок находится в правобережной части. Они имеют, как правило, блюдцеобразную, чашеобразную и реже конусообразную форму. Некоторые воронки достигают глубины 12 м. Воронки задернованы. В левобережной части воронки обычно блюдцеобразные, реже чашеобразные. В долине реки карстовые формы часто обводнены, а в левобережной части заболочены.

На участке отмечено образование карстовых провалов. В 1997 году возник провал диаметром 3 м и глубиной 6 м (Якушкинский провал). В настоящее время он представляет собой воронку диаметром 5 м и глубиной 2 м. В 2020 году севернее Голубого озера в тальвеге оврага зафиксирована свежая просадка размерами 5×2 м и глубиной 0,7 м. В результате сравнения аэро-космоснимков 1953 года и современных в долине обнаружен новый источник (Голубое-4). Юго-западнее этого источника зафиксировано образование блюдцеобразной просадки диаметром 6 м. Таким образом, на этом участке впервые для Самарской области определена интенсивность провалообразования, которая составляет 0,02 провала в год.

2. Описание водопунктов

Современное описание Голубого-1 проводится по данным инструментальной топографической съемки, проведенной Бортниковым М.П. и Иванцовым К.Ю. в 2018 году (Рис. 2).

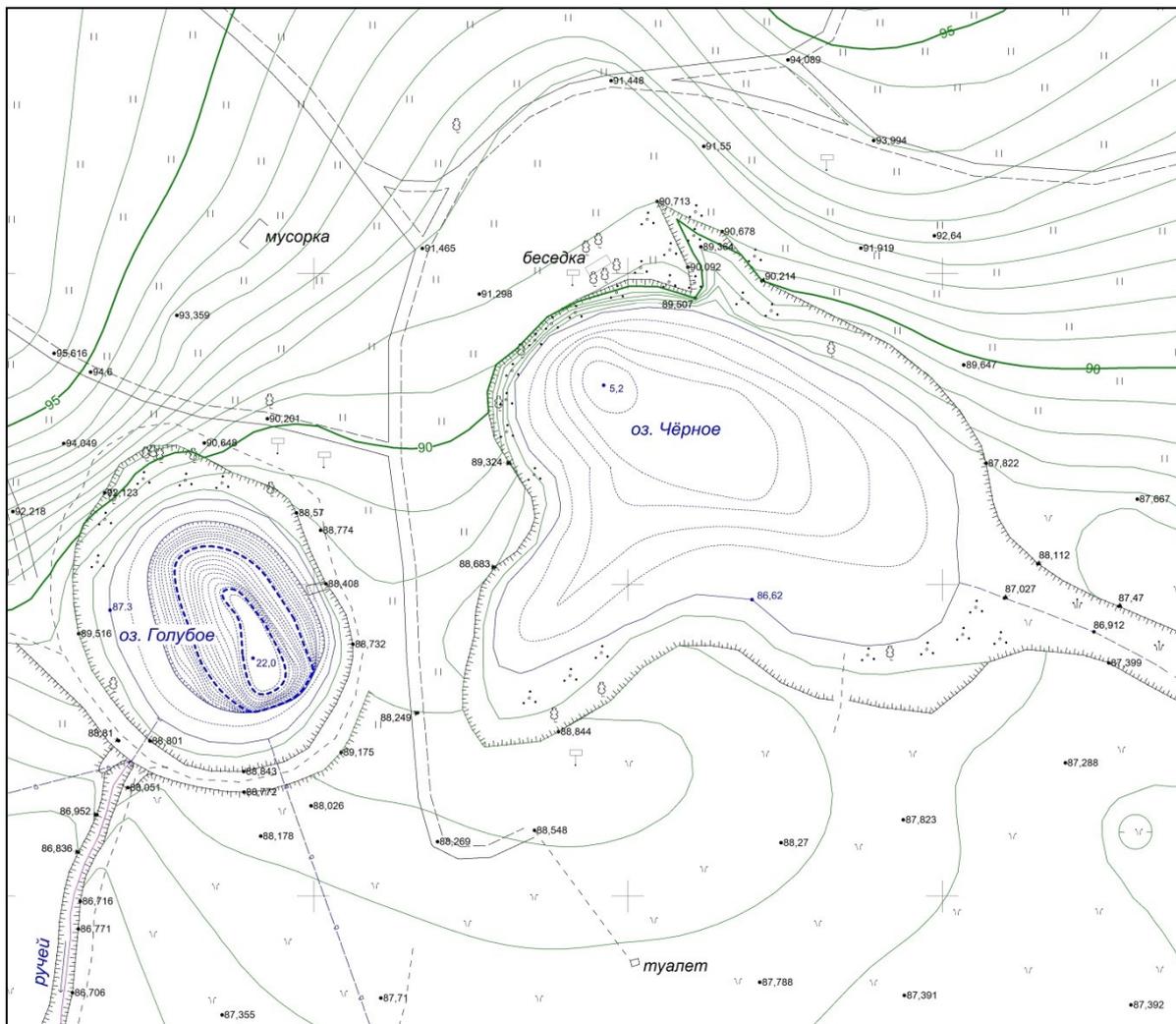


Рис. 2. Фрагмент топографического плана района Голубого озера по состоянию на 2018 год

В плане зеркало озера представляет собой эллипс, большая ось которого длиной 40 м ориентирована на северо-запад, а малая длиной 32,5 м – на северо-восток. Площадь зеркала 1060 кв.м. Абсолютная отметка 87,3 м.

В целом фигура озера представляет перевернутый усеченный конус глубиной 22 м и объемом порядка 7,7 тыс. куб. м. Осложняет фигуру береговая отмель. В 5-15 м от берега глубина увеличивается до 1 м. Далее следует почти вертикальный или крутонаклонный обрыв. Отмель задернована, заросла водорослями. Обрыв и дно каменистые, покрыты глинистыми осадками и илом. По литературным данным (Таблица 1) видно, что глубина и диаметр озера эфемерны, так как периодически происходят провалы дна и обвалы стенок, которые перекрывают подводящий слабонаклонный канал. Со временем обвальные отложения вымываются и канал частично вскрывается. В 2013 году гидросистема вскрылась и была изучена дайверами. На глубине 28 м в стенке провала на дне озера образовалась расселина длиной 2 м и высотой 0,8 м, и за ней открылся ход высотой 2,5-3,0 м, шириной 2-6 м, уходящий в восточном направлении на 28 м. Далее ход изменял направление на северное и через 20 м вновь поворачивал на восток, расширяясь до 10 м, уходя в неизвестном направлении. Общая длина изученного хода 58 м (Рис. 3). Таким образом, была зарегистрирована обводненная пещера общей протяженностью 70 м, средней высотой 2,5 м, средней шириной 7,5 м. Площадь пещеры 1,5 тыс кв.м,

объем 9,0 тыс. куб.м., глубина 37,5 м. Эти параметры позволяют считать ее самой глубокой в Самарской области. Абсолютная отметка самой нижней изученной точки 49,8 м, что на 35 м ниже уреза воды в реке. Подводный вход в пещеру просуществовал один год и был вновь завален в начале 2014 года.

Вода подводного хода питает озеро. Из него вытекает ручей расходом более 70 л/с с сероводородной водой.

Кроме основного озера в долине р. Шунгут имеется еще ряд водопунктов, достойных описания.

Таблица 1

Параметры Голубого-1 по литературным данным

Литературный источник	Диаметр (м)	Глубина (м)
Лосиевский, 1851	17	42
Ксенофонтова, 1948	38,8	21
Кутырев, 2007	32	17,6
Ткаченко, Таразанов, 2009	42	18
Бортников, 2011	35	18,5
Ременьюк, Гусев, 2013		25,6
Ременьюк, Смольников, 2013		35
Попова, Поляков, 2013		37,5
Бортников, Иванцов, 2018	40	22

Озеро Черное (Голубое-3) расположено в 25 м восточнее первого. Образовано слиянием трех провалов и из за этого имеет сложную форму. Площадь озера 3040 кв.м. Абсолютная отметка поверхности зеркала 86,6 м, что на 0,7 м выше первого озера. Глубина 5,2 м. Озеро наполнено не сероводородной водой. В целом оно бессточное, но имеет сухое русло временного водотока. Отмечено, что подводный ход из первого озера направлен в сторону р. Шунгут, но, возможно, имеет ответвление в сторону Черного озера.

Озеро Голубое-2 находится в 0,16 км к западу от первого. Имеет форму неправильного эллипса, площадь около 1000 кв. м, глубина 4,0 м. Озеро наполнено сероводородной водой. Имеет сток, но из-за техногенных изменений определить его невозможно.

Озеро Голубое-4 находится на другом берегу р. Шунгут в 0,4 км к востоку от первого. Имеет форму эллипса размерами 2 × 3 м. Глубина 8,0 м. Из за малых размеров его можно назвать источником. Но значительная глубина и возможное увеличение протяженности при дальнейших подводных исследованиях дают нам право назвать его озером. Водоем наполнен сероводородной водой и из него вытекает ручей с расходом порядка 40 л/с.

Якушкинский серный источник расположен в 0,8 км юго-западнее первого озера. Представлен двумя небольшими грифонами сероводородных вод, расположенных в 50 м друг от друга. Они объединяются в ручей расходом порядка 20 л/с. Местность около источников заболочена. Около выходов подземных вод наблюдаются характерные белесые налеты на дне.

Кроме этого, хочется отметить техногенные изменения ландшафта описываемого карстового участка.

По литературным данным известно, что река Шунгут в данном месте издревле подпруживалась. Плотины были уже с 1768 года. Первая находилась у пос. Старое Якушкино в 2,5 км, а вторая – в 0,5 км ниже первого озера. Плотины существовали до 90-х годов XX века. На аэрофотоснимке 1953 года видно, что Голубое-2 подтоплено и имеет две протоки, соединяющие его с рекой. Об этом так же сообщает Паллас. Озеро Голубое-1 имеет береговую обваловку. Таким образом, форма зеркала имеет техногенную природу. Из озера отходят два подземных водовода. Одна труба уходит сразу же к Шунгуту, а вторая подпитывает Голубое-2. Последнее также имеет береговую обваловку с заданной формой зеркала. Таким образом, техногенная нагрузка скорее всего участвует в формировании общей гидросистемы и активизирует карстовые процессы.

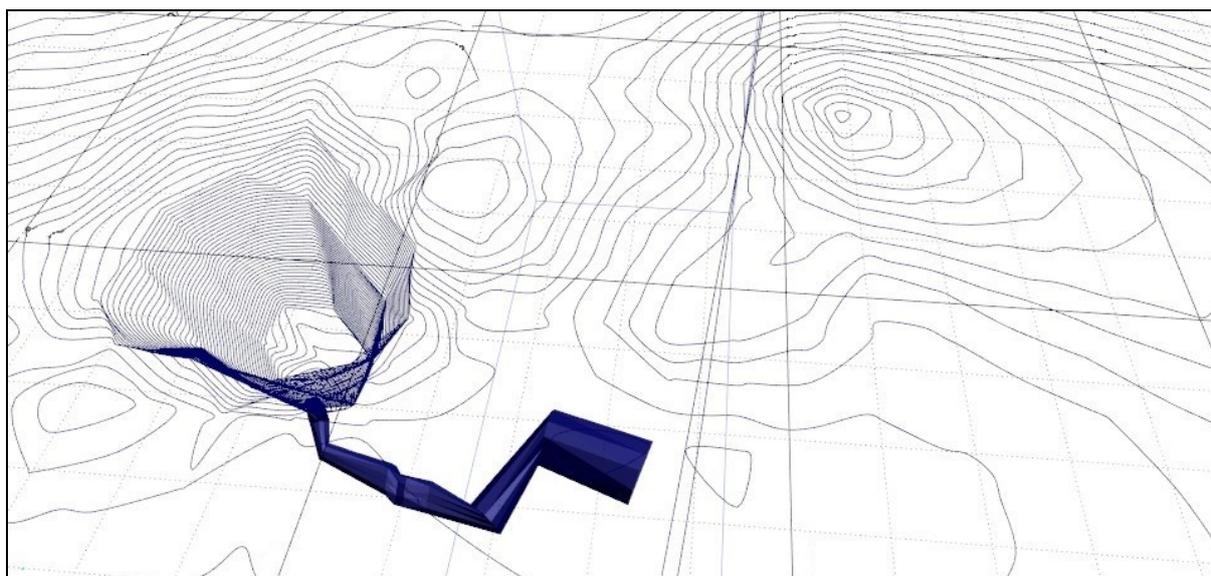


Рис. 3. Трехмерная модель пещеры Голубого озера по состоянию на 2013 год

3. История исследования

Голубое озеро всегда было популярно в народе. Краеведы отмечают, что с давних пор чуваша из села Старо-Якушкино называли озеро Семизкюле и совершали на нем обряды при встрече весны. Однако история озера резко заканчивается на рубеже XVIII и XIX века.

Впервые район описывает известный географ-путешественник П.С. Паллас. Но его описание привело к возникновению многочисленных вопросов. Главный из них – существовало ли само озеро в то время?

Паллас П.С. узнал об этих местах, как о Шунгутских серных ключах, и по тексту везде называет их не озерами, а ключами. Побывал здесь зимней снежной ночью 15 октября 1768 года. Осматривал местность при лунном свете. Указал начальный ориентир осмотра – две водяные мельницы на Шунгуте. За рекой расположен увал, а «...внизу сего увала находится большой серный ключ, болотину составляющий, и с водою из второй запруды вместе текущий. А еще далее, где речка уже отделилась от упомянутого увала, нашел я на низком месте в малом расстоянии два другие большие серные ключа, от которых серный запах еще издали чувствителен и коим дошел я без вожатого по пробитой по снегу тропинке... ...Оба ключа нарочито глубоки, из коих тихотекущие большие ручьи впадали в близ находящуюся речку Шумбут. В обоих на дне и на всякой в воде лежащей дрязге ложится много белой киселю

подобной серной материи как у самих ключей, так и в их ручьях...» [3]. Здесь исследователь описывает не озера (тем более не бездонные озера), а сероводородные источники с ручьями, у которых видно дно. В другом издании автор пишет: «... на речке Шумбут имеются еще три мощных серных ключа. Первый из них образует внушительное озеро, а два других – бурные ручьи, но все они выделяют очень много серного вещества...» [4]. Здесь он по другому описывает эти объекты. Первый источник, не как «большой серный ключ, болотину составляющий», а как «внушительное озеро». Два другие, не как «нарочито глубокие ключи с тихотекущими ручьями», а просто «бурные ручьи». По нашему мнению, первый ключ сопоставляется с Голубым-2, так как описана его связь с запрудой. Далее не понятно в какую сторону пошел исследователь. По тексту похоже на юго-запад. И описание приводится Якушкинского источника. Это как раз два сероводородных ключа, у которых видно дно, покрытое серными налетами. Если Паллас пошел на северо-восток, то место описано не узнаваемое. Сейчас это два больших озера, у которых не видно дна. Причем только одно сероводородное. Если тогда они были еще двумя сероводородными ключами (а потом в одном сероводородная вода иссякла), то получается, что исследователь описывал их во время образования. Таким образом, можно приблизительно определить время образования озер. Если ученый их не видел, значит их еще не было, а если видел, то видел на месте их небольшие источники. Провалы озер произошли позже. Итак, мы датировем образование Голубого-1 второй половиной XVIII в.

Первое известное упоминание водоема в узнаваемом виде имеется у писателя И.С. Аксакова в письмах 1848 года: «... Оттуда проехали на нефтяные ключи и видели черную нефть, плавающую на воде, а оттуда на Голубое озеро. Что за красота! Я ничего подобного и представить себе не мог! Оно голубо от преломления лучей в этой светлой серной воде. Озеро иль озерко – глубоко, говорят, до 20 саженей и идет вниз воронкой. Мы бросали камни, и по крайней мере вы целую минуту можете проследить падение камня, постепенно голубеющего, до тех пор, пока его не станет видно...» [5].

Первое научное описание Шунгутского Голубого озера публикует уфимский землеустроитель и краевед В.С. Лосиевский в 1851 году. Фигура озера описана круглая в виде воронкообразной котловины с поперечником 8 саженей. «Поверхность берегов котлообразная, стены в озере скалами опускаются отвесно в пропасть на глубину 20 саженей. Длина ручья от котловины озера составляет 10 саженей в длину и 2 сажени в ширину. Ниже озера в 30 саженях расположено другое глубокое озеро (по словам крестьян), но оно затоплено. Третье озеро находится в 10 саженях и имеет пресную воду. Ширина его 7 саженей, длина 10 саженей» [6]. Здесь для нас интересны опубликованные параметры озер. Ширина Голубого озера 16-17 м, т.е. в два раза меньше существующей. Глубина достигает 42 м, т.е. приблизительно соответствует современным параметрам. Размеры Голубого-3 составляют 14 × 21 м, т.е. в три раза меньше современных. Таким образом, этот документ фиксирует первые параметры озер и они отличны от современных.

Позже информация о бездонном озере с голубой водой периодически появляется в печати. Интересно первое изображение водоема, дошедшее до нас с 1873 года на гравюре К.О. Мая. Мы видим юго-восточный сектор полукруглого берега, огороженный забором, и два временных строения для обслуживания отдыхающих.

Далее воспользуемся слабоизвестным, но достоверным литературным источником. В фондовом гидрогеологическом отчете Ксенофонтовой за 1948 г. приведена первая топографическая съемка Голубого озера на 06.08.1936 г. выполненная Шипчаком, Новиковым, Шихановым. Здесь интересен факт регистрации диаметра водного зеркала

38,8 м и максимальной глубины 21,0 м [7]. То есть ширина озера достигла современных значений, а глубина уменьшилась.

Во второй половине XX века информация об озере хоть и кочует по краеведческой литературе, но сильно не афишируется. Это связано с тем, что из него усиленно качали воду для повышения нефтеотдачи пластов Якушкинского месторождения. Автор настоящей работы впервые попал на озеро в 1997 году и видел, как в месте, расположенном правее современных водолазных ступенек, в воду погружалась коленообразная труба большого диаметра для закачки воды. Нефтяниками была сделана и земляная обваловка по южному берегу, которая уменьшила диаметр водного зеркала. К озеру были проложены линии водоводов.

Стоит упомянуть работы сотрудников Зоологического музея СГСПУ по изучению экосистемы Голубого озера, как карстового серного водоема с изолированной биотой, которые проводились с 2003 года. Опубликованы общие сведения: история изучения, географическое положение и морфометрические параметры (диаметр 42 м, глубина 18 м), температура, химический состав и расход воды. Впервые построена трехмерная модель водоема. Приведены данные по биоте: выявлены популяции харровых водорослей (*Chara braunii*), мхов фонтиналис (*Fontinalis antipyretica*), также описаны виды кольчатых червей, моллюсков, членистоногих, хордовых. Озеро определено как уникальная карстовая водная экосистема [8].

Наши исследования района начались в 2004 г, когда было выполнено нивелирование дна и составлены топографические планы обоих озер. Диаметр Голубого составил 35 м, глубина по хлопущке 17,0 м, диаметр Черного – 85 м, глубина 5,2 м. Тогда же самарские акваспелеологи В.В. Смольников и С.В. Кутырев на дне первого озера обнаружили грот шириной 11 м, высотой 1-1,5 м и протяженностью 5 м. Общая глубина с учетом дальней части грота составила 18,5 м. Позднее С.В. Кутырев опубликовал новую топоъемку, указав глубину 17,6 м [9]. По публикациям 2011 года Голубое определяется как самое глубокое в Самарской области [10]. Учитывая прозрачность воды, оно становится самым популярным среди местных аквалангистов.

Новейшая история Голубого озера начинается с 10.03.2013 г. На дне озера водолазы замечают новообразованный провал. Глубина озера увеличивается до 20,3 м. Затем, через некоторое время, фиксируется глубина 25,6 м. А далее, 16.04.2013 г, водолазы В.В. Смольников и А.В. Ременюк неожиданно обнаруживают на дне провал до глубины 28 м и на его дне отверстие, ведущее в слабонаклонное подводное пространство, названное Апрельским ходом. Очередное удачное погружение 12.09.2013 г. совершили московские дайверы А. Попова и С. Поляков. Они обнаружили, что Апрельский ход расширяется и продолжается на неизвестное расстояние.

Зимой 2014 года произошел обвал подводных стенок озера и входное отверстие в Апрельский ход было засыпано [11]. К 2018 году значительно оплыл провал на дне и глубина озера уменьшилась до 22 м.

3. Геологическое строение

В геологическом отношении на отложениях верхнего карбона, кровля которого находится здесь на абсолютных отметках минус 120-130 м, залегают ассельские карбонатные породы мощностью около 40 м, сакмарские и отчасти артинские карбонатно-сульфатные породы общей мощностью около 100 м. На этих отложениях с размывом залегают осадки **калиновской свиты (P_2kl)** нижеказанского возраста, представляющие переслаивание известняков и доломитов с подчиненными прослоями мергелей,

глин, алевролитов, песчаников общей мощностью 70-76 м. Выше находится толща верхнеказанских карбонатно-сульфатных образований, с которыми связываются современные карстопоявления, и в том числе Голубое-1 (Рис. 4).

В основании верхнеказанского подъяруса залегает **гидрохимическая свита (P_{2gd})**, представленная ангидритами, гипсами, глинами с подчиненными прослоями доломитов общей мощностью 12-17 м, в среднем 15 м. Гипсы и ангидриты белые и светло-серые, крупно- и мелкозернистые. Они вскрываются на сводах Апрельского хода и легко диагностируются на фотоснимках и видеороликах по своему цвету и характерному облику (ячеистым каррам).

Выше по разрезу, начиная с абсолютных отметок 60-61 м, залегают отложения **сосновской свиты (P_{2ss})**. В целом по району свита сложена доломитовой мукой, доломитами, мергелями, известняками, реже песчаниками, глинами, алевролитами с прослойками селенита. В провале Голубого озера они представляют в основном доломиты слоистые слабо известковистые светло-серого цвета тонкозернистые с прослойками селенитов и алевролитов темно-серых тонкозернистых. Максимальная мощность по району достигает 103 м, в провале Голубого озера – около 27 м.

В верхней части провала и по берегам озера вскрываются делювиальные средне-верхнеплейстоценовые образования (dQII-III), представленные глинами слабо песчанистыми, серовато-коричневыми с щебнем карбонатных и глинистых пород общей мощностью до 2 м.

Долину р. Шунгут слагают современные аллювиальные осадки, представленные глинистыми песками, супесями, суглинками с линзами гравийно-галечного материала. Максимальная мощность отложений достигает 8 м.

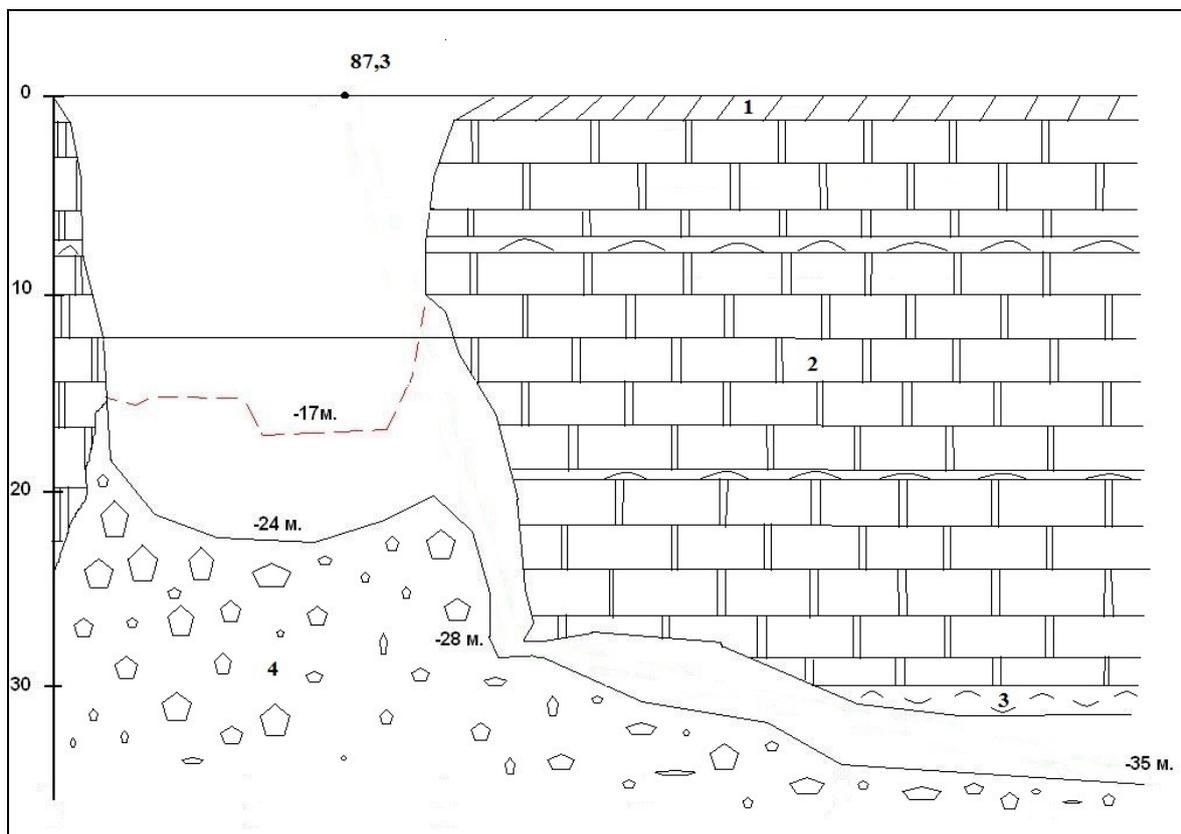


Рис. 4. Схематический геологический разрез Голубого-1

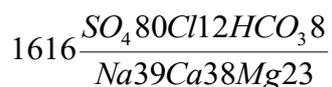
1 – глины средне-верхнеплейстоценовые (dQII-III), 2 – доломиты с прослоями селенита (P_{2ss}),
3 – гипсы и ангидриты (P_{2gd}), 4 – обвальные отложения

4. Гидрогеологическая характеристика

В гидрогеологическом отношении воды изучаемого района относятся к Волго-Сурскому артезианскому бассейну, палеозойской водоносной зоне, пермскому водоносному комплексу и казанскому водоносному горизонту. Последний здесь подразделяется на два водоносных подгоризонта, разделенных водоупорным подгоризонтом.

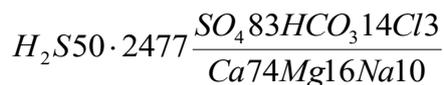
Верхнеказанский подгоризонт представлен преимущественно безнапорными водами, циркулирующими в доломитах сосновской свиты (водоносные коллекторы порового, трещинного и кавернового типа). Такие воды вскрываются на глубинах 10-15 м. На отдельных участках наблюдаются их выходы на поверхность в виде источников с дебитом до 1 л/с, редко больше. По литературным данным дебиты водозаборных скважин изменяются в широких пределах и могут достигать от 1л/с до 7-8,3 л/с и более. Удельные дебиты 0,2-13 л/с. Водопроницаемость горизонта варьирует от 30-50 до 1000-1700 м²/сут при средних значениях 350-450 м²/сут. Коэффициент фильтрации составляет от 0,3-5,0 м/сут до 20-50 м/сут и более. По химическому составу воды в зонах неглубокого залегания преимущественно гидрокарбонатные и сульфатно-гидрокарбонатные с минерализацией от 0,3 до 2,5 в среднем 1,1 г/дм³.

Данный тип вод питает озеро Черное. По результатам химического анализа вода с повышенной минерализацией, сульфатно-хлоридно-натриево-кальциевая:

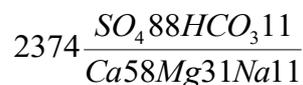


Нижнеказанский подгоризонт представлен слабонапорными водами, циркулирующими в известняках и доломитах калиновской свиты (коллекторы порового, трещинного, кавернового типа). Воды вскрываются на глубинах от 30-70 м. По долине рек Сок, Сургут, Шунгут наблюдаются выходы этих вод в виде сероводородных источников дебитом до 20 л/с и более. По литературным данным дебиты водозаборных скважин изменяются в широких пределах и могут достигать 1-6,2 л/с и более. Удельные дебиты 0,85-21 л/с. Водопроницаемость горизонта варьирует от 30-50 до 1000-3000 м²/сут при средних значениях 200-300 м²/сут. Коэффициент фильтрации составляет от 1,0-5,0 м/сут до 30-50 м/сут и более. По химическому составу воды часто сероводородные, преимущественно сульфатные, гидрокарбонатно-сульфатные, магниевые-кальциевые и смешанного состава с минерализацией от 0,9 до 2,9 в среднем 1,6 г/дм³.

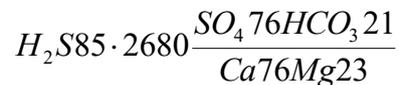
Вода Голубого озера сероводородная, сульфатно-гидрокарбонатно-кальциево-магниевая.



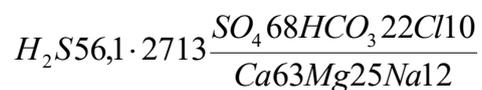
Вода Якушкинского серного источника сероводородная, сульфатно-гидрокарбонатно-кальциево-магниевая.



У райцентра Сергиевск известен курорт «Сергиевские минеральные воды». Группа из четырех каптированных источников, расположенных у тылового шва первой надпойменной террасы, через 20 м сливается в пруд «Серное озеро», а далее через плотину дает начало р. Сермяга – правому притоку р. Сургут. Общий дебит источников 67-73 л/с. Вода сероводородная, сульфатно-гидрокарбонатно-кальциево-магниевая:



В 2008 году зафиксировано образование нового источника в 0,8 км юго-западнее пруда «Серное озеро». 28 мая возникли грифоны воды с запахом сероводорода, выбивавшиеся из земли у тылового шва первой надпойменной террасы р. Сургут. Через месяц новый источник представлял собой изливающееся карстовое озеро диаметром 10 м и глубиной 3 м. Из озера вытекал ручей дебитом 22 л/с. Вода сероводородная, сульфатно-гидрокарбонатно-кальциево-магниевая:



Необходимо заметить, что это единственный сероводородный источник, дата образования которого известна. По предварительным оценкам прогнозируется, что механизм его образования и развитие будет соответствовать Голубому-1 [12].

Верхнеказанский водоупорный подгоризонт разделяет вышеописанные водоносные горизонты. Традиционно, считается, что он сложен породами гидрохимической свиты: плотными разностями известняков, доломитов, глин, гипс-ангидритовых пород.

На основе анализа строения Голубого-1 нами выделена **водоносная карстовая зона** в гипс-ангидритовой пачке гидрохимической свиты. Гидравлически она связана с нижеказанским водоносным горизонтом. Имеет коллекторы исключительно каналового типа, что является новым для Самарской области. Таким образом Голубое-1 относится к поверхностно-проточным карстовым озерам с подземным питанием и поверхностным стоком. Дайверы однозначно доказали наличие горизонтального канала зоны поддолинной (сифонной) циркуляции, что также является новым для Самарской области.

Пример Голубого-1 можно распространить на другие источники сероводородных вод, находящиеся в долинах рек, и в частности на вышеописанный новый источник. К настоящему времени имеется информация о 18 крупных выходах сероводородных вод в Самарской области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бортников М.П. Геология Самарской области: учеб. пособие / Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2010. – 112 с.: ил. – Текст электронный. – URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geologiyasamarskojyoblasti.pdf>.
2. Бортников М.П. Карст Самарской области / Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 2012. – 182 с.: ил.
3. Паллас П.С. Путешествие по разным провинциям Российской империи. Ч. II, Кн. 1. – 2-е изд. – СПб., 1770. – 350 с.
4. Научное наследие П.С. Палласа. Письма, 1768-1771 гг. / Сост. В.И. Осипов; пер. с нем. В.И. Осипова, Г.И. Федоровой. – СПб.: Творч.-изд. агентство «Ленингр. ин-т дизайна», 1993. – 250 с.

5. Голубое озеро: исследования и статьи / [Сост. А.Е. Петрова]. – Самара. Изд-во О. Кузнецовой, 2015. – 206 с.: ил.
6. Лосиевский В.С. Шунгутское Голубое озеро // Вестн. император. русского географич. о-ва на 1851 г. – Ч.2. – СПб., 1851. – С. 85-87.
7. Бортников М.П., Ременюк А.В. Сероводородные источники Самарской области // Самарский край в истории России: материалы межрегион. науч. конф. – Самара, 2015. – Вып. 5. – С. 4-6.
8. Ткаченко К.С., Таразанов В.В. Экосистема Голубого озера как пример карстового серного водоема с изолированной биотой // Изв. Самарского науч. центра РАН. – 2009. – Т. 11, № 1. – С. 140-145.
9. Кутырев С.В. Карстовые процессы в окрестностях Голубого озера // Спелеология Самарской области. – Самара, 2007. – Вып. 4. – С. 38-47.
10. Бортников М.П. Карстовые озера Самарской области // Спелеология Самарской области. – Самара, 2011. – Вып. 6. – С. 38-41.
11. Бортников М.П., Ременюк А.В. Голубое озеро – одна из крупнейших подводных пещер Поволжья // Спелеология Самарской области. – Самара, 2015. – Вып. 8. – С. 4-11.
12. Бортников М.П. Образование сероводородного источника в Сергиевском районе Самарской области // Спелеология Самарской области. – Самара, 2011. – Вып. 6. – С. 42-45.

УДК 551.733: 565.2

DOI:10.7242/echo.2023.1.3

**ГРАФИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ
В ГЕОЛОГО-ПАЛЕОНТОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПОЗИЦИИ МУЗЕЯ КАРСТА
И СПЕЛЕОЛОГИИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА УРО РАН
(НА ПРИМЕРЕ ТРИЛОБИТА *PARACERAURUS*
ИЗ ОРДОВИКА ПРИБАЛТИКИ)**

С.В. Наугольных¹, Д.В. Наумкин²

¹Геологический институт РАН, г. Москва

²Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье рассмотрено использование палеонтологической экспозиции музея карста и спелеологии Горного института Уральского отделения РАН для образовательных и просветительских целей. Специальное внимание уделено коллекции окаменелостей ордовикского возраста и, в особенности, редкому экземпляру крупного цефалона трилобита *Paraceraurus* sp. Подчеркнуто значение графических иллюстративных реконструкций для повышения наглядности экспонируемых материалов.

Ключевые слова: графическая реконструкция, ордовик, кукерсит, трилобиты, экспозиция, просвещение, музей карста и спелеологии.

Введение

Наглядность и эффективность геолого-палеонтологических экспозиций профильных и образовательных музеев во многом связаны не только с подбором натуральных экспонатов, но и с тем, как эти экспонаты вписаны в общий контекст экспозиции, и с тем, какой визуальный ряд их сопровождает.

Довольно часто сотрудники музеев и дизайнеры, участвуя в подготовке экспозиции, идут по «пути наименьшего сопротивления», то есть выбирают, на первый взгляд, наиболее простой, дешевый и эффективный вариант изготовления изобразительного ряда и при этом просто заимствуют из литературы или интернета понравившиеся и подходящие по тематике иллюстрации, нередко не указывая авторства работы и источника заимствования. Нарушение этических норм и авторских прав (копирайта) делают этот путь совершенно не приемлемым. Исключение составляют те случаи, когда экспозиционеры получают прямое письменное согласие правообладателя на использование его материалов в экспозиции. В соответствии с

юридическими нормами Российской Федерации допускается использование материалов, опубликованных в открытой печати (Гражданский кодекс РФ, статья 1274), но с точным указанием источника заимствования (подробнее об интеллектуальной собственности см.: Гражданский кодекс РФ, статьи 1259, 1274, а также КОАП, статья 7.12.).

Наиболее правильным решением в подготовке визуального графического сопровождения предметно-экспозиционного ряда следует считать разработку собственных новых оригинальных иллюстраций: с одной стороны, аттрактивно-выигрышных, привлекательных с эстетической точки зрения, и, с другой стороны, связанных с конкретными объектами, демонстрируемыми в экспозиции. Именно этим путем идут все наиболее успешные мировые музеи естественнонаучного профиля.

Материал

В палеонтологической экспозиции музея карста и спелеологии Горного института Уральского отделения РАН находится необычный и редкий образец (по существу, два образца – отпечаток и противоотпечаток), представляющий собой почти целый цефалон (головной щит) крупного трилобита, относящегося к роду *Paraceraurus* Männil, 1958 (рис. 1). Образец происходит из знаменитых горючих сланцев (кукерситов) Прибалтики, обнажающихся в окрестностях д. Кукерс (нем. Kuckers), (Кукрузе; Kukruse, Эстония) и г. Сланцы (Ленинградская область, Россия).

Кукерситы легко узнаются даже в небольших обломках благодаря очень специфическому коричневато-оранжевому цвету на свежем сколе, тонкой слоистости и огромному количеству разнообразных органических остатков, которые в кукерских сланцах содержатся. Стратиграфически кукерсит приурочен к самой верхней части среднего ордовика (карадогский или дарривильский ярусы) или, возможно, самой нижней части верхнего ордовика (ашгильский или сандбский ярусы). В любом случае, большая часть толщи известняков, содержащих прослой кукерситов, включая так называемый «промышленный пласт» мощностью около 5 м, относится к верхней части карадогского яруса, часть отложений которого иногда рассматривается в составе верхнего ордовика. Среди органических остатков, встречающихся в кукерситах, особенно многочисленны трилобиты (рис. 2, фиг. 1, 3, 5, 6), мшанки (рис. 2, фиг. 4), брахиоподы (см. рис. 1, фиг. 2). Иногда можно найти остатки дендронидных граптолитов и макрофитные водоросли (рис. 2, фиг. 2).

Ордовик в палеонтологической экспозиции

музея карста и спелеологии

Горного института Уральского отделения РАН

Музей карста и спелеологии появился в составе Кунгурской лаборатории-станции Горного института ПФИЦ УрО РАН в 2004 г. Это классический академический музей естественнонаучного профиля, специализация которого – карст и пещеры. Музей «камерный», его экспозиционная площадь (два зала на первом этаже здания лаборатории) не превышает 100 м². Общий объем фондов по итогам 2022 г. составил 5642 единицы хранения, в том числе 2424 единицы хранения основного фонда и 3218 единиц хранения научно-вспомогательного фонда. Каменный материал, образующий фондовую основу музея, подразделяется на минералогические, петрографические и палеонтологические коллекции.

Основу музейной палеонтологической коллекции составляют морские палеозойские беспозвоночные. Среди них преобладают ископаемые остатки морских беспозвоночных – обитателей морей позднего палеозоя (карбона и перми). В кол-

лекции также представлена девонская фауна, собранная в республике Коми [1] и Пермском крае. И лишь пятнадцать экземпляров ископаемых морских беспозвоночных (трилобиты, головоногие моллюски и колониальные кораллы) представляют ордовикскую систему.

Ордовикская система была установлена Ч. Лапвортом на базе типовых разрезов Уэльса 140 лет назад, но вплоть до 1960 г. ее считали нижним отделом силурийской системы [2, 3]. В настоящее время ордовик вызывает повышенный интерес как один из важнейших периодов становления морской биоты, а Балтоскандия, особенно ее восточная часть в границах России, признается одним из центров видообразования фауны морских беспозвоночных. Относительно мало данных по палеонтологии ордовика и нижнего палеозоя в целом имеется по территории Среднего Урала в Пермском крае, где преобладают отложения пермской системы. В границах Пермского края выходы отложений ордовикского возраста представляют значительную редкость и большой научный интерес [4].

Ордовикские образцы в музейной коллекции Горного института УрО РАН происходят из двух регионов: Прибалтика (Эстония и Ленинградская обл., представлены исключительно подаренными экземплярами), и окрестности пос. Промысла (Горнозаводский округ, Пермский край), где сотрудники музея осуществляли самостоятельные сборы (полевые сезоны 2008 и 2019 гг.).

Здесь в бортах плотины вдоль пруда на южной окраине поселка обнажаются темно-серые и черные сильнометаморфизованные карбонатные породы (карбонат-серицит-хлоритовые сланцы), пронизанные кварцевыми прожилками. По ним живописными каскадами, образуя иногда маленькие заводи, стекает речка Полуденка. Эти отложения относятся к промысловской серии, имеющей средне-позднеордовикский возраст. На поверхностях напластования обнажающихся пластов здесь часто встречаются остатки прямых раковин головоногих моллюсков, относящихся к подклассу Endoceratoidea. К сожалению, тип сохранности раковин эндоцератоидей из Промысловского местонахождения не так аттрактивен, как, например, экземпляров из ордовика Ленинградской области, но, тем не менее, при тщательных поисках можно найти образцы хорошей сохранности, вполне пригодные для использования как в экспозиционных выставочных проектах, так и для образовательных или учебных целей. На поверхности напластования сланцев, размываемых водой р. Полуденки, часто сохраняются лишь сифональные трубки с характерными пережимами [5]. Обычно они представлены цепочками последовательных слабых вздутий-бугорков на ровной сланцевой поверхности. Самые длинные экземпляры раковин эндоцератоидей среди собранных сотрудниками музея достигали 30 см в длину, а наиболее широкие фрагменты – 4 см в диаметре. Самый интересный образец с хорошо сохранившейся септальной структурой длиной 12 см выставлен в настоящее время в постоянной экспозиции Музея карста и спелеологии.

Большинство трилобитов в коллекции Музея карста и спелеологии относится к типичному для ордовика Балтоскандии роду *Asaphus* Brongniart, 1822 [6, 7]. Выборку из десяти образцов подарила музею в 2015 г. геолог из Санкт-Петербурга Н.А. Журавлева (из них пять экземпляров поставлены на музейный учет, в коллекцию основного фонда (ОФ) № 180/1-5). Однако самый первый экземпляр представителя этой характерной для палеозоя группы членистоногих появился в музее раньше.

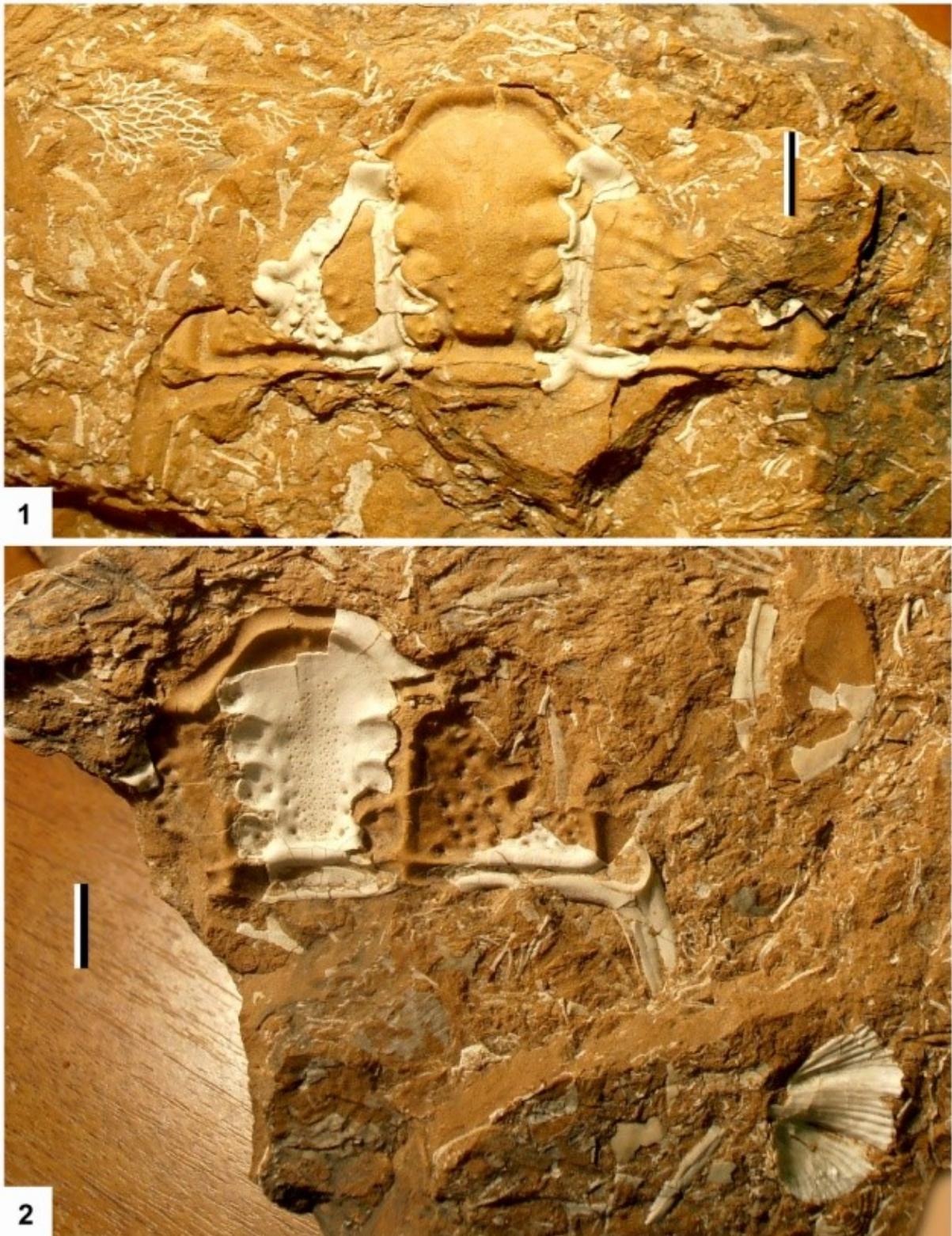


Рис. 1. *Paraceraurus* sp., цефалон без подвижных щек
1 – с позитивным рельефом, слева сверху – сетчатая колония мшанок *Chasmatopora furcata* (Eichwald);
2 – противоотпечаток, справа внизу – раковина брахиоподы cf. *Platystrophia* sp. (отряд Orthida), сходная
форма изображена в работе: [8, Taf. 127, Fig. 11]. Коллекция музея карста и спелеологии
Горного института УрО РАН, ОФ № 250/1. Длина масштабной линейки – 1 см

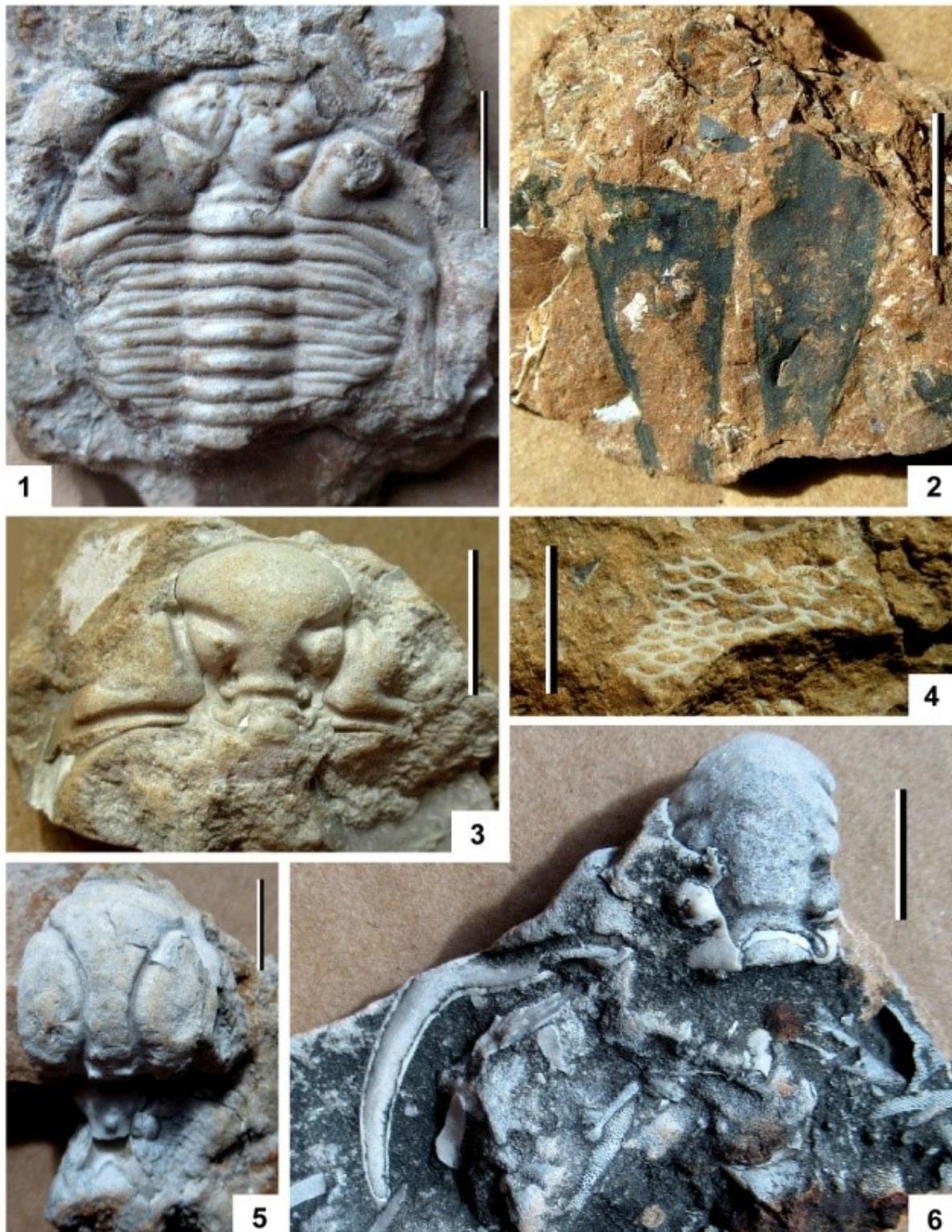


Рис. 2. Ископаемые организмы из кукерсита.

1 – *Chasmops odini* (Eichwald); 2 – два таллома бентосной макрофитной водоросли; 3 – *Chasmops* (?) sp.;
 4 – сетчатая колония мшанок *Chasmatopora furcata* (Eichwald); 5 – *Hoplolichas conicotuberculatus* (Nieszkowski), также есть сходство с *Conolichas* spp. (сходные формы изображены в работе: [8, Taf. 143, Fig. 20; Taf. 144, Fig. 28]); 6 – *Paraceraurus* sp., цефалон с хорошо сохранившимся левым щечным остроконечием. Коллекция С.В. Наугольных. Длина масштабной линейки – 1 см

К 65-летию Кунгурской лаборатории-стационара, которое отмечали в 2013 г., известный в Кунгуре коллекционер и краевед Валерий Петрович Елохин подарил музею несколько геологических и палеонтологических образцов, одним из которых является отпечаток головного щита (цефалона) трилобита *Paraceraurus* sp., сохранившийся в горячем сланце (кукерсите). Он происходит из современного уезда Ида-Вирумаа Эстонской республики. Музейные размеры образца (высота, длина, ширина): 5,5 × 19,5 × 13 см. Вместе с отпечатком цефалона *Paraceraurus* sp. в образце (на поверхности напластования) присутствуют многочисленные фрагменты мшанок, отпечатки брахиопод-ортид и пигидии мелких трилобитов. Кроме того, справа от основного экземпляра цефалона просматривается плохо сохранившийся (и более мелкий) отпечаток еще одного головного щита трилобита, возможно, того же рода (рис. 1, фиг. 2).

Образец был поставлен на музейный учет в 2022 г. (МКС ОФ № 250/1). В настоящее время он выставлен в основной экспозиции музея карста и спелеологии.

Методические приемы, использованные в работе

Несмотря на высокую аттрактивность экземпляра *Paraceraurus* sp. из экспозиции музея карста и спелеологии, неподготовленному посетителю музея (а такие посетители составляют большинство экскурсантов) трудно понять, какую именно часть и какого организма они в данном случае видят. Для решения этой проблемы авторы решили подготовить графическую схему-реконструкцию трилобита *Paraceraurus*, которая бы органично дополнила экспозицию и помогла бы понять посетителям смысл и значение данного образца (рис. 3).

Технически эта задача была решена следующим образом. Графическая реконструкция трилобита *Paraceraurus*, специально подготовленная для этого проекта, была отсканирована и в цифровом редакторе совмещена с изображением – схематической прорисовкой цефалона *Paraceraurus* из коллекции музея. При подготовке реконструкции *Paraceraurus* были использованы литературные данные [7], а также дополнительные образцы из тех же отложений из личной коллекции одного из авторов (СВН; рис. 2, фиг. 6). Было подготовлено несколько версий, с разной плотностью и яркостью изображений, а также с разными вариантами фона. В качестве основного было выбрано максимально лаконичное изображение, исключающее какую-либо неверную трактовку и позволяющее доступно показать, какое именно место в теле организма занимал экспонируемый фрагмент цефалона, который на итоговой реконструкции был выделен желтовато-охристым цветом (рис. 3). Таким образом, дополнительная визуализация комплекса ордовикских палеонтологических экспонатов позволила повысить образовательный потенциал постоянной экспозиции музея карста и спелеологии.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания Геологического института РАН. Авторы признательны В.П. Елохину (г. Кунгур) за подаренный музею образец кукерсита с цефаломом *Paraceraurus* sp., использованный для подготовки настоящей работы, а также М.Ю. Кулешову (Зоологический музей РАН, г. Санкт-Петербург) за предоставленный для изучения образец кукерсита с талломами макрофитных водорослей (рис. 2, фиг. 2).

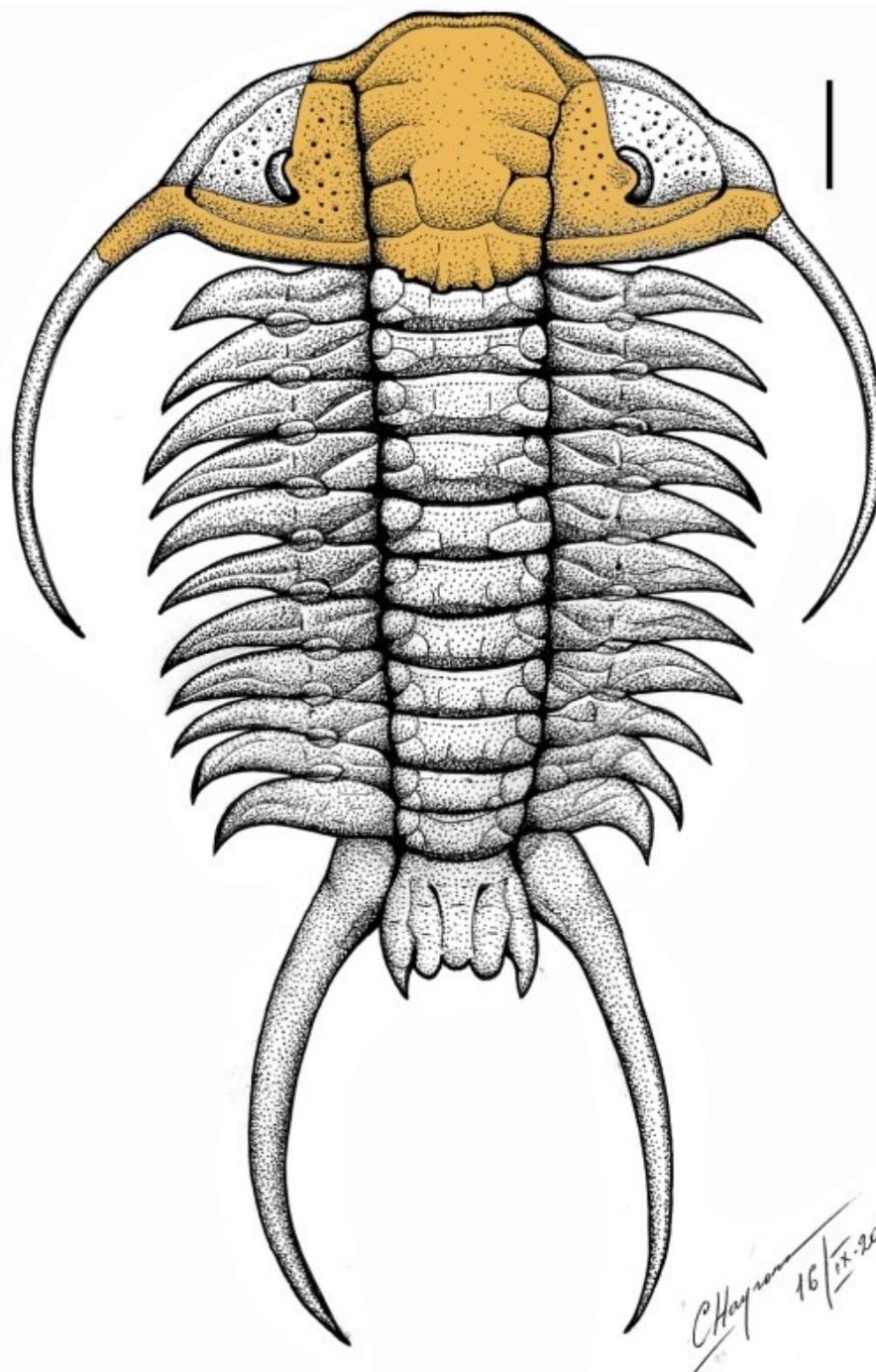


Рис. 3. Реконструкция панциря *Paraceraurus* sp.; желтовато-охристым цветом отмечена часть цефалона, экспонируемая в музее карста и спелеологии Горного института УрО РАН.
Длина масштабной линейки – 1 см

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Осетрова О.И., Наумкин Д.В. Тиманская коллекция в фондах музея карста и спелеологии Горного Института Уральского отделения РАН // Палеоэкология. Методологические основы, фактологический потенциал, применение в музейных экспозициях. – М., 2017. – С. 18-21.
2. Secord J.A. Controversy in Victorian geology: the Cambrian-Silurian dispute. – Princeton, 1986. – 364 p.
3. Цинкобурова М.Г. Старинные коллекции ордовикских беспозвоночных северо-запада Европы в Горном музее: проблемы и перспективы // Грибушинские чтения – 2019. Кунгурский диалог: тез. докл XI Междунар. соц.-культ. форума. – Пермь, 2019. – С. 500-504.

4. Naumkin D.V. Promysla – a location of marine invertebrates during middle-upper ordovician period (perm region) // Science and Society: 14th International Scientific and Practical Conference, 27-29 November 2019. – London, 2019. – P. 44-51.
5. Наугольных С.В. Разрез Промысла (местонахождение ордовикских эндоцератоидей и наутилоидей) // Геологические памятники Пермского края: энцикл. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2009. – С. 156-158.
6. Иванцов А.Ю. Определитель ордовикских трилобитов азафидного облика окрестностей Санкт-Петербурга. – М.: Палеонтологич. ин-т РАН, 2004. – 60 с.: ил.
7. Klikushin V., Evdokimov A., Pilipyuk A. Ordovician trilobites of the St. Petersburg region, Russia. – St.P.: Diton, 2009. – 544 p.
8. Neben W., Krueger H.H. Fossilien kambrischer, ordovizischer und silurischer Geschiebe. – Staringia, 1979. – № 5. – 63 p.

УДК 551.44.477

DOI:10.7242/echo.2023.1.4

КАРТЫ И ПЛАНЫ КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЫ. КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ НАСЛЕДИЕ ТРЕХ ВЕКОВ

Д.В. Наумкин, М.В. Богомаз
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: История картографирования Кунгурской ледяной пещеры (Средний Урал, Россия) насчитывает более трех столетий. Ее первые планы появились в начале XVIII века (1703 г.). Таким образом, Кунгурская пещера была закартирована одной из первых в Европе. Авторство первого плана, принадлежащего С.У. Ремезову, установлено лишь в начале XX в., до этого считалось, что он составлен шведом Ф.И. Таббертом фон Страленбергом, впервые опубликовавшим его в 1730 г. В 1733 г. известный натуралист И.Г. Гмелин впервые употребил в названии Кунгурской пещеры слово «ледяная». В XIX в. глазомерный план пещеры опубликовал М.Я. Киттары. В течение XX в. инструментальные изыскания проводились в 1934-1935 гг. (И.М. Переслегин) и 1960-1964 гг. (Е.П. Дорофеев). План Е.П. Дорофеева был оцифрован в 1999 г. С 2018 г. ведутся работы по созданию нового плана с использованием современных методик и инструментов.

Ключевые слова: Кунгурская пещера, картография, история исследований, карты и планы, глазомерная и инструментальная съемка, музей карста и спелеологии.

Введение

Среди многочисленных пещер России Кунгурская ледяная пещера занимает особое место. С «Чертежа Кунгурских пещер», составленного тобольским картографом Семёном Ульяновичем Ремезовым в 1703 г., начинается история спелеологических исследований страны. С тех пор ее изучение сопровождалось картографическими работами, результаты которых – дошедшие до наших дней карты и планы – в хронологическом порядке описаны в данной статье. 2021 год, объявленный Годом карста и пещер, знаменателен тем, что именно в этом году закончились работы по созданию нового инструментального плана пещеры, который, вероятно, определит ее картографический облик на ближайшее столетие.

Кунгурская ледяная пещера известна местным жителям давно. Неизвестно, кто и когда первым обнаружил пещеру – ее официального первооткрывателя не существует. О ее существовании, вероятно, знали коренные жители этих мест – финно-угорские народы. Их древние поселения, датируемые VIII-IX веками н.э., расположены прямо над пещерой, на поверхности Ледяной горы. Они хорошо известны археологам (Ермаково городище – археологический памятник федерального значения). Свидетельства русского присутствия в районе Кунгурской пещеры относятся к концу XVI века – в гроте Бриллиантовом были найдены чугунные пушеч-

ные ядра [1]. Возможно, эти находки связаны с личностью одного из народных героев России – покорителя Сибири атамана Ермака.

Расположение пещеры имело большое значение в ее становлении как популярного экскурсионного объекта. Близость к населенным пунктам (деревни Филипповка и Беркутово, которые сегодня являются пригородами города Кунгура), транспортная доступность – важные факторы для ее изучения в прошлом и в настоящем. Кунгур возник на берегах реки Сылвы как крепость – форпост Русского государства на пути в Сибирь – в 1663 г. В XVIII веке через город прошла основная дорога в Сибирь – Сибирский тракт. И все путешественники, проезжавшие через Кунгур, имели возможность посетить пещеру. Среди них были и знаменитые ученые, чьи имена стали достоянием мировой науки [2]. Благодаря подвижническим усилиям А.Т. Хлебникова, с 1914 г. Кунгурская пещера является экскурсионной. В 2011 г. она вступила в Ассоциацию экскурсионных пещер мира (International Show Caves Association) [3]. Сегодня это самая известная и посещаемая из экскурсионных пещер России [4].

Как известно, автором первого плана Кунгурской пещеры долгое время считали шведского исследователя Ф.И. Табберта фон Страленберга. Капитан шведской армии, он попал в плен в битве под Полтавой и был сослан в Сибирь, в г. Тобольск, где провел 13 лет. Будучи очень любознательным и всесторонне развитым человеком, он с разрешения русских властей (князь М.А. Черкасский) принял участие в сибирской экспедиции Д.Г. Мессершмидта, которая обследовала обширные пространства Западной и Восточной Сибири в 1721-1722 гг. Вернувшись домой, он опубликовал книгу о своих путешествиях, которая вышла в Стокгольме в 1730 г., в этом же году она была напечатана в Лейпциге, а затем переведена на многие европейские языки: в 1738 г. – на английский, в 1757 г. – на французский, в 1780 г. – на испанский [5]. Именно в этой книге и был впервые опубликован план Кунгурской пещеры, вскоре ставший широко известным в Европе. Ранее аналогичный план Кунгурской пещеры был выслан Д.Г. Мессершмидтом из Тобольска в Петербург. Он сохранился до наших дней в архиве Академии наук. В 1940 г. известный советский источниковед-архивариус А.И. Андреев [6] убедительно доказал, что этот план, как и тот, что опубликовал в 1730 г. фон Страленберг, на самом деле представляют собой копии утраченного «Чертежа Кунгурских пещер», выполненного в 1703 г. выдающимся тобольским картографом, архитектором и иконописцем Семеном Ульяновичем Ремезовым. Примечательно, что оба иностранца не указали подлинного автора, претендуя на приоритет в этом вопросе. Картографические работы С.У. Ремезова стали достоянием мировой науки еще при его жизни, и в течение XVIII века неоднократно воспроизводились в Европе, нередко с изменениями в оформлении, деталях, и обычно без указания авторства.

В настоящее время в Кунгуре имеется три подлинных старинных гравюры, воспроизводящих «Чертеж Кунгурских пещер» С.У. Ремезова 1703 г. Все они выполнены во Франции во второй половине XVIII века разными граверами. Две из них хранятся в Кунгурском муниципальном музее [7], третья, подробно описанная ниже, приобретена в 2005 г. на аукционе в г. Минске (Белоруссия) Горным институтом, и хранится в ведомственном музее карста и спелеологии [8]. Ее копия экспонируется в постоянной экспозиции музея.

Гравюра выполнена на серой вержированной бумаге, на одном листе в разворот. Размеры листа – 25,3 × 37,2 см, гравировальной доски – 19,2 × 27,9, размер изображения (по рамке) – 17,3 × 26 см. Название дано внизу по центру листа (по-французски), в нижнем левом углу листа указана фамилия гравера – *B. de Bakker*. Кроме того, в верхнем левом углу листа есть надпись латиницей «Tom XXIV». В

целом гравированный план аналогичен планам из бумаг Д.Г. Мессершмидта и из книги фон Страленберга. Показаны реки, дороги, Кунгурский кремль, печи для обжига гипса рядом с пещерой, а в самой пещере – гроты, проходы, глыбовые завалы, кресты, икона Св. Николая, гидрологические объекты, а также пресловутая «пирамида», изображение которой есть на всех планах пещеры XVIII века. Реки, озера и дороги показаны в горизонтальной проекции, печи для обжига гипса, Кунгурский кремль, кресты и икона Св. Николая – внемасштабными условными знаками. Четкими надписями обозначена река Сылва и Кунгурский кремль, остальные объекты имеют лишь буквенные индексы (рис. 1). Это сближает нашу гравюру с раритетами, хранящимися в фондах Кунгурского краеведческого музея [7; 9]. На плане из книги фон Страленберга вся топонимия представлена буквенными индексами, а у Д.Г. Мессершмидта наоборот, буквенные индексы отсутствуют, и все объекты подписаны.

Наиболее сильно наша гравюра отличается от гравюры из фондов муниципального музея «Plan et coupe horifontale du labyrinte fouterrain de Kungour», поступившей в музей в 1992 г., которая выполнена перспективным рисунком. Кроме того, место слияния рек Ирени и Сылвы смещено на ней в нижний левый угол, в правом верхнем дана врезка с расшифровкой условных обозначений, обозначен линейный масштаб. В целом этот вариант гравюры отличается более тщательной прорисовкой деталей и максимально отличен от плана, опубликованного фон Страленбергом [9].

В 2010 г. в фонды Кунгурского музея от инспектора-археолога Пермского краевого центра охраны памятников истории и культуры Р.Ф. Вильданова поступила вторая гравюра, являющаяся листом из первого издания «Всеобщей истории путешествий... аббата Прево 1768 г. [7]. Она наиболее сходна с хранящейся в нашем ведомственном музее (главные ее отличия – врезка с условными обозначениями и отсутствие фамилии гравера). «Всеобщая история путешествий...» Прево переиздавалась в Париже в 1779 г., и именно в этом многотомном издании в 24 томе на 128 стр. и помещалась наша гравюра, приобретенная в 2005 г. в Минске [8].

Конечно, первый план пещеры, созданный в начале XVIII века, и не мог отличаться особой точностью, кроме того, на нем было множество вымышленных деталей вроде «пирамиды» или «лужайки с цветами». Уже в 40-е годы XVIII века начальник уральских горных заводов В.Н. Татищев писал по поводу книги фон Страленберга: «Описует Кунгурскую пещеру весьма неправильно, ибо видно, что он сам в ней не был, но слыша, написал. Я же сам в ней был и нарочно посылал чертеж учинить, который ни мало не согласуется». Тем не менее, плана Кунгурской пещеры, созданного В.Н. Татищевым, в его архиве историками не найдено, очевидно, он не сохранился до наших дней. И следующий план Кунгурской пещеры, который известен в наше время, принадлежит знаменитому естествоиспытателю, профессору Петербургской Академии наук И.Г. Гмелину.

В 1733 г. он вместе с профессором Г.Ф. Миллером и художником Беркханом посетил Кунгур в составе Великой Северной экспедиции, направлявшейся на Дальний Восток. Наняв местного проводника, они провели в пещере целый день [10]. В результате появился план, составленный с использованием компаса (рис. 2, слева).

Судя по масштабу и направлению ходов, план составлен только до грота Крестовый. Ледяная колонна, отмеченная буквой «Е», указанная на плане, расположена под органической трубой, где и в настоящее время зимой наблюдается активный рост сталагмитов. Совпадает с реальностью южная граница грота и общее направление ходов пещеры. Изображенные застывшие озера, вероятно, представляют собой покровные льды, сохранившиеся до наших дней, хотя к концу XX века их площадь сильно сократилась [11].

В конце грота в то время находился крест, изображенный на плане; место, обозначенное буквой «F», соответствует гроту Данте. Изображены на плане также гроты Скандинавский, Полярный и Бриллиантовый, разделить которые очень сложно (рис. 2, слева). И.Г. Гмелин первым из исследователей называет Кунгурскую пещеру «ледяной».

Следующий план Кунгурской пещеры, имеющийся в нашем распоряжении, составлен спустя столетие, в начале 1840-х гг. Он принадлежит профессору Казанского университета М.Я. Киттары. В статье, опубликованной в 1848 г. в Журнале министерства внутренних дел, затем в Пермских губернских ведомостях, и, наконец, в 1893 г. в Адрес-Календаре Пермской губернии на 1894 год, М.Я. Киттары подробно описывает пещеру до Большого подземного озера и приводит составленный им глазомерный план (рис. 2, справа), который до работ И.М. Переслегина (1934-1935 гг.) использовался авторами ряда статей и заметок. На плане мы видим названия гротов Бриллиантовый и Резной (Коралловый). Направление ходов и расположение гротов соответствует реальности.

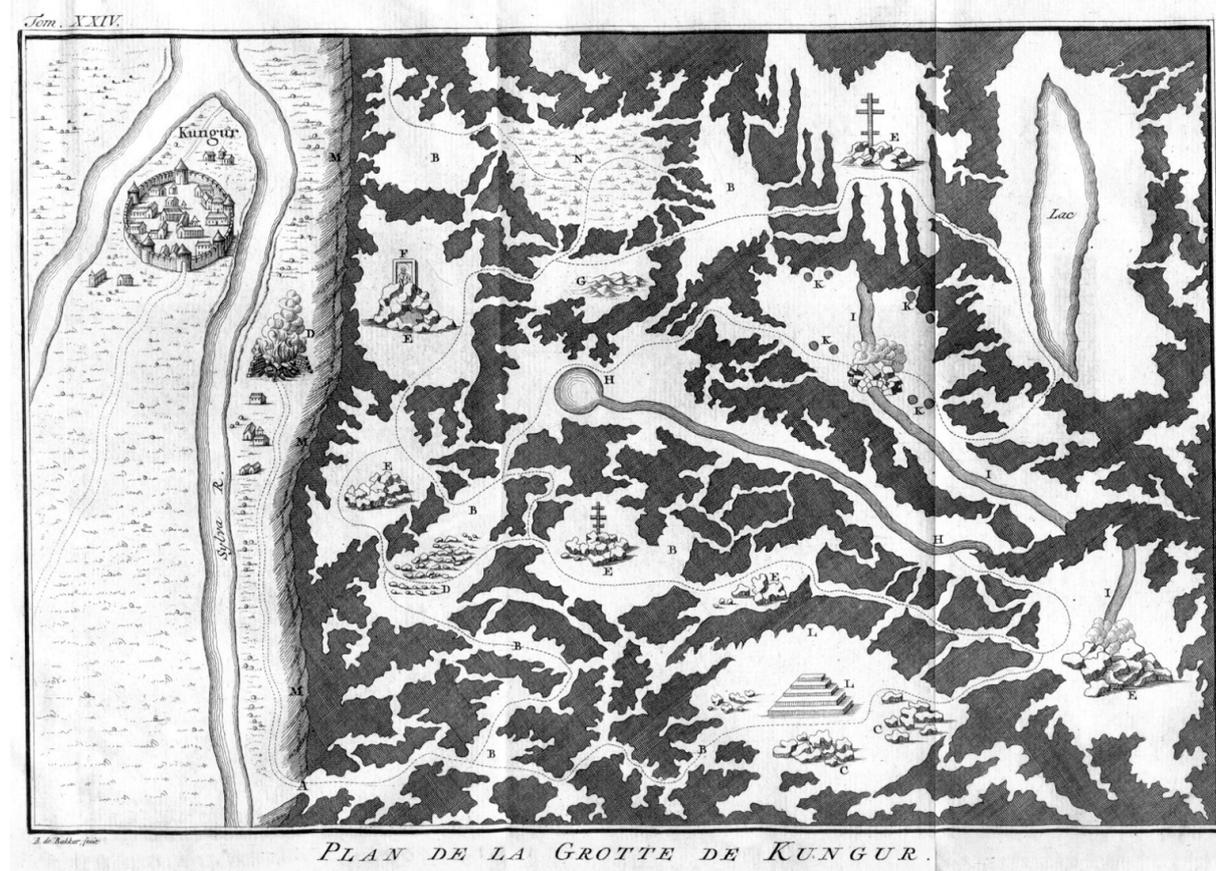


Рис. 1. Французская копия «Чертежа Кунгурских пещер» С.У. Ремезова. Париж, 1779. Музей карста и спелеологии ГИ УрО РАН. Инв. № ОФ 79

Считалось, что в XX веке очередной этап в истории картографирования пещеры связан с экспедицией «Гидростройпроекта» (1934-1935 гг.). Однако в архиве Кунгурской лаборатории Горного института есть глазомерный план заозерной части пещеры, составленный неизвестными исследователями ранее 1934 г. (рис. 3). План (от грота Западного до грота Длинного) отличается детальностью изображения. На нем нанесены осыпи и озера. Грот Геологов обозначен как грот Вечер. Впервые на картах появилось название грота Длинный. Надпись в верхнем правом углу, датированная 9 декабря 1939 г. (за подписью техника-геодезиста Булдакова), подтверждает, что этот картографический материал не является фрагментом плана проф. М.Я. Киттары 1848 г.

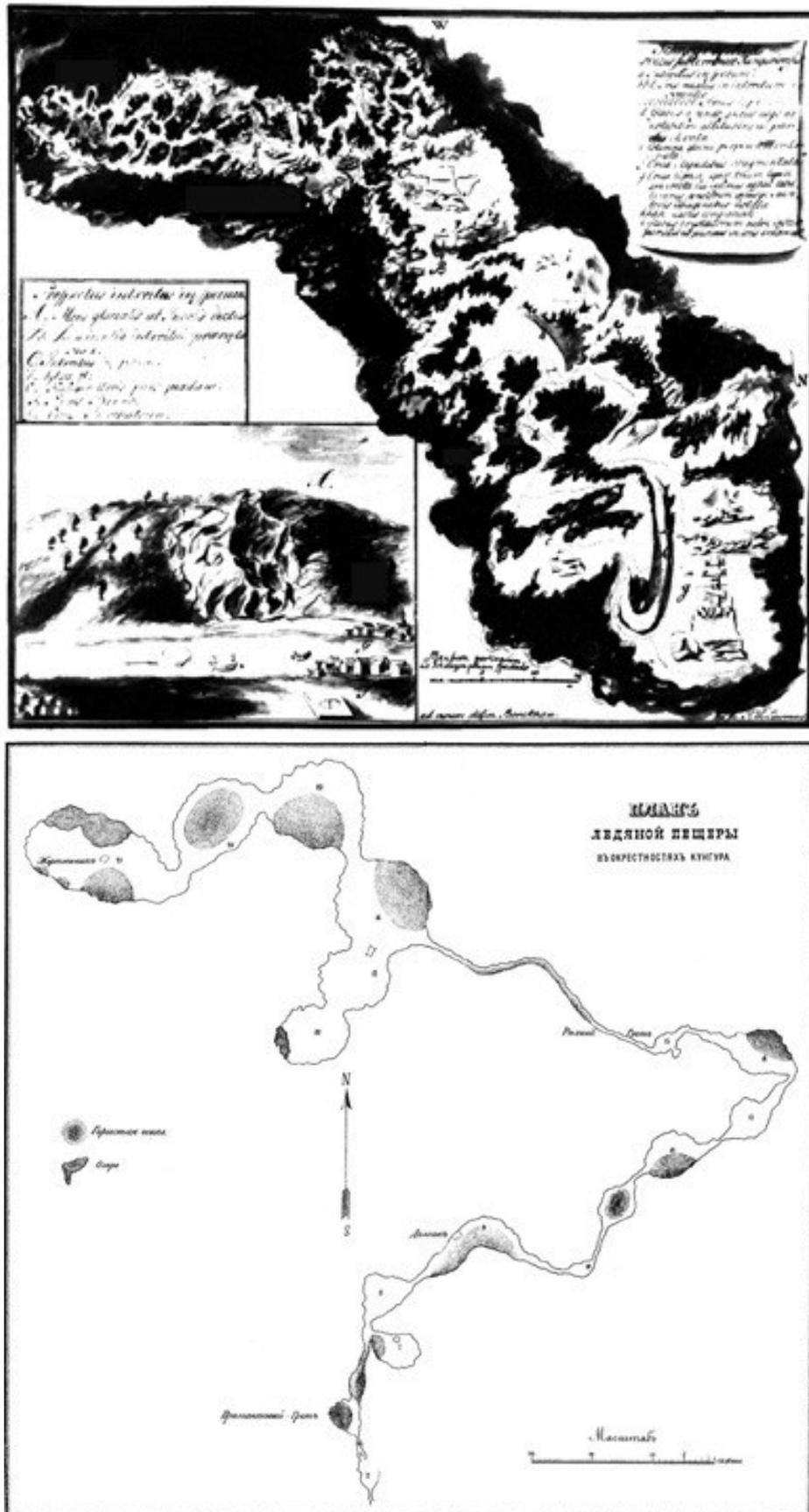


Рис. 2. План Кунгурской пещеры И.Г. Гмелина. 1733 (вверху);
План Кунгурской пещеры М.Я. Киттары. 1848 (внизу). По: Дорофеев и др. [1]

В 1934-1935 гг. в пещере работала группа геологов «Гидростройпроекта» под руководством И.М. Переслегина. Это было первое масштабное исследование пещеры силами специалистов. Они провели большую работу по разведке и съемке новых ходов и гротов. Были открыты и нанесены на план участка пещеры от грота Склеп до грота Колизей, обширная заозерная часть от грота Длинного до грота Переслегина на север и от грота Длинного до грота Вышка на юг. На поверхности Ледяной горы проведена мензульная съемка надпещерного участка в масштабе 1:5000. В результате появился полуинструментальный план пещеры, на котором впервые использованы названия гротов: Смелых, Грозный, Геологов, Великан, Близнецы, Грязный, Вышка (рис. 4). Он неоднократно воспроизводился в популярных изданиях о Кунгурской пещере.

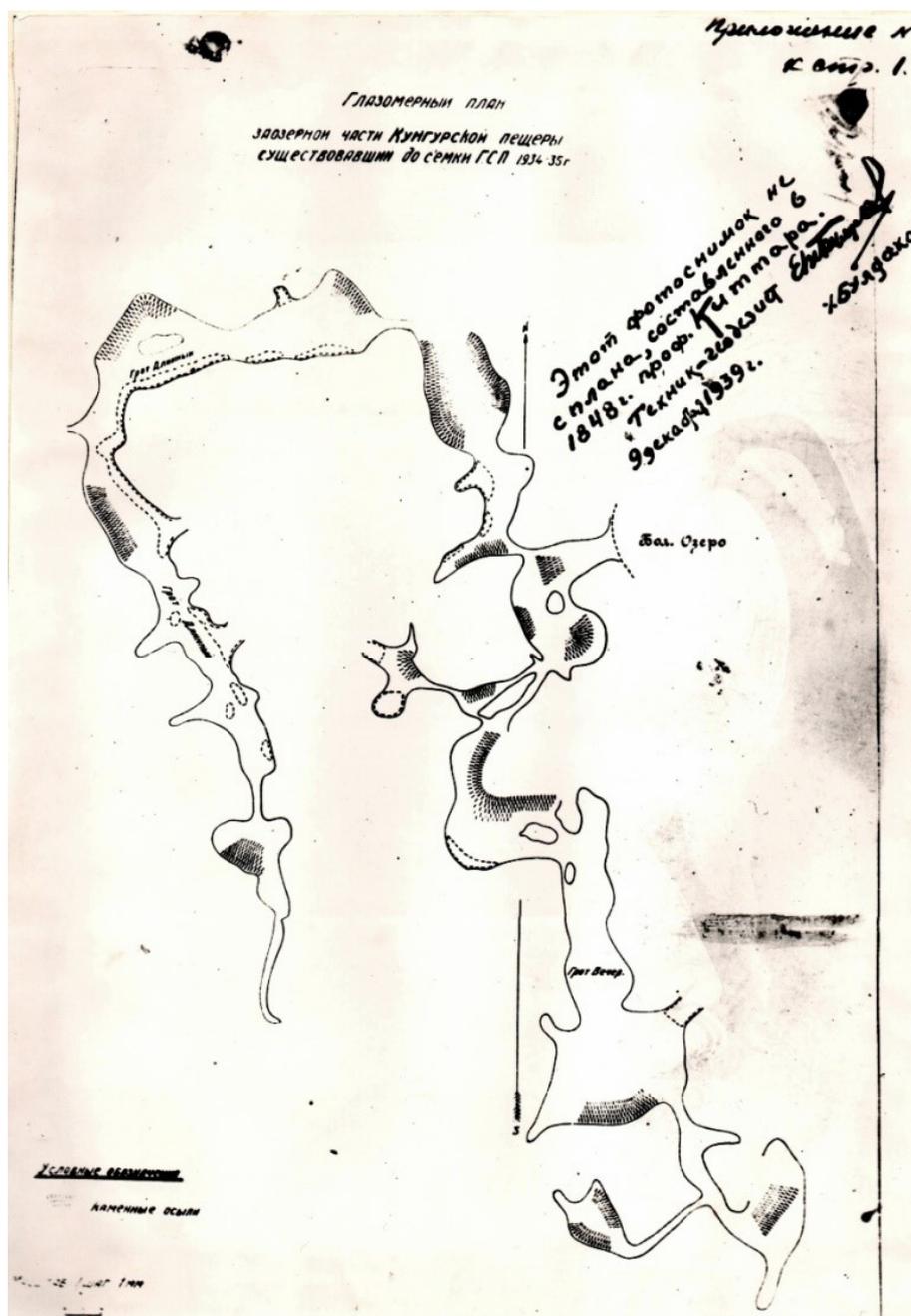


Рис. 3. Глазомерный план заозерной части Кунгурской пещеры (от грота Западного до грота Длинного), составленный неизвестными исследователями ранее 1934 г. Архив Кунгурского стационара ГИ УрО РАН

Дальнейшее изучение пещеры выявило необходимость уточнения и дополнения плана 1935 г. Картографические работы велись в зимние периоды на протяжении 1960-1964 гг. под руководством научного сотрудника Кунгурской лаборатории Е.П. Дорофеева. В них принимали участие научный сотрудник А.Д. Бураков, лаборанты В.Я. и С.Я. Коротаевы, экскурсоводы А.М. Бахтигареев, В.М. Хлебников, С.Н. Дорофеева. В съемках одновременно участвовали 2-3 человека. Камеральную обработку выполняли Е.П. Дорофеев, С.Я. Коротаев, В.Я. Коротаев, С.Н. Дорофеева. Материалы работ, в том числе журнал координат точек съемки, и уникальные фотографии, запечатлевшие пещеру и надпещерный участок с воронками, какими они были в начале 1960-х гг., представлены в виде отчета, хранящегося сегодня в Кунгурской лаборатории Горного института.



Рис. 4. План Кунгурской пещеры экспедиции «Гидростройпроект». 1934-1935. По: А.К. Воронихин [12]. Карандашная правка В.С. Лукина

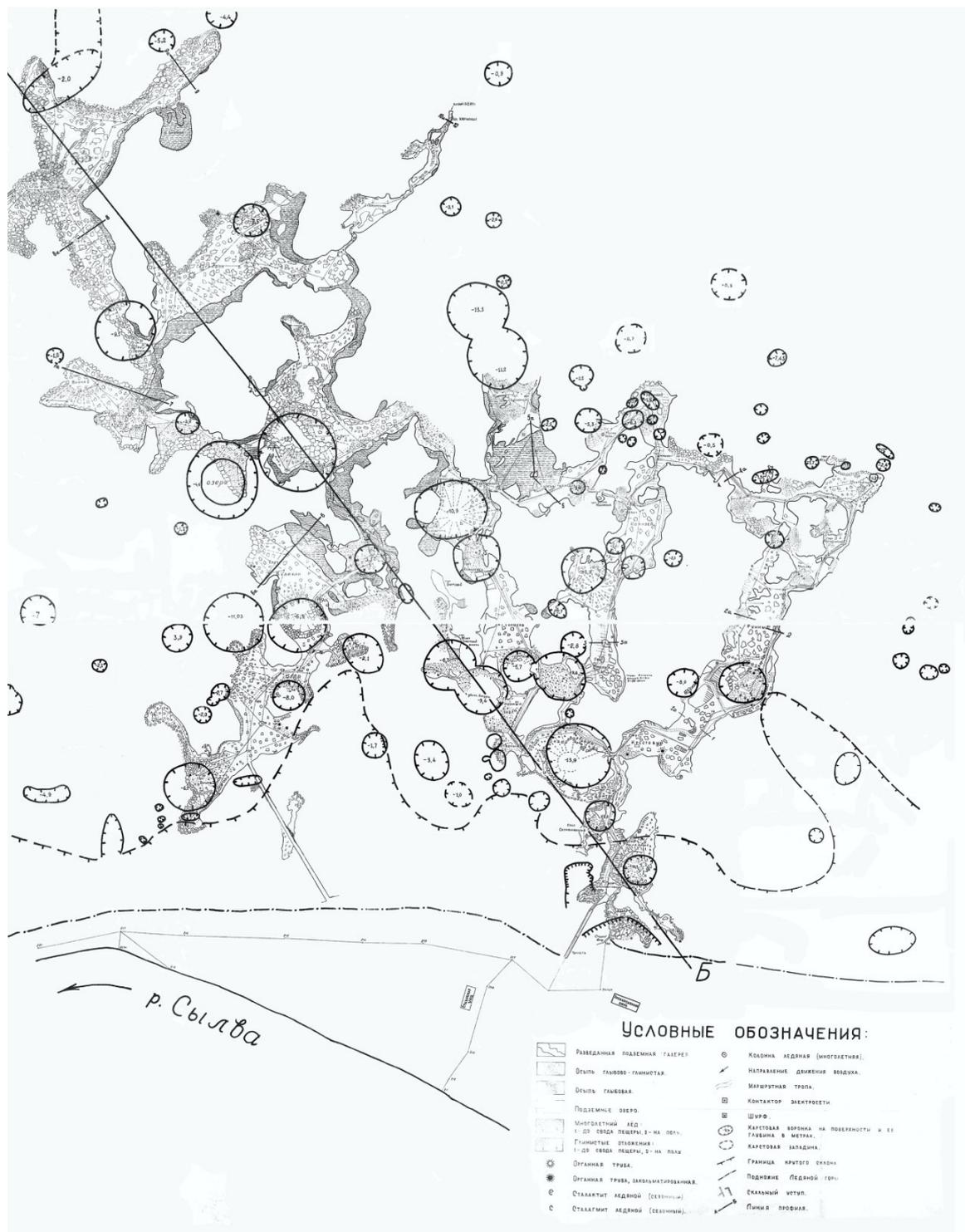


Рис. 5. План Кунгурской пещеры, совмещенный с поверхностью Ледяной горы.
Съемка Е.П. Дорофеева. 1960-1964 гг.

В ходе работ было пройдено 2781,32 м теодолитных ходов, 3118,37 м – bussольных ходов. Всего – 5898,69 м. Если исключить 300 м bussольных ходов, пройденных для нанесения контуров крупных гротов, общая протяженность Кунгурской пещеры на момент окончания съемки составила 5600 м. Было существенно уточнено взаимное расположение гротов и соединяющих их проходов, нанесены на план гроты, по каким-либо причинам не снятые в 1934-1935 гг. – система ходов к востоку от старого входа в

пещеру, грот Скандинавский, проход из грота Данте в грот Западный, грот Заозерный, ход на север от грота Длинного до грота Близнецы, и др. Кроме того, в ходе работ был открыт новый, неизвестный ранее грот Космический (рис. 5). Этот план Кунгурской пещеры, выполненный с максимально возможной для того периода точностью и имеющихся технических возможностей, определил ее картографический «облик» на следующие полвека. Он постоянно использовался в практике научных исследований, неоднократно печатался в десятках статей, монографиях [13] и популярных публикациях [1; 14-16], а также довольно большим тиражом был воспроизведен в сувенирно-полиграфическом виде для реализации посетителям пещеры (рис. 6). В настоящее время тираж полностью реализован, и в нашем распоряжении есть лишь один подобный экземпляр.

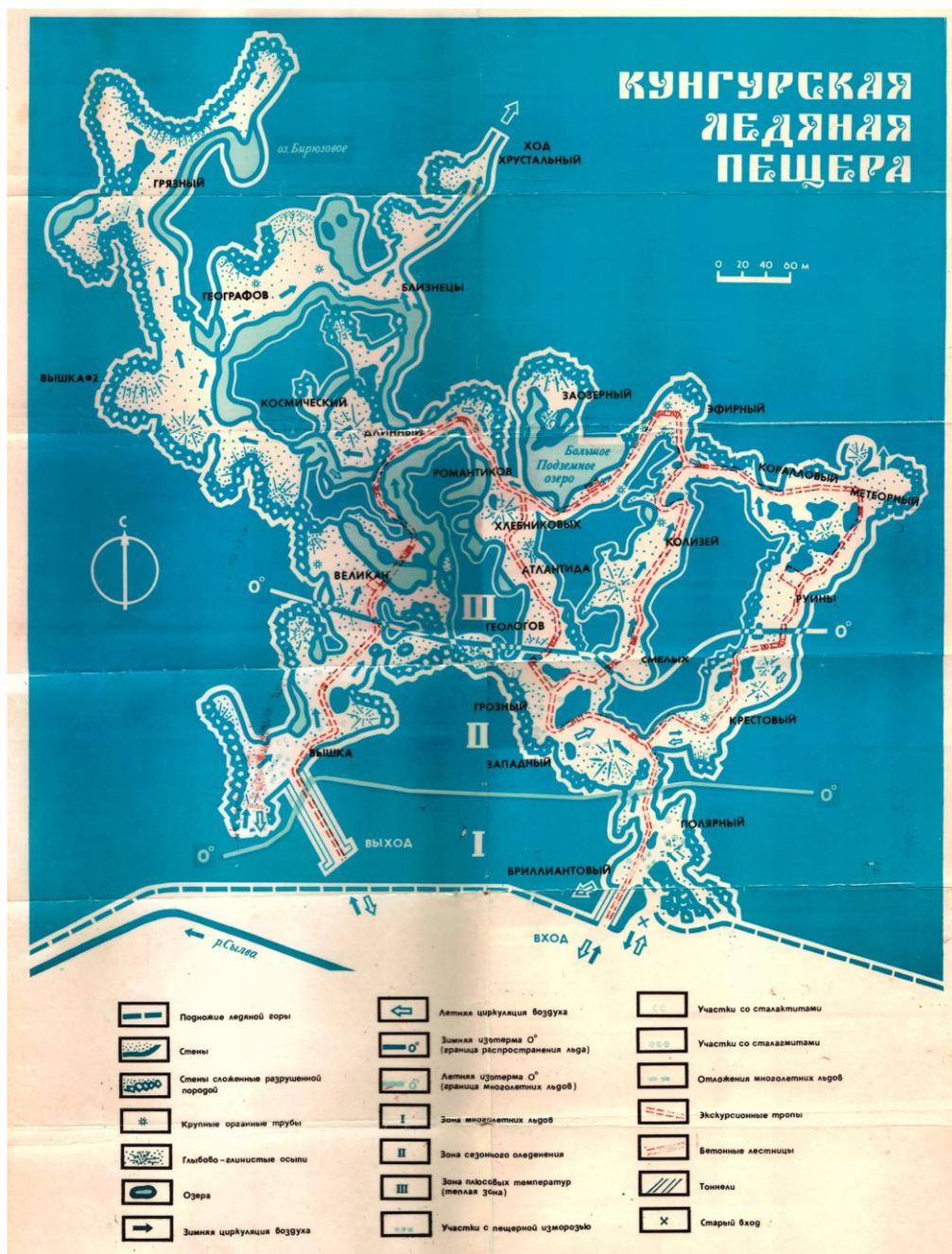


Рис. 6. Сувенирный план Кунгурской пещеры, выполненный на основе съемки Е.П. Дорощева. 1980. Музей карста и спелеологии ГИ УрО РАН. Инв. № НВ 96/34. Дар Т.Г. Алентьевой (г. Челябинск)

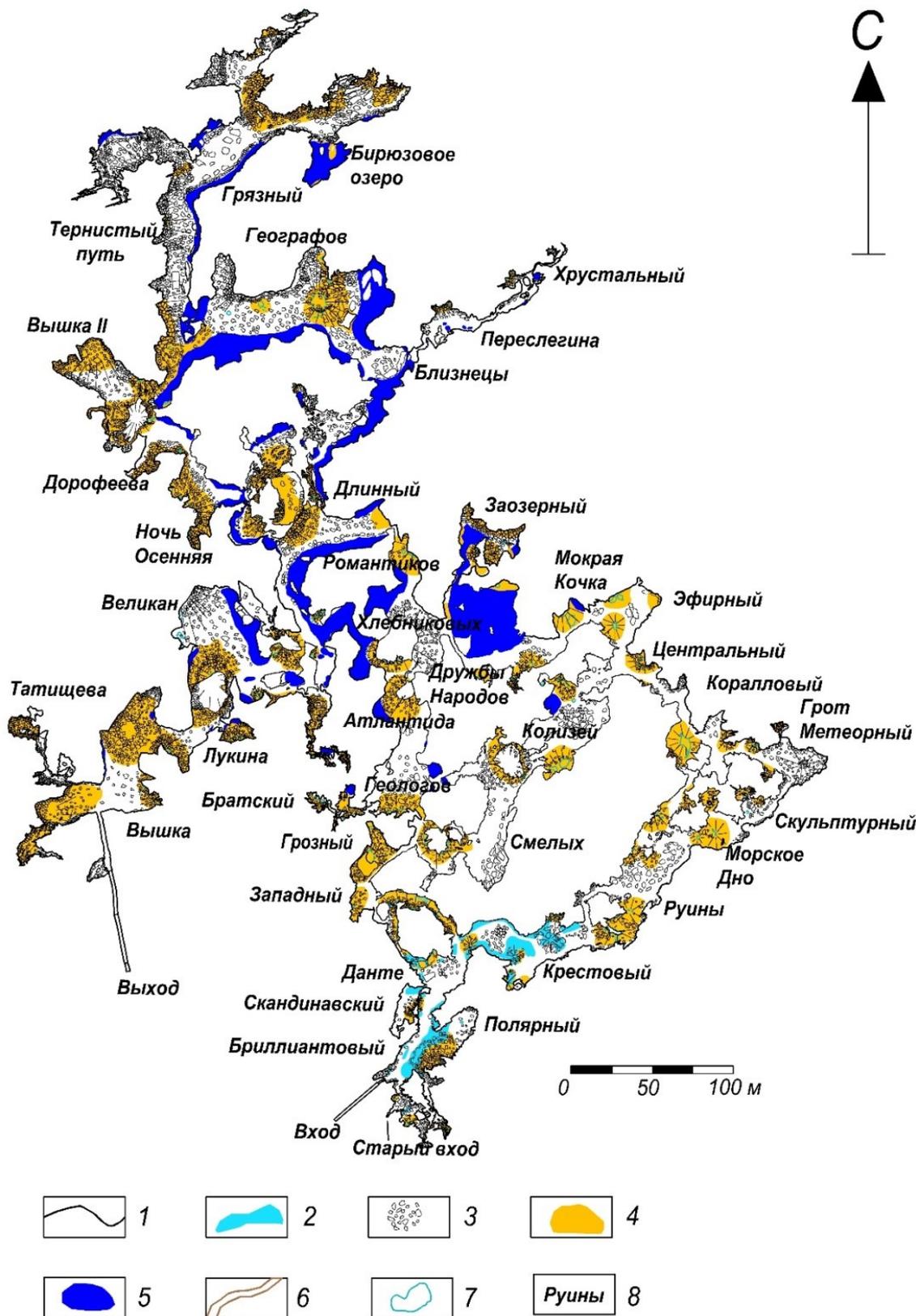


Рис. 7. Карта-схема Кунгурской пещеры. Съемка А.В. Красикова, С.Ф. Кудымова. 2021.

Условные обозначения:

- 1 – контур пещеры; 2 – покровный лед; 3 – осыпи глыбово-щебнистые; 4 – осыпи глинистые; 5 – озера;
- 6 – экскурсионная тропа; 7 – «органные трубы» и зоны дробления; 8 – названия гротов

В 1999 г. план Е.П. Дорофеева был оцифрован И.А. Лавровым в программе MapInfo 5.0. В процессе работы были учтены изменения, произошедшие с момента съемки пещеры Е.П. Дорофеевым – на плане впервые показаны новый выходной тоннель, а также гроты Братский и 50-летия ВЛКСМ (это советское название сегодня считается историческим). Впервые на плане пещеры появились фамилии Лукина, Дорофеева, Татищева [17]. Этот электронный вариант оставался востребованным в практике научных исследований еще два десятилетия.

Уже по предварительным результатам возобновившейся в 2016 г. топоъемки длина Кунгурской пещеры составила 6420 м [18]. С 2016 по 2018 гг. по результатам топографических съемок, выполненных сотрудниками стационара и спелеологами, протяженность пещеры увеличилась на 800 м, а площадь – на 11 тыс. м². Тогда же было высказано предположение, что ее реальная протяженность может превысить 8 км. С этого времени (2018-2021 гг.) начались регулярные работы, основной объем которых выполнен инженером А.В. Красиковым и маркшейдером С.Ф. Кудымовым, при участии пермских спелеологов Л.Н. Башариной, О.О. Додоновой, И.Ю. Герасимовой, А.А. Коньшина.

При интерпретации данных, полученных в результате топографических съемок, был составлен новый совмещенный топографический план Кунгурской пещеры в масштабе 1:500 (рис. 7). С помощью новых данных были пересчитаны линейные, площадные и объемные характеристики отдельных гротов и галерей и всей пещеры в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кунгурская ледяная пещера / фото Л. Вейсман; худож. А. Бобров; авт. текста Е.П. Дорофеев, В.Н. Андрейчук. – Пермь: Кн. изд-во, 1990. – 304 с.: ил.
2. Козлова Н.Н., Наумкин Д.В. Имена ученых в пространстве Кунгурской Ледяной пещеры // Геополитика и экодинамика регионов. – 2014. – Т.10, № 1. – С. 623-632.
3. Рапп В.В. Вступление Кунгурской ледяной пещеры в Международную ассоциацию экскурсионных пещер // Грибушинские чтения – 2011. На стыке традиций, эпох, континентов: тез. докл. VIII Всерос. науч.-практ. конф. – Кунгур, 2011. – С. 354-356.
4. Polukhina A.N., Lyakhnitsky Yu.S., Lezhnin V.V. The concept of regulated use of natural heritage sites included in the tourist cluster: A Russian caves case study // Journal of Cave and Karst Studies. – 2019. – V. 81, № 3. – P. 162-173.
5. Андреев А.И. Очерки по источниковедению Сибири. Вып. 2: XVIII век. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1965. – С. 38-41.
6. Андреев А.И. Очерки по источниковедению Сибири. Вып. 1: XVII век. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 147.
7. Долгих Л.А. Кунгурская Ледяная пещера в картографических произведениях XVIII века // Спелеология и спелестология: развитие и взаимодействие наук: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Набережночелн. гос. пед. ин-т [и др.]. – Набережные Челны, 2010. – С. 33-35.
8. Наумкин Д.В. Французская гравюра в фондах Музея карста и спелеологии ГИ УрО РАН (первый план Кунгурской Ледяной пещеры С.У. Ремезова) // Пещеры. – Пермь: ПГУ, 2008. – Вып. 31. – С. 195-197.
9. Долгих Л.А. Парижская гравюра из фондов Кунгурского музея (первый план пещеры С.У. Ремезова) // Кунгурская Ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности: материалы междунар. науч.-практ. конф. / ГИ УрО РАН [и др.]. – Кунгур 2003. – С. 55-58.
10. Козлова Н.Н., Наумкин Д.В. «Дорога к пещере, дорога в пещере...» // Спелеология и спелестология: сб. материалов конф. – 2012. – № 3. – С. 265-267.
11. Кадебская О.И., Наумкин Д.В. Антропогенное воздействие на Кунгурскую Ледяную пещеру и прилегающую территорию // Горное эхо. – 2002. – № 4 (10). – С. 15-26.
12. Воронихин А.К. Кунгурская Ледяная пещера: в помощь экскурсанту. – Молотов: Молотовгиз, 1951. – 24 с.
13. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянского; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – 376 с.: ил.

14. Кунгурский заповедный край: Природа Кунгурского района: современное состояние, охраняемые объекты, исторические заметки / [сост. Наумкин Д.В., Севастьянов В.М., Лавров И.А.]. – Пермь: Раритет-Пермь, 2004. – 120 с.: ил.
15. Дублянский В.Н., Кадебская О.И. По Кунгурской Ледяной пещере. – Пермь: Звезда, 2004. – 131 с.: ил.
16. Козлова Н.Н., Наумкин Д.В., Морозова С.В. Кунгурская пещера: известная и неизвестная / ООО «Сталагмит-Экскурс». – Кунгур: ООО Кунгурская типография, 2016. – 194 с.
17. Лавров И.А., Чугаева А.А. Электронный план Кунгурской ледяной пещеры // Пещеры: межвуз. сб. науч. тр. / ПГУ. – Пермь, 2001. – Вып. 27-28. – С. 73-75.
18. Богомаз М.В. Уточнение плана и морфометрических показателей Кунгурской Ледяной пещеры // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – С. 31-36. – DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.9.

УДК 622.016.32

DOI:10.7242/echo.2023.1.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБСЛЕДОВАНИЯ ЮГО-ЗАПАДНОГО ШАХТНОГО ПОЛЯ ЯНЫШ-ТАКИЛЬСКИХ КАМЕНОЛОМЕН

М.Ю. Сохин

Русское общество спелестологических исследований, Москва

Аннотация: Юго-западное поле Яныш-Такильских каменоломен приурочено к Яковенковской синклинали, расположенной в юго-восточной части Керченского полуострова, в 3 км юго-восточнее с. Заветное. Здесь разрабатывался ручным способом пильный известняк-ракушечник. Шахтное поле имеет длину около 700 м и представлено небольшими карьерами-врезками, расположенными вдоль склона в два ряда. В некоторых из них находятся подземные выработки протяженностью от 26 до 33 метров. Начало разработки относится ко второй половине XIX в. и в 1929 г. еще продолжались.

Ключевые слова: каменоломни, известняк, шахтное поле, Керченский полуостров.

В сентябре 2021 г. состоялся совместный выезд Русского общества спелестологических исследований (РОСИ, г. Москва) и военно-патриотического спортивно-туристического клуба «Набат» (ВПСТК «Набат», г. Керчь) для обследования шахтных полей Яныш-Такильских каменоломен. Особое внимание было уделено изучению подземных выработок юго-западного участка, расположенного в 400 м к юго-западу от северо-восточного шахтного поля и представляющего собой обособленную группу выработок, расположенных в небольших карьерах-канавах (рис. 1). В процессе исследований была проведена топосъемка и описание подземных каменоломен (рис. 2).

Яныш-Такильские каменоломни приурочены к Яковенковской синклинали, расположенной в юго-восточной части Керченского полуострова и практически полностью размытой морем. Сохранившееся северо-западное крыло, протяженностью около 10 км, ориентировано с юго-запада на северо-восток и простирается от мыса Такиль до с. Яковенково. Здесь выходит на поверхность полоса мезотических пильных известняков-ракушечников, окаймленных цепочкой массивов рифовых мшанковых известняков. Пласты, наблюдаемые в карьерах, падают в юго-западном направлении по азимуту 140° и с наклоном 16°, что соответствует общему падению пластов в крыле складки [1]. Подробное геоморфологическое и геоструктурное описание района изложено в предыдущей статье автора [2].

Шахтное поле расположено на юго-западном склоне Западно-Такильской гряды холмов, к северо-востоку от горы Джурга-Оба и к западу от урочища Старый Маяк. Основная добыча камня велась открытым способом ручными пилами. Естественный

рельеф местности нарушен небольшими карьерами, и их отвалами. На склонах гряды сохранилось около 10 таких карьеров-врезок, протянувшихся двумя рядами вдоль склона на расстояние около 700 м. Длина карьеров варьирует от 20 до 150 м, подошва расположена на глубине 2-3 м от поверхности. Конфигурации южных бортов карьеров довольно сложные и представляют собой ломаные линии. Это, вероятно, явилось одной из причин, по которой выходящие из них выработки, даже расположенные рядом, имеют разную направленность.

Подземные выработки представлены небольшими полостями относительно хорошей сохранности, протяженностью до нескольких десятков метров.



Рис. 1. Расположение шахтных полей Яныш-Такильских каменоломен:
1 – юго-западное, 2 – северо-восточное

Каменоломня Яныш-Такильская-1

Вход расположен в небольшом карьере, ориентированном по простиранию пластов. Проход перекрывает отсевиный блок известняка шириной 2 м и длиной около 6 м, за которым сохранились остатки приустьеовой камеры шириной около 5 м и глубиной 1,3 м. Входное отверстие в виде щели, оставшейся между монолитной стеной и блоком. В дальней стенке камеры расположен входной проем, высота которого составляет 0,5 м, а ширина около 1,0 м. Видимая толщина кровли до поверхности составляет 1 м, из которых 0,4 м монолитный известняк, выше которого залегает грунт (рис. 3).

Выработка представляет собой одиночную крутонаклонную штольню (с углом наклона около 15°) длиной 26,5 м с тремя боковыми забойными нишами, глубиной от 1,2 до 3,9 м. От входа вниз спускается конус, образованный грунтом, намытым с поверхности. Сразу за входным отверстием ширина штольни увеличивается до 4,7 м, в средней части составляет 4,4 м, в нижней уменьшается до 4,2 м. Высота после конуса практически постоянная и колеблется у отметки 2,0 м. В торцевой части штольни нижний слой монолита не выбран и забой представляет собой полку глубиной 2,0 м и высотой 1,1 м. В 3,2 м от забоя, справа, на высоте 1,1 м от дна, также расположена ниша в виде полки шириной 2,5 м, глубиной 1,5 м и высотой 1,0 м. В 17,9 м от забоя, справа, на высоте 1,05 м от дна, расположена вторая ниша также в виде полки шириной 5,05 м, глубиной 1,2 м и высотой 1,24 м. Между этими нишами, но по левой стенке, располагается третья, уходящая вглубь уступами на 3,9 м. Расстояние от забоя до ее границы – 3,9 м.

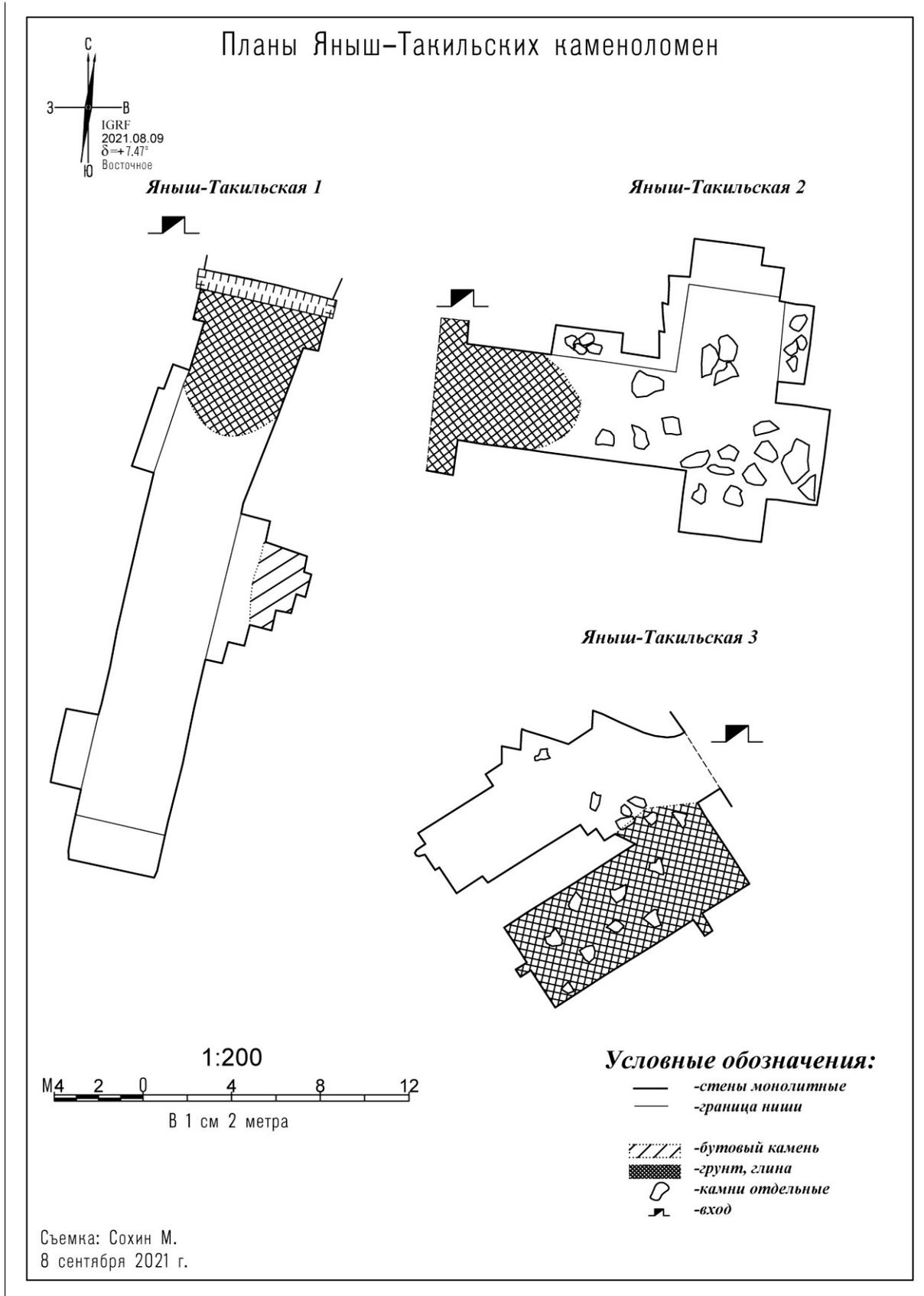


Рис. 2. Планы подземных выработок юго-западного шахтного поля



Рис. 3. Вход в подземную выработку Яныш-Такильская-1

Дно полости покрыто слоем тырсы с редкими включениями бута. Вдоль стен лежат небольшие кучи бута с большим количеством тырсы. Отслоений кровли не наблюдается.

На стене сохранились рабочие таблицы выработки камня, состоящие только из цифр. Отсутствие поясняющих надписей не позволяет датировать время их написания.

Общая протяженность выработки – 33,1 м.

Каменоломня Яныш-Такильская-2

Вход расположен в 15 м к востоку от входа в каменоломню Яныш-Такильская-1, в том же карьере. Портал входа сохранился в первоначальном виде (рис. 4). Выработка пройдена по простиранию пласта и в сечении асимметрична. Высота по северной стенке штольни отличается от высоты по южной стенке на 0,4-0,6 м (рис. 5). От входа вниз уходит конус, состоящий из грунта и глыб.

Представляет собой штольню протяженностью до забоя 16,5 м с небольшими забойными камерами в ее стенках. В конце галереи влево имеется расширение в виде небольшого зала, образованного рядом неглубоких забойных камер в виде полок, расположенных по его периметру. Ширина штольни постоянна и составляет 3,9 м. Максимальная высота выработки находится в зале и составляет 2,1 м. Образующие зал два забоя приподняты над дном выработки на высоту 0,5-1,0 м. В кровле выработки на всем ее протяжении наблюдается вывал пласта известняка толщиной 15-20 см.



Рис. 4. Портал входа в подземную выработку Яныш-Такильская-2



Рис. 5. Асимметричность стенок штольни в подземной выработке Яныш-Такильская-2

Дно зала засыпано необрушенным бутом и тырсой, поверх которых лежат обрушенные коржи. Отслоения кровли очень старые, обрушенные коржи, лежащие на дне, покрыты копотью. Кровля также закопчена. Высота в центре зала над обрушенными глыбами – 1,65 м. Летучих мышей не встречено, но на дне имеются небольшие следы гуано. Общая длина выработки (с учетом забойных камер) составляет 26,9 м.

Каменоломня Яныш-Такильская-3

Находится в 300 м к северо-востоку от каменоломни Яныш-Такильская-2. Вход расположен в небольшом карьере Г-образной формы, размером около 20 м по длинной оси (по простиранию горных пород) и около 8 м по короткой (по падению). Портал сохранился в первоначальном виде (рис. 6). Высота входа 1,0 м, ширина – 3,1 м. На входе, как и в предыдущих выработках, большое скопление перекасти-поля, затрудняющего проход. Выработка пройдена по простиранию пластов и в сечении асимметричная. Высота по северной стенке штольни отличается от высоты по южной стенке на 0,4-0,6 м (рис. 7). Полость состоит из двух небольших выработок в виде камер, соединенных между собой коротким проходом (рис. 8). Видимая толщина кровли до поверхности составляет около 1,5 м, из которых 0,5 м монолитный известняк, выше которого залегает почва.



Рис. 6. Портал входа в подземную выработку Яныш-Такильская-3

Кровля без обрушений, на ее поверхности сохранились вертикальные пропилены и следы от горизонтальных срезов блоков. Вход слабо наклонный из-за намытого грунта с поверхности. На дне небольшое количество бута. Стены и свод выработки без следов копоты. Падение пород направлено к южному углу второго забоя. На юго-западной стене сохранились следы стояния паводковых вод, которые показывают, что угол этого забоя затапливался полностью. Максимальная высота в центре выработки и в первой камере – 1,8 м, во второй – 1,5 м. Ширина первой камеры составляет 3,6 м, второй – 4,4 м.

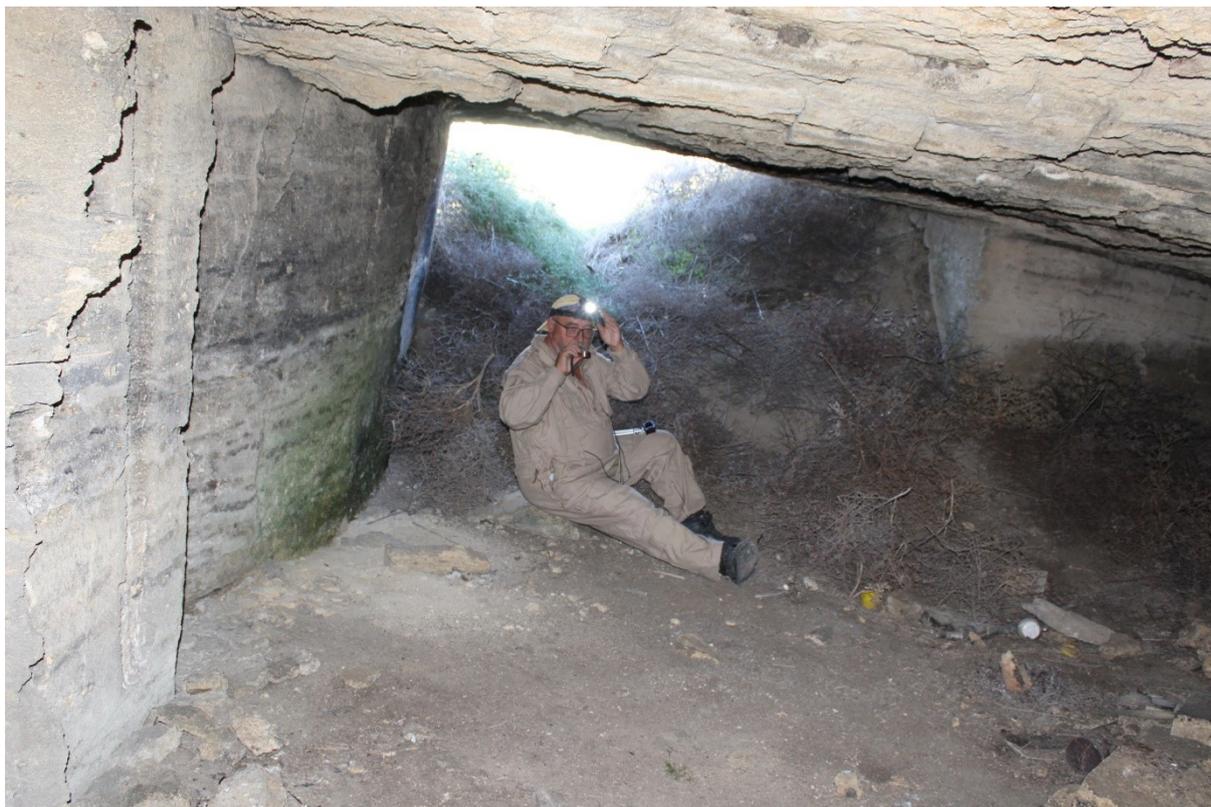


Рис. 7. Асимметричность стенок штольни в подземной выработке Яныш-Такильская-3



Рис. 8. Привходовой участок выработки Яныш-Такильская-3



Рис. 9. Фотография карьера с устьем штольни, 1929 г.

Недалеко от входа расположено кострище с кучей обгоревших бутылок и пластика. На стенах современные граффити. Выработка полностью освещена. Общая длина полости составляет 25,9 м.

Не исключено, что в конце длинного (юго-западного) участка карьера находилась еще одна выработка, вход в которую замыт. В 8-10 м к северо-востоку расположены две слившиеся воронки. Одна из них может представлять собой наклонную канаву-въезд в следующую выработку. Наличие второй провальной воронки косвенно подтверждает наличие подземной полости.

В других карьерах, по сообщению членов клуба «Набат», открытых входов не обнаружено. Так как производился только их беглый осмотр, необходимо провести более детальное обследование с целью поиска засыпанных выработок. Внимательный осмотр небольшого количества карьеров показал, что вероятность обнаружения засыпанных входов достаточно высока.

В 400 м к северо-востоку от последней выработки проходит граница северо-восточного шахтного поля Яныш-Такильских каменоломен. Его осмотр показал, что за 19 лет, прошедших со времени предыдущего обследования автором, здесь произошли значительные изменения. На юго-западном краю поля обнаружен новый провал в виде обрушенного штрека с воронкой на западном торце. Очевидно, провал образовался не позднее 20-х чисел августа 2021 г., т. е. за две недели до обследования. На дне находятся съехавшие вертикально вниз пласты грунта с острыми гребнями, не размытыми ливнями первой половины августа. В целом, схема, составленная в 2002 году, совпадает с современной ситуацией и вполне узнаваема. Некоторые входы оказались засыпанными, некоторые обрушены. Больше всего изменения затронули западную и северо-западную

часть поля. Появились новые и совсем свежие провалы, найдены новые фрагменты полостей. Вероятно, при составлении схемы 2002 года, этот участок оказался недостаточно обследован. Его размер с плотно размещенными провальными формами примерно 50×40 м.

Время начала разработки каменоломен неизвестно. По крайней мере, никаких архивных материалов с упоминанием этих выработок пока не найдено. Судя по внешнему виду карьеров-врезок, работы в них велись с конца XIX в. Каменоломни, вероятно, принадлежали экономии Яныш-Такиль и являлись частными разработками. В статистические сборники Керчь-Еникальского градоначальства такие разработки, как мало значимые, не включались. Определенно можно говорить о том, что в первой трети XX в. каменоломни продолжали разрабатывать, в том числе и подземным способом. В фондах Восточно-Крымского историко-культурного заповедника (ВКИКМЗ, г. Керчь) хранится фотография карьера с устьем штольни, датированная 1929 г. и подписью: «*Такильские каменоломни в урочище Керменчик, возле городища Китей*»¹. Судя по виду местности и указанным географическим ориентирам, на фотографии, вероятно, изображен один из входов в подземную выработку северо-восточного шахтного поля (рис. 9).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сохин М.Ю. Типология и краткий обзор подземных выработок Керченского полуострова // Ученые записки Крымского фед. ун-та им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2020. – Т. 6, № 2 (72). – С. 264-293.
2. Сохин М.Ю. Результаты предварительного обследования северо-восточного шахтного поля Яныш-Такильских каменоломен // Пещеры. – Пермь, 2020. – Вып. 43. – С. 48-53.

УДК 556

DOI:10.7242/echo.2023.1.6

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ОБРАТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ВОТКИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (НИЖНИЙ БЬЕФ КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

А.А. Тиунов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: На основе вычислительного эксперимента дана численная оценка возможности формирования обратных течений в верхнем участке Воткинского водохранилища (в нижнем бьефе Камского водохранилища) вследствие неравномерности работы Камкой ГЭС. Вычислительный эксперимент был поставлен на разработанной гидродинамической модели рассматриваемого водного объекта в 2D постановке с помощью лицензированного программного продукта SMS v.11.1. В результате расчета получены картосхемы распределения векторного поля скоростей. Выполненный вычислительный эксперимент воспроизводит возникновение обратных течений при рассматриваемых гидрологических условиях на верхнем участке Воткинского водохранилища. Данное явление необходимо учитывать с целью минимизации как экологических, так и технологических последствий. Такие оценки необходимы для выработки мероприятий, направленных на минимизацию отрицательных последствий для работы водопользователей.

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование, обратные течения, Воткинское водохранилище, река Кама, Камская ГЭС.

¹ Такильские каменоломни в урочище Керменчик, возле городища Китей. 1929 // ВКИКМЗ КП-196201. Номер в Госкаталоге: 18750706.

Введение

На верхней части Воткинского водохранилища, которая является нижним бьефом Камского водохранилища, расположен один из крупнейших промышленных узлов «Пермско-Краснокамский» с большим количеством водозаборов и водовыпусков. На основе оценки масштабов обратных течений и последствий для водопользователей устанавливаются водохозяйственные и экологические ограничения режима работы Камской ГЭС, в том числе, и размеры санитарных попусков.

Исследован вопрос формирования обратных течений в Воткинском водохранилище, которое является средним в каскаде Камских водохранилищ. Возникновение обратных течений определяется режимом сброса воды через Камскую ГЭС. Актуальность проблемы обратных течений обусловлена риском попадания загрязненных стоков в водозаборы, расположенные выше по течению относительно выпусков сточных вод.

Метод исследования

Для решения задачи по численной оценке возможных гидрологических изменений в случае образования обратных течений на верхнем участке Воткинского водохранилища (в нижнем бьефе Камского водохранилища) вследствие неравномерности работы Камской ГЭС использована двумерная гидродинамическая модель данного участка.

Двумерная (в горизонтальной плоскости) модель для участка водохранилища сделана с использованием специализированного гидрологического пакета SMS v.11.1 американской компании AQUAVEO LLC, разработанного по заказу и участию Центра гидравлических исследований США. В ее основе лежит несколько расчетных моделей: RMA2, RMA4, SRH, ADH, PTM, TUFLOW и другие, которые позволяют решать различные гидродинамические задачи.

Данный программный пакет SMS v.11.1 нами неоднократно 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 [1], Амур [3], в водохранилищах Камское [4-7], Клязьминское [8, 9], Учинское, Воткинское, Магнитогорское [10]); распространение теплового поля (Исетское водохранилище); изменение гидродинамики потока (слияние рек Чусовая и Сытва [11-12]); по защите берегов (р. Дон в районе г. Павловска [13]); транспорт наносов (р. Кама – г. Пермь [14]). Достаточно детальное описание рассматриваемого программного продукта и опыт его использования также приводится в работах [15, 16].

Описание модели RMA2 в программном комплексе SMS v11.1

Модель RMA2 это двухмерная, усредненная по глубине, конечно элементная гидродинамическая численная модель. Она позволяет вычислять возвышения водной поверхности и горизонтальные компоненты скорости течения со свободной поверхностью в двумерных областях.

Модуль RMA2 решает методом конечных элементов уравнения в форме Рэйнолдса для турбулентных течений, полученных из уравнений Навье-Стокса. Трение вычисляется по формуле Маннинга, а коэффициенты турбулентной вязкости используются, чтобы определить особенности турбулентности. Одинаково могут быть проанализированы как стационарные, так и нестационарные задачи [17].

Применение модели RMA2

Программа применяется для вычисления уровней воды и распределения потока вокруг островов, потока в мостах, имеющих одно или более выпускных отверстий, в

сужающихся и местах, в подводящем и отводящем каналах ГЭС, в местах слияния рек и в подводящем и отводящем каналах насосных станций, циркуляции и транспортировки в водоемах с заболоченными местами и произвольного уровня воды и режима течения в реках, бассейнах и устьях.

Характеристика модели RMA2

RMA2 – модель общего назначения, разработанная для большой области задач, в которых вертикальное ускорение незначительно и векторы скорости, как правило, указываются в том же самом направлении по всей глубине в толще воды в любой момент времени. Это предполагает вертикально гомогенную жидкость со свободной поверхностью.

Ограничения модели RMA2

Модель RMA2 работает согласно предположению гидростатики; означающему, что ускорение в вертикальном направлении незначительно. Она является двумерной в горизонтальной плоскости. Она не предназначена для использования в задачах смежных областей, где вихри, колебания, или вертикальное ускорение представляют первичный интерес. Вертикально стратифицированные эффекты потока находятся за пределами способностей модели RMA2.

RMA2 – это расчетная модель со свободной поверхностью для задач ламинарного движения. Более сложные потоки, где важны вертикальные изменения переменных, могут быть оценены с использованием трехмерной модели.

Определяющие уравнения модели RMA2

Универсальная компьютерная программа модели RMA2 решает уравнения движения и сохранения количества движения в двух направлениях горизонтальной плоскости, проинтегрированные по глубине. Решаемые уравнения имеют вид:

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{g u n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \psi - 2 h v \omega \sin \Phi = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + gh \left[\frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{g v n^2}{h^{1/3}} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2 h u \omega \sin \Phi = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

где h – глубина потока,

x, y, t – координаты и время,

u, v – скорости по координатам x и y соответственно,

ρ – плотность воды,

E – коэффициент вязкости при турбулентном течении,

g – ускорение свободного падения,

a – возвышение основания (дна),

n – шероховатость по Маннингу,

ζ – эмпирический коэффициент горизонтального отклонения ветра,

V_a – скорость ветра,

ψ – направление ветра,

ω – коэффициент угла вращения Земли,

Φ – широта.

Уравнения 1-3 решаются методом конечных элементов с использованием метода Галеркина взвешенных невязок. Элементы на участках русла могут быть линейные (одномерные) или квадратные (двухмерные) четырехугольные, либо треугольные, и могут иметь изогнутые (параболические) стороны. Форма базисных функций квадратичная для скорости и линейная для глубины. Пространственное интегрирование выполнено интегрированием по Гауссу. Вторые по времени производные заменены нелинейной аппроксимацией конечной разности. Предполагается что переменные, дифференцируемые по времени, заменены в форме конечной разности и изменяются по каждому временному интервалу по формуле

$$f(t) = f(t_0) + at + bt^c \quad t_0 \leq t < t_0 + \Delta t \quad (4)$$

где a, b и c – константы.

Заметим, основываясь на экспериментах, что лучшее значение для константы c равно 1,5 (Нортон и Кинг, 1977).

Решение полностью неявно и система уравнений решается нелинейной итерационной схемой Ньютона-Рафсона. Компьютерная программа осуществляет решение посредством стандартной подпрограммы решения, которая собирает часть матрицы и решает ее прежде, чем собрать следующую часть матрицы.

Вычислительный эксперимент по моделированию обратных течений в нижнем бьефе Камской ГЭС

Моделирование осуществляется на участке от Камской ГЭС до пос. Уральский (вниз по р. Кама (Воткинское водохранилище): от 2187 км до 2271 км судового хода по «Атласу единой глубоководной системы европейской части России, Том 9, Часть 1, «Камское и Воткинское водохранилища от поселка Керчевский до города Чайковский») протяженностью 84 км (рис. 1).

Ранее в работе [18] были выполнены вычислительные эксперименты по моделированию обратных течений в одномерной модели для всего Воткинского водохранилища, также в ней приводятся данные экспериментальных измерения обратных течений в районе г. Краснокамска и мкр. Закамск.

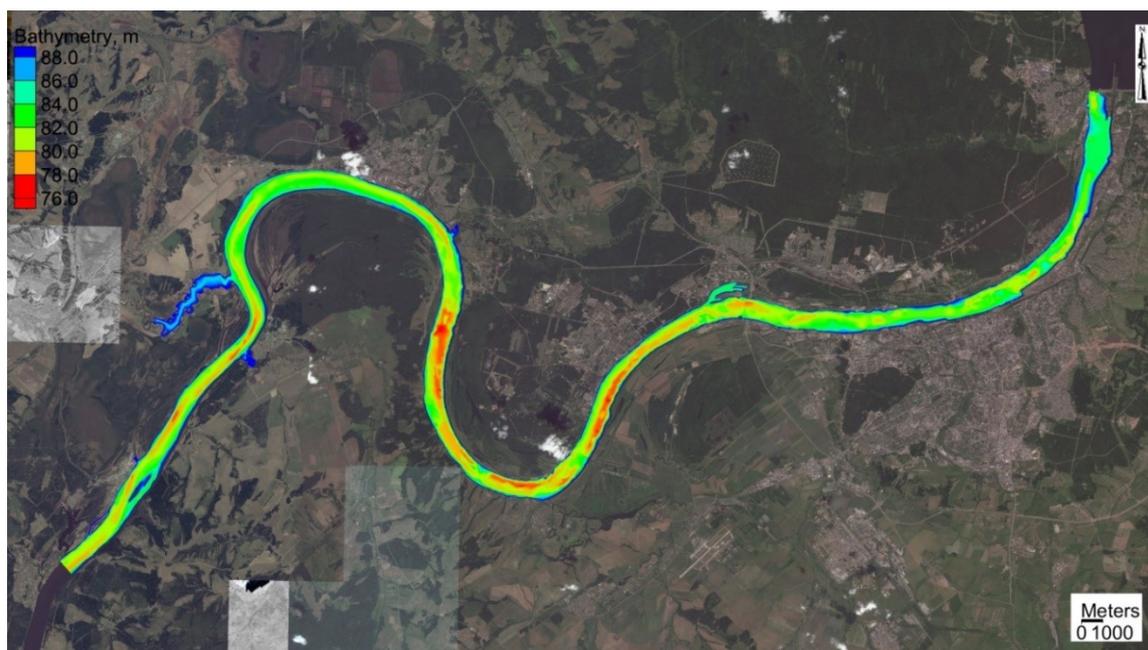


Рис. 1. Морфометрия моделируемого участка

Для корректного задания морфометрии рассматриваемого водного объекта была использована цифровая модель рельефа (ЦМР), сделанная по материалам детальной эхолотной съемки, лидарной съемки и обработки карт, данные материалы предоставлены заказчиком. Обработка первичных материалов осуществлялась в программном комплексе ArcGIS v.10.4. Производилась доработка полученных векторных данных (берегов, изолиний и точек глубин водного объекта) в виде ЦМР и шейп-файлов.

В программном комплексе SMS v.11.1 в специальном модуле «Мар» произведена конвертация полученных ранее шейп-файлов во внутренний формат программы для дальнейшего использования при создании модели.

Далее для наиболее полного и эффективного задания особенностей морфометрии моделируемого объекта на расчетной области построена прямоугольно-треугольная сетка, состоящая из 50899 элементов, со средней длиной ребра элемента 50 метров. Основные характерные размеры моделируемого объекта: в длину 84 км, по ширине изменяется от 650 до 1350 м.

В модуле RMA2 проводится расчет гидродинамических характеристик, в первую очередь распределение глубин (уровней водной поверхности) и скоростей потока.

Результаты вычислительного эксперимента

Расход сбрасываемой воды с Камской ГЭС изменяется по графику, представленному на рисунке 2. Это стандартные усредненные суточные изменения работы Камской ГЭС, при которых расход сброса в течение суток изменяется от минимального, санитарного попуска 300 м³/с в ночное время суток, до осредненного значения в дневное время суток – 1700 м³/с.

Уровень воды в Воткинском водохранилище (р. Кама) в районе пос. Уральский принимался равным 89,11 м БС.

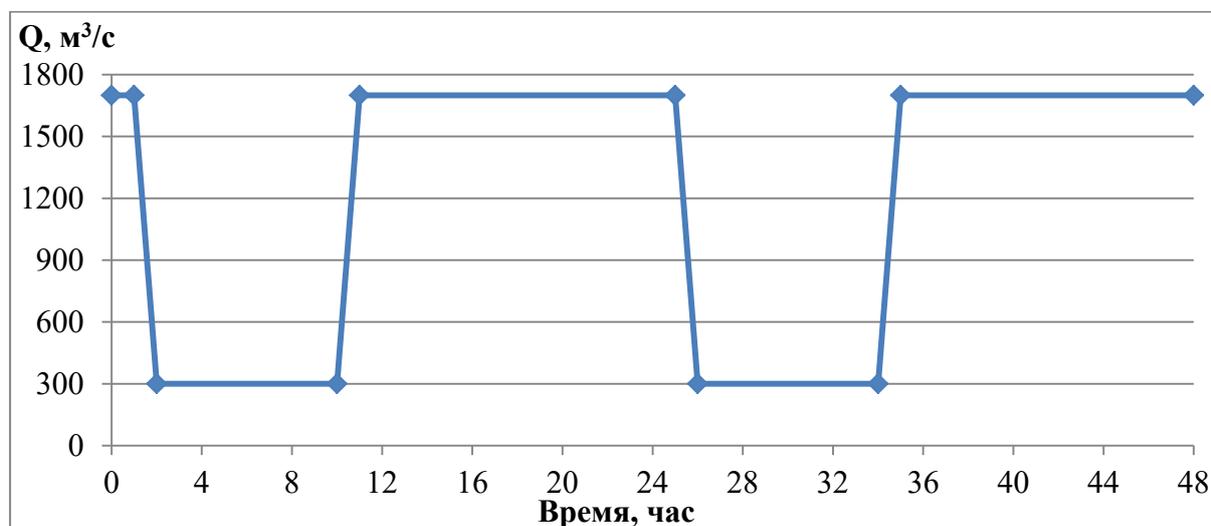


Рис. 2. График изменения расхода сброса воды с Камской ГЭС по времени

На рисунках 3 и 4 представлены рассчитанные распределения векторного поля скорости течения во временные промежутки 1 ч и 6 ч 30 мин, соответственно, в районе г. Краснокамска.

На рисунках 5 и 6 представлены рассчитанные распределения векторного поля скорости течения во временные промежутки 1 ч и 7 ч, соответственно, в районе р. Мулянка и Закамска.

На рисунках 7 и 8 представлены рассчитанные распределения векторного поля скорости течения во временные промежутки 1 ч и 7 ч 15 мин, соответственно, в районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми.

В районе г. Краснокамска максимальная скорость обратного течения отмечается у левого берега р. Кама $V_{max} = 0,143$ м/с, при расчетном времени 6 ч 30 мин, средняя скорость обратного течения $V_{cp} = 0,075$ м/с и время обратного течения составляет примерно 5 ч (с 4 ч 45 мин до 9 ч 45 мин расчетного времени), то есть вода за данный промежуток времени может преодолеть расстояние в обратном направлении примерно в 1350 м.

В районе р. Мулянка и Закамска максимальная скорость обратного течения отмечается у правого берега на повороте р. Кама – $V_{max} = 0,113$ м/с, при расчетном времени 7 ч, средняя скорость обратного течения $V_{cp} = 0,056$ м/с, и время обратного течения составляет примерно 3 ч 30 мин (с 5 ч 30 мин до 9 ч расчетного времени), то есть вода за данный промежуток времени может преодолеть расстояние в обратном направлении примерно в 700 м.

В районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми максимальная скорость обратного течения отмечается у берегов р. Кама – $V_{max} = 0,071$ м/с, при расчетном времени 7 ч 15 мин, средняя скорость обратного течения $V_{cp} = 0,035$ м/с и время обратного течения составляет примерно 2 ч (с 6 ч 15 мин до 8 ч 15 мин расчетного времени), то есть вода за данный промежуток времени может преодолеть расстояние в обратном направлении примерно в 250 м.

При данных расчетных характеристиках в районе г. Краснокамска, р. Мулянка, Закамска и в районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми обратное течение происходит по всей ширине р. Кама.

Отметим, что на участке уже выше автомобильного моста г. Перми наблюдается незначительное обратное течение и только вдоль берегов, а далее оно резко угасает, так как на данном участке р. Кама начинают преобладать речные условия течения и сброс воды на Камской ГЭС идет постоянный, хотя и минимальный.

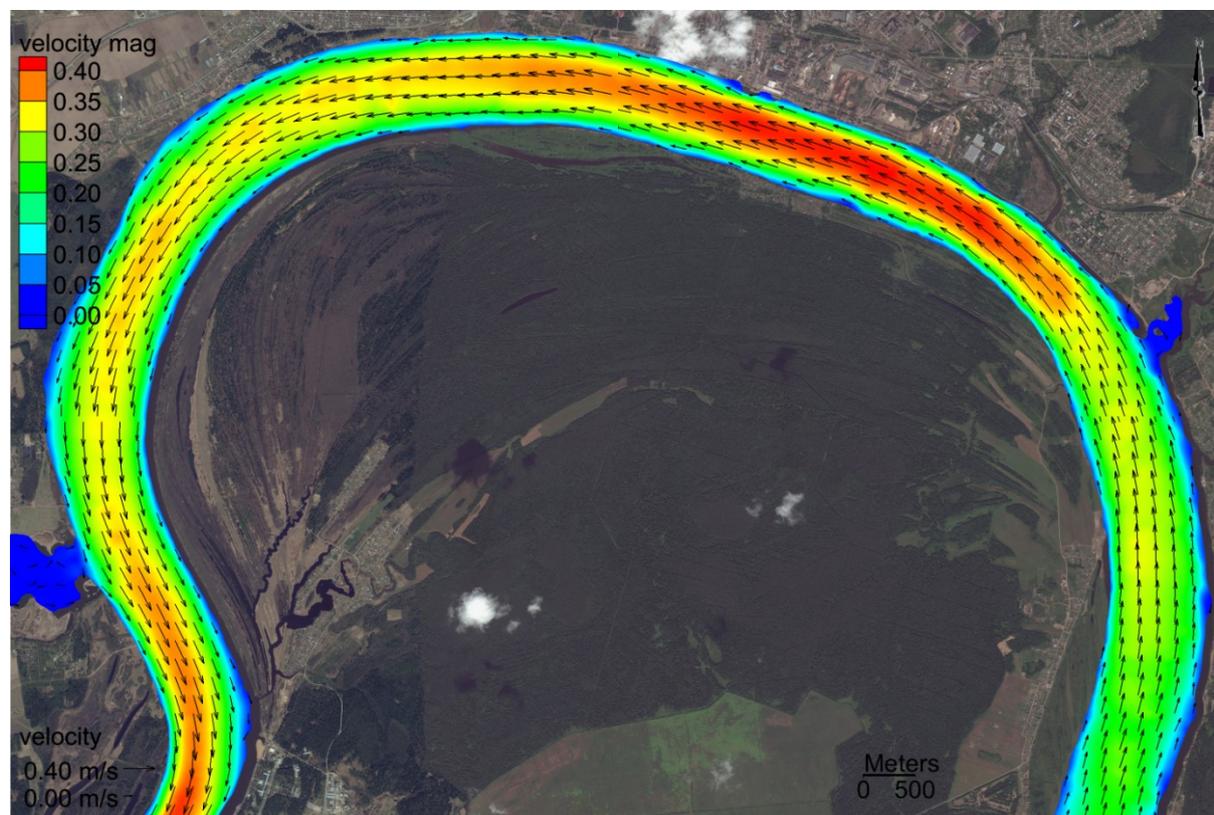


Рис. 3. Распределение векторного поля скорости в районе г. Краснокамска, расчетное время 1 ч

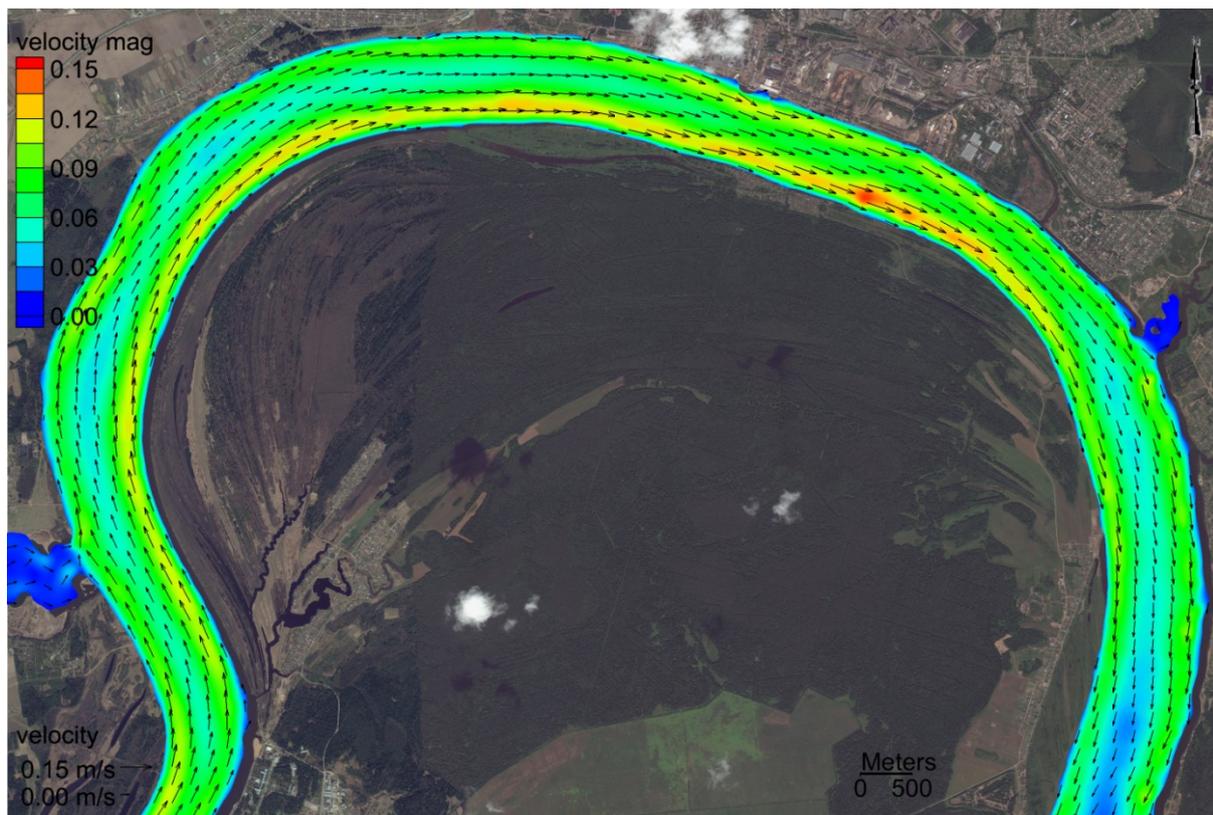


Рис. 4. Распределение векторного поля скорости в районе г. Краснокамска, расчетное время 6 ч 30 мин

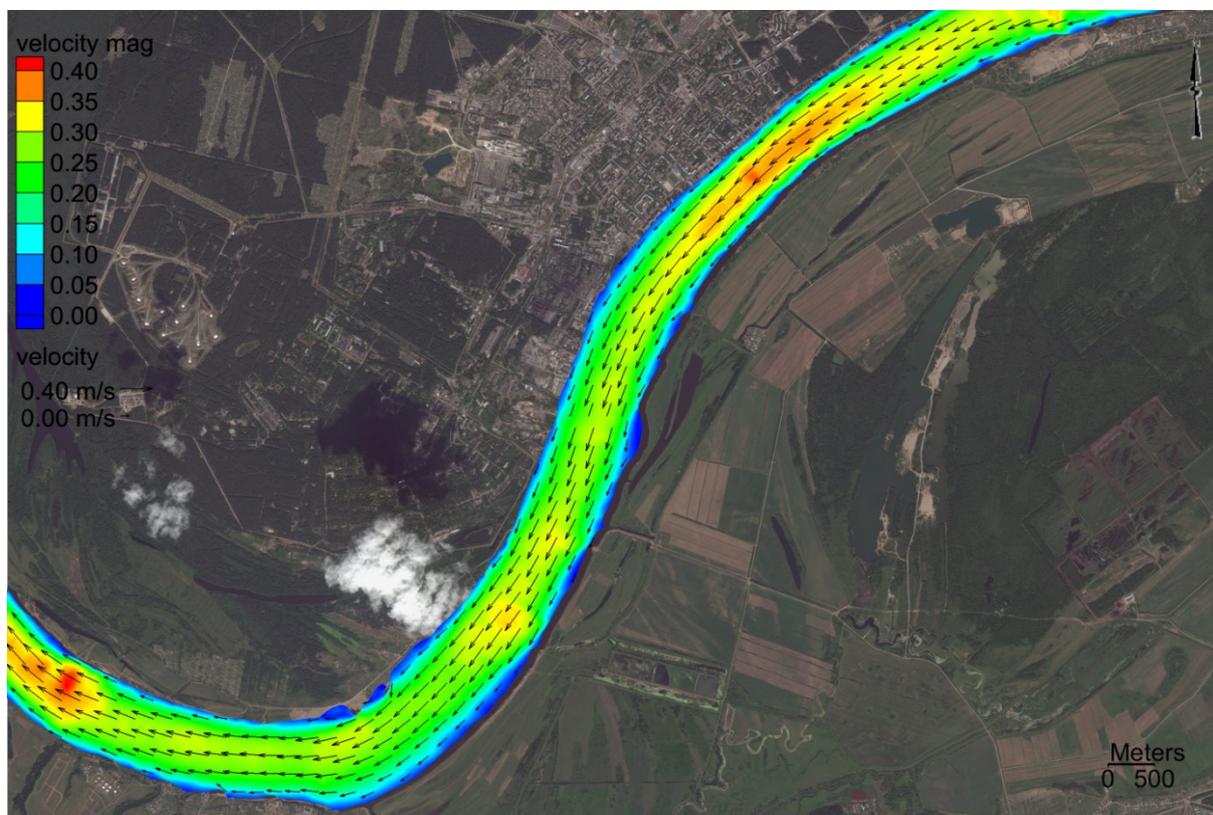


Рис. 5. Распределение векторного поля скорости в районе р. Мулянка и Закамска, расчетное время 1 ч

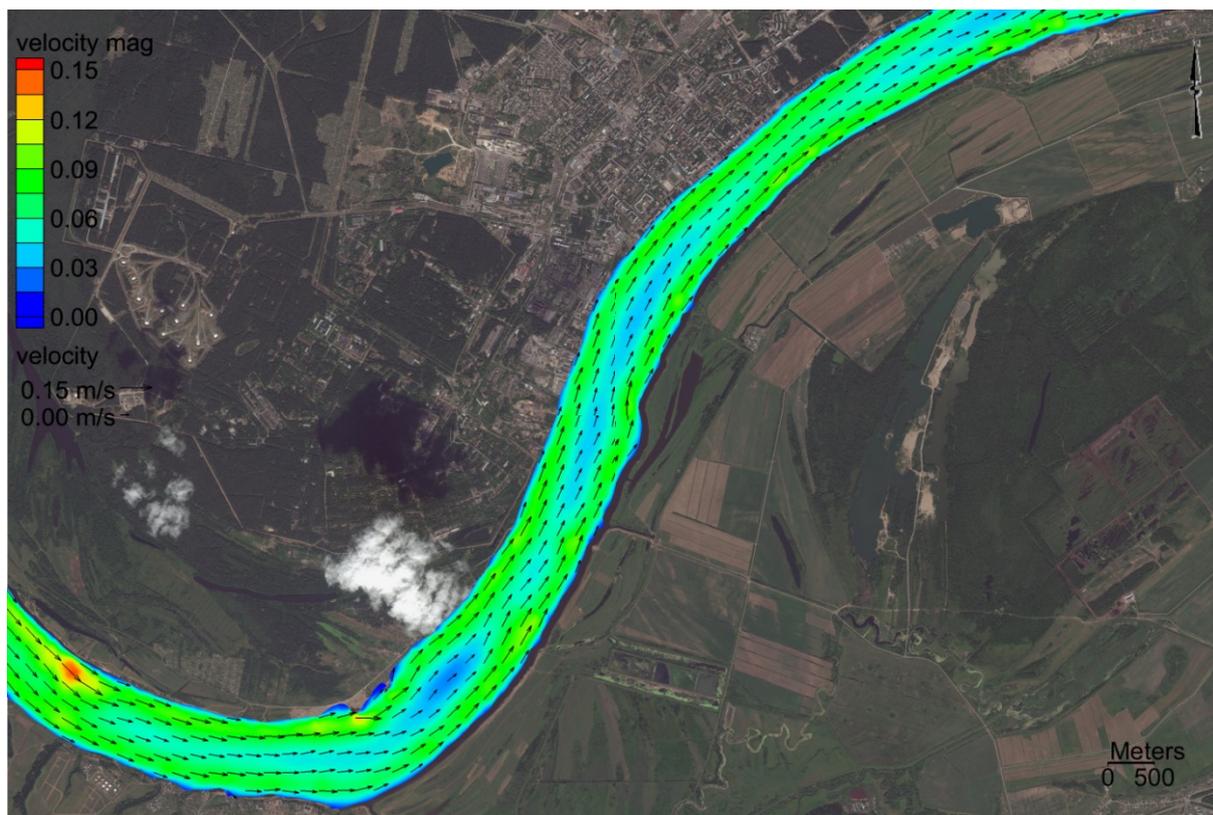


Рис. 6. Распределение векторного поля скорости в районе р. Мулянка и Закамска, расчетное время 7 ч

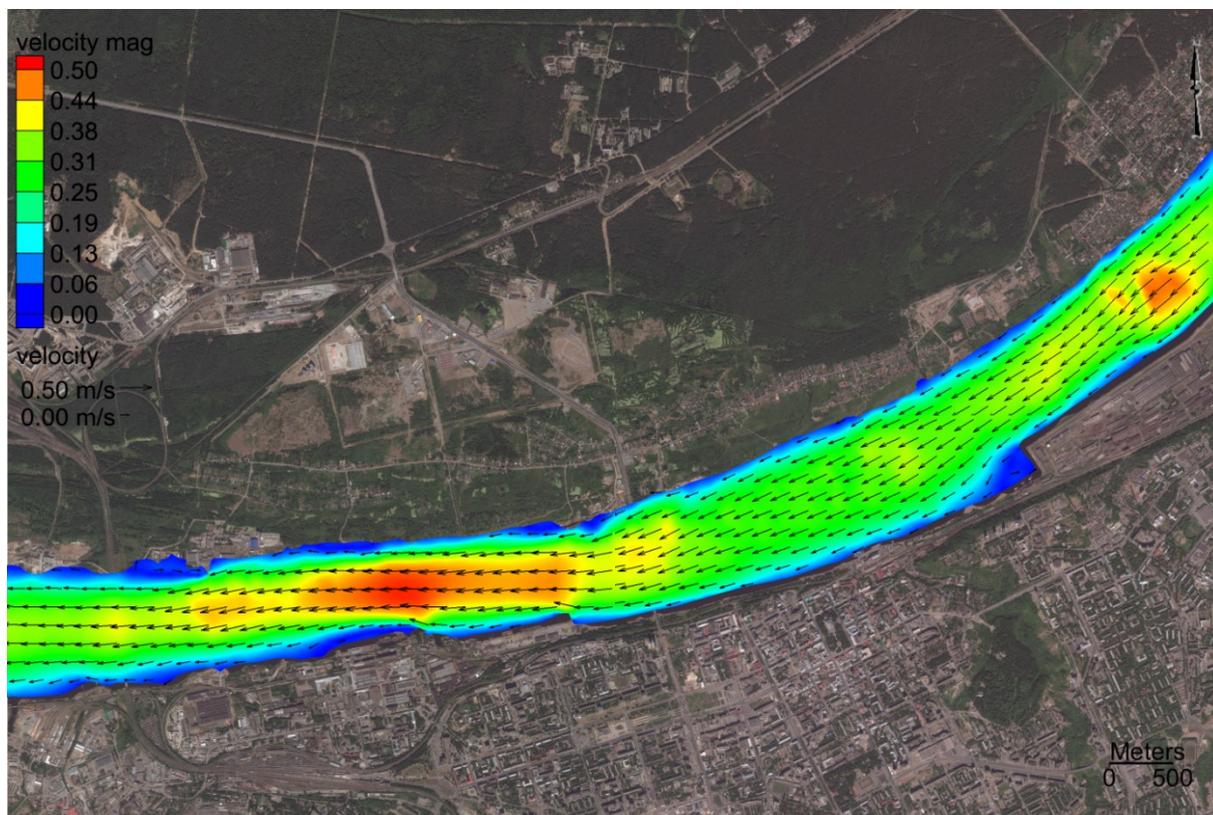


Рис. 7. Распределение векторного поля скорости в районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми, расчетное время 1 ч

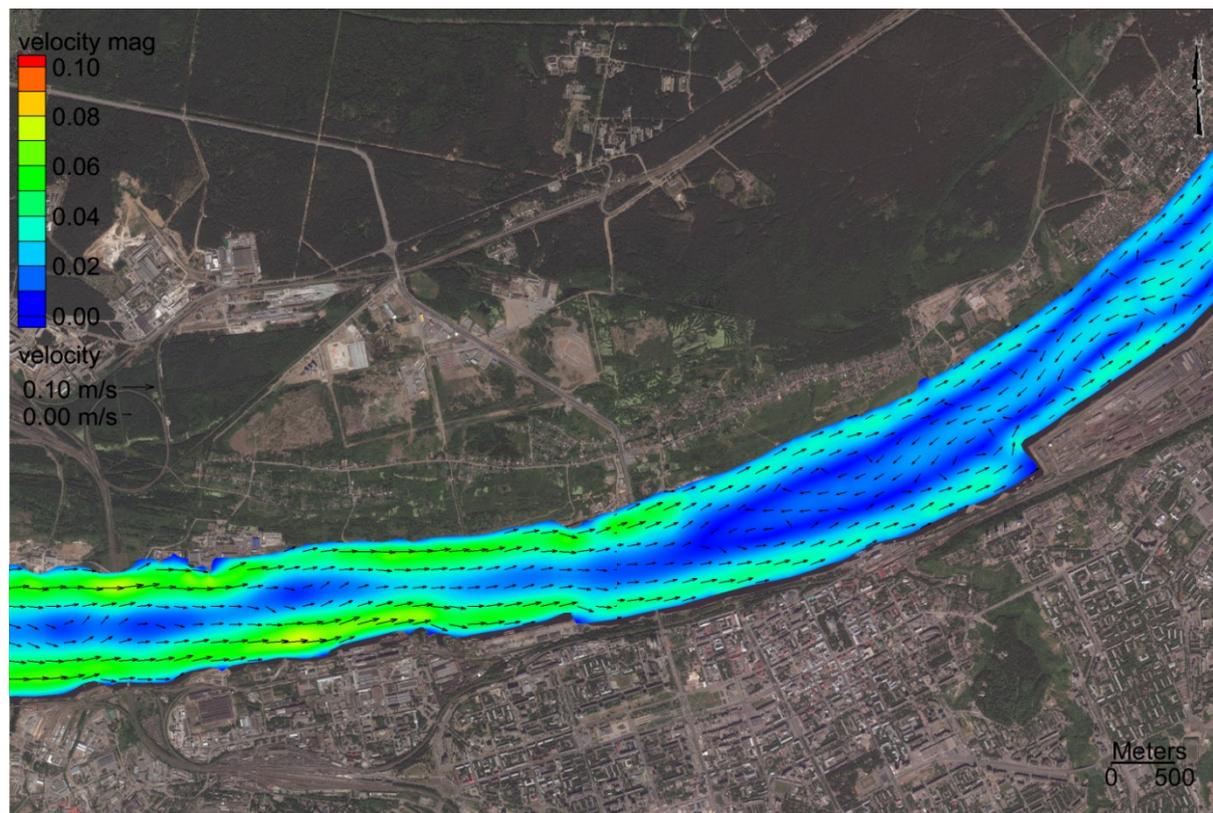


Рис. 8. Распределение векторного поля скорости в районе железнодорожного и автомобильного мостов г. Перми, расчетное время 7 ч 15 мин

Заключение

Таким образом, выполненный вычислительный эксперимент воспроизводит возникновение обратных течений при стандартных условиях работы Камской ГЭС в верхнем участке Воткинского водохранилища. Данные явления необходимо учитывать с целью минимизации как экологических, так и технологических последствий при работе водозаборов, расположенных в районах г. Краснокамска и г. Перми, особенно если непосредственно ниже располагаются значительные выпуски сточных вод.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 3. – С. 16-32.
2. Лепихин А.П., Перепелица Д.И., Тиунов А.А. Анализ и обоснование возможных схем защиты г. Кунгура от наводнений // Водное хозяйство России. Проблемы, технологии, управление. – 2007. – № 2. – С. 80-94.
3. Лепихин А.П., Тиунов А.А. Разработка гидродинамической модели для прогнозирования развития и распространения зон загрязнения в бассейне р. Амур / Лепихин А.П., Тиунов А.А. // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях: сб. докл. Междунар. конф. – М., 2008. – С. 138-142.
4. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. К проблеме отведения избыточных рассолов в водные объекты предприятиями калийной промышленности // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. – 2010. – № 3. – С. 57-74.
5. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. Численное моделирование разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в турбулентных потоках // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – № 4. – С. 68-79.

6. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. Комбинированный подход к описанию плотностных эффектов разбавления и переноса высокоминерализованных рассолов в водных объектах // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2011. – Вып. 5 (9). – С. 130-134.
7. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. К проблеме утилизации избыточных рассолов предприятиями калийной промышленности в водные объекты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 185-193.
8. Тиунов А.А. Разработка гидродинамической модели и модели распространения загрязнений Клязьминского водохранилища // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 27-29.
9. Веницианов Е.В., Лепихин А.П., Кирпичникова Н.В. Разработка гидродинамической модели и модели формирования загрязнений равнинного водохранилища (на примере Клязьминского водохранилища) // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 2. – С. 96-107.
10. Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Дробный О.Ф., Вахромеев И.Е. Отработка возможных схем снижения воздействия ОАО «ММК» на магнитогорское водохранилище на основе вычислительных экспериментов // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 5. – С. 85-96
11. Lyubimova T., Lepikhin A., Konovalov V., Parshakova Ya., Tiunov A. Formation of the density currents in the zone of confluence of two rivers // Journal of Hydrology. – 2014. – V. 508. – P. 328-342. – DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.041.
12. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Y., Tiunov A., Konovalov V., Shumilova N. Numerical modelling of admixture transport in a turbulent flow at river confluence // Journal of Physics: Conference Series. – 2013. – V. 416, № 1. – doi:10.1088/1742-6596/416/1/012028.
13. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А. Использование численных гидродинамических моделей для оценки эффективности проектных решений по защите берегов (на примере реки Дон в районе города Павловска) // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 1. – С. 50-57.
14. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Лепешкин С.А., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Перепелица Д.И. К проблеме оценки последствий крупномасштабной добычи нерудных строительных материалов на поверхностные водные объекты // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2014. – № 3. – С. 108-119.
15. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Parshakova Ya.N., Tiunov A.A. Discharge of excess brine into water bodies at potash industry works // Journal of Mining Science. – 2012. – V. 48, № 2. – P. 390-397.
16. Lyubimova T., Lepikhin A., Parshakova Ya., Tiunov A. Effect of flooding waves on a removal of pollutants from underwaterquarries // Geophysical Research Abstracts: 10th EGU General Assembly. – Viena. – 2013. – V. 15. – P.13577.
17. Users Guide for RMA2 Version 4.5. [09 Sept] 2009. – Текст электронный – URL: [http://chl.wes.army.mil/software/tabs/docs.htm]. (дата обращения: 30.03.2023).
18. Лепихин А.П., Тиунов А.А., Возняк А.А. Особенности формирования и расчета обратных течений в Воткинском водохранилище (1D-постановка) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 5. – С. 21-36. – DOI: 10.35567/1999-4508-2018-5-2.

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 625.235.5

DOI:10.7242/echo.2023.1.7

ЗАВИСИМОСТЬ ИМПУЛЬСА ВЗРЫВА ШПУРОВОГО ЗАРЯДА ОТ ВЕЛИЧИНЫ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА ДЛЯ ПАТРОНОВ ВВ СТАНДАРТНОГО ДИАМЕТРА

В.М. Мальцев, В.В. Аникин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрено влияние величины радиального зазора на импульс взрыва удлиненного шпурового заряда при стандартных диаметрах патронов ВВ и различных диаметрах шпуров.

Ключевые слова: удлиненный заряд, диаметр патрона, импульс взрывных газов, длительность импульса, радиальный зазор, динамическая прочность, степень дробления, радиус трещинообразования.

При проходке выработок БВР-способом, например, в выбросоопасных породах или при проходке участков замороженных пород в процессе строительства шахтного ствола, необходимо знать радиус трещинообразования от взрыва шпуров. Для расчета параметров БВР необходимо оценить величину радиуса трещин вокруг одиночного заряда.

Стандартный диаметр патронов ВВ для шпуровых зарядов, как правило, составляет: 23-24 мм; 31-32 мм; 36-37 мм; 44-45 мм (при проведении вертикальных стволов) [1].

При бурении шпуров диаметр выбирается обычно с учетом диаметра имеющихся патронов ВВ ($d_{\text{патр.}}$) и необходимого зазора между стенкой шпура и патронами ВВ, позволяющего посылать патроны в шпур без усилий.

Начальный диаметр резцов и коронок для патронов ВВ диаметром 36-37 обычно составляет 41-43 мм, для патронов диаметром 44-45 мм – 51-53 мм. Чаще всего фактический диаметр шпура на 5-8 мм больше диаметров применяемых патронов ВВ. При изношенных коронках диаметр шпура на 2-3 мм больше диаметра патрона [1]. Таким образом, между стенками шпура и поверхностью патрона ВВ всегда имеется зазор.

Использование в качестве основного фактора разрушения горной породы импульса взрывных газов, образующихся при взрыве шпурового заряда, предполагает учет радиального зазора между патроном ВВ и стенками шпура (зарядной камеры).

Известно, что с увеличением расстояния от центра заряда давление взрывных газов уменьшается в степенной зависимости. Величины импульса давления в зависимости от расстояния до центра взрыва с учетом имеющегося радиального зазора находится по выражению [2]:

$$J(r) = K_z \cdot P_n \cdot t(r) \cdot L_z^{0.5} / r^n \quad (1)$$

где $J(r)$ – импульс взрыва в массиве на расстоянии r , Па·с; K_z – коэффициент радиального зазора; P_n – расчетное начальное давление в зарядной камере, Па; r – относительное (безразмерное) расстояние от центра заряда, выраженное в радиусах зарядной камеры; n – показатель степени затухания давления (и импульса) взрыва с расстоянием, зависит от типа породы и используемого ВВ; $t(r)$ – длительность действия импульса взрыва на расстоянии r от центра заряда, с; L_z – длина заряда, м.

Коэффициент зазора K_z в формуле (1) вводится для определения величины импульса давления взрывных газов за счет многократных отражений фронта детонационной волны от стенок шпура и от столкновения волн в центре заряда при их обратном встречном движении от стенок шпура в процессе стабилизации давления в зарядной камере.

Величина коэффициента зазора определяется с учетом следующих формул:

$$\Delta = (r_s - r_0)/r_0 \quad (2)$$

$$K_{z1} = 0,95/\Delta \quad (3)$$

$$K_{z2} = 9,6 \cdot \Delta \quad (4)$$

где Δ – относительный безразмерный радиальный зазор; r_0 – радиус патрона, м; r_s – радиус зарядной камеры (шпура), м; K_{z1} – коэффициент, характеризующий общее уменьшение импульса давления взрыва патрона ВВ при значении радиального зазора Δ , равного или больше оптимальной величины зазора $\Delta_0 = 0,3125$. Например, при патроне диаметром 32 мм в шпуре диаметром 44 мм $\Delta = 0,375$ и $K_{z1} = 2,5$; K_{z2} – то же при диаметре шпура менее 42 мм.

Экспериментально установлено [3], что увеличение зазора при неизменном диаметре заряда ВВ d_0 приводит к росту импульса давления взрывных газов, при этом максимальное значение импульса достигается при относительном радиальном зазоре $\Delta_0 = 0,3125$. При этом на расстоянии $100 r_0$ этот максимальный импульс в 3 раза больше минимального импульса патрона ВВ без зазора при полном зарядании шпура (при равенстве диаметров шпура и патрона), при этом $K_{z1} = K_{z2} = 1$.

Начальное давление взрыва P_n зависит от свойств применяемого ВВ (плотности заряда, скорости детонации), физико-механических свойств породы (плотности, скорости звука) и рассчитывается по следующим формулам [2, 3]:

$$P_n = K \cdot \rho_v \cdot D^2 / (1 + \gamma) \quad (5)$$

$$K = 2 \cdot \rho \cdot C / (\rho \cdot C + \rho_v \cdot D) \quad (6)$$

$$\gamma = 2,1 \cdot (0,001 \cdot \rho_v)^{0,73} \quad (7)$$

где K – коэффициент отражения; ρ – плотность породы, кг/м³; C – скорость распространения продольной волны в породе, м/с; γ – коэффициент Грюнайзена используемого ВВ [2, 3]; ρ_v – плотность ВВ, кг/м³.

Длительность импульса определяется по следующим формулам [3]:

$$t(r) = r_s [\tau + 0,21 \cdot (r - 1)] \cdot 10^{-3}, \quad (8)$$

$$\tau = 0,21 + 1000 \cdot t(0)/r_s, \quad (9)$$

$$t(0) = L_z / 0,612 \cdot D, \quad (10)$$

где τ – приведенная начальная длительность импульса, мс/м; $t(0)$ – начальная длительность импульса, с; D – скорость детонации ВВ, м/с;

Показатель степени затухания n для исследуемой породы определяется расчетом на основании подобия кривых горных пород и известной кривой эталонной породы – гранита по уравнению [2, 3]:

$$\sigma_{nu}/r^n = \sigma_{ng} \cdot \rho_u \cdot C_u / \rho_g \cdot C_g \cdot r^{1,69} \quad (11)$$

где σ_{nu} – начальное напряжение в исследуемой породе, Па; σ_{ng} – начальное напряжение в граните, Па; r – безразмерное расстояние от центра взрыва, выраженное в радиусах шпура; ρ_u , C_u , ρ_g , C_g – плотность и скорость распространения продольных колебаний, соответственно, в исследуемой породе и граните, кг/м³, м/с; n – степень затухания напряжения с расстоянием в исследуемой породе.

Показатель степени затухания n определяется методом последовательных приближений до установления равенства обеих частей уравнения (11).

Использование в качестве основного разрушающего фактора взрываемых горных пород импульса взрывных газов предполагает применение в качестве критерия разрушаемости теоретического расчетного показателя динамической прочности породы, который представляет собой математическое моделирование динамической сопротивляемости массива горных пород воздействию взрыва с учетом их физико-механических свойств (ρ , C , σ), характеристик ВВ (ρ , v , D) и длительности минимального разрушающего импульса давления взрыва $t(0)$ [4]:

$$I_i = f_v \cdot \rho \cdot C \cdot \sigma \cdot t(0) / \rho_v \cdot D \cdot i_0^2 \quad (12)$$

где I_i – теоретический расчетный показатель динамической прочности породы, Па·с; f_v – эмпирический коэффициент, зависящий от типа ВВ, для аммонита 6ЖВ $f_v = 1,8$; σ – прочность породы при одноосном сжатии, Па; i_0 – степень дробления образцов, соответствующая его устойчивому разрушению.

Определение радиуса зоны трещинообразования камуфлетного взрыва производится при устойчивой степени дробления $i_0 = 1,3$, при которой образец теоретически разделяется на два равновеликих куска и мелкие куски, составляющие примерно 20% от объема одного куска [4].

Величина радиуса зоны трещинообразования R м, находится при помощи относительного безразмерного расстояния Rt по формуле [4]:

$$J(Rt)/I_i = 1, \quad (13)$$

где $J(Rt)$ – импульс давления взрывных газов на относительном расстоянии Rt , при котором он становится равным динамической прочности породы. На расстоянии, большем Rt , первоначальная волна сжатия, двигаясь по породе, затухает и перестает разрушать массив.

Искомая величина Rt входит в аргумент, поэтому для численного решения уравнения (13) предлагается использовать метод последовательных приближений до получения результатов с заданной точностью, при этом радиус зоны трещинообразования находится по формуле [4]:

$$R = r_0 \cdot Rt, \text{ м.} \quad (14)$$

Изменение радиуса трещинообразования рассмотрено для патронов ВВ диаметром 32 мм, 36 мм и 45 мм, расчеты производились по формулам 1-14.

На графиках (рис. 1, 2, 3) показаны зависимости радиуса зоны трещинообразования для указанных стандартных диаметров патронов ВВ типа аммонит 6ЖВ от диаметра шпура.

Выводы

1) радиус трещинообразования растет при увеличении диаметра шпура для каждого стандартного диаметра патрона ВВ до величины, при которой образуется оптимальный радиальный зазор $\Delta_0 = 0,3125$, а затем уменьшается (см. рис. 1, 2, 3);

2) с увеличением диаметра патронов растет радиус трещинообразования;

3) для заряда ВВ типа аммонит 6ЖВ длиной 1,6 м в шпуре длиной 2,1 м радиус трещинообразования для камуфлетного взрыва в сильвините в подземных условиях лежит в диапазоне:

- для патрона диаметром 32 мм от 0,45 м до 1,06 м (см. рис. 1),
- для патрона диаметром 36 мм от 0,54 м до 1,23 м (см. рис. 2),
- для патрона диаметром 45 мм от 0,69 м до 1,64 м (см. рис. 3);

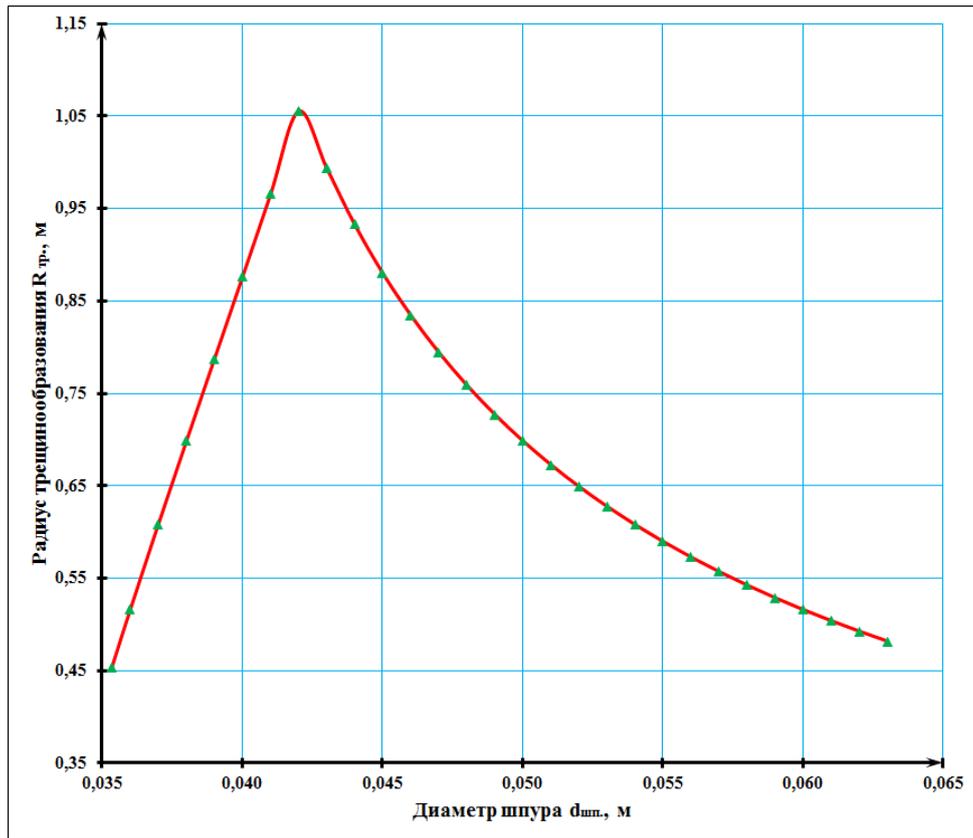


Рис. 1. Зависимость радиуса трещинообразования от диаметра шпура для патрона ВВ типа аммонит 6ЖВ диаметром 32 мм

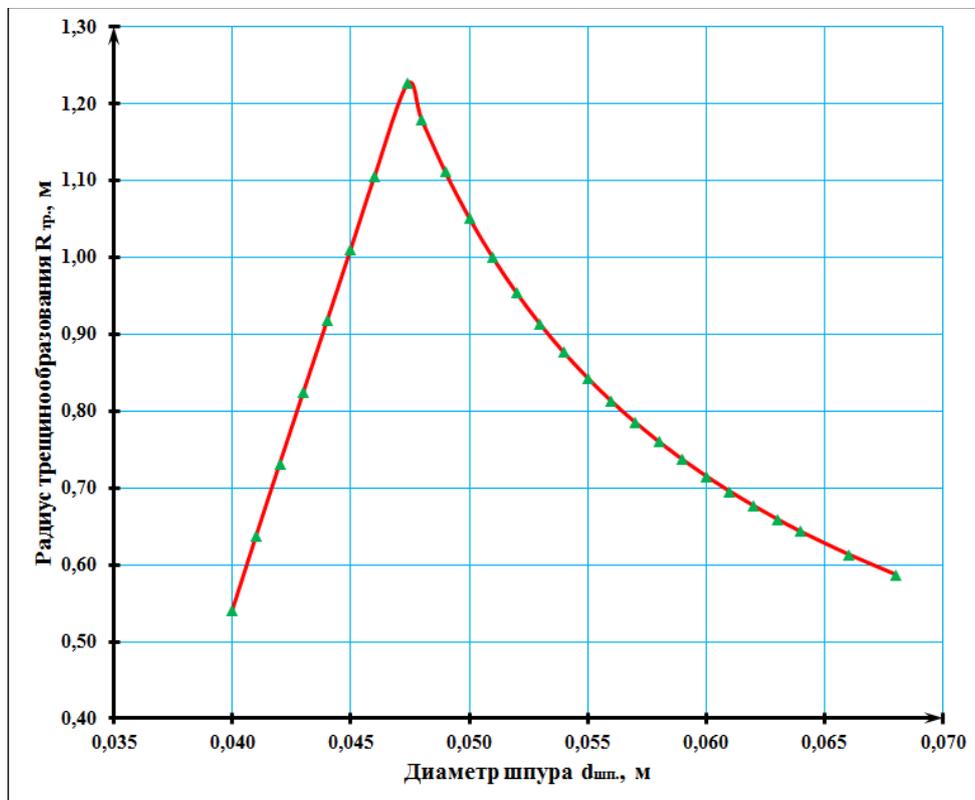


Рис. 2. Зависимость радиуса трещинообразования от диаметра шпура для патрона ВВ типа аммонит 6ЖВ диаметром 36 мм

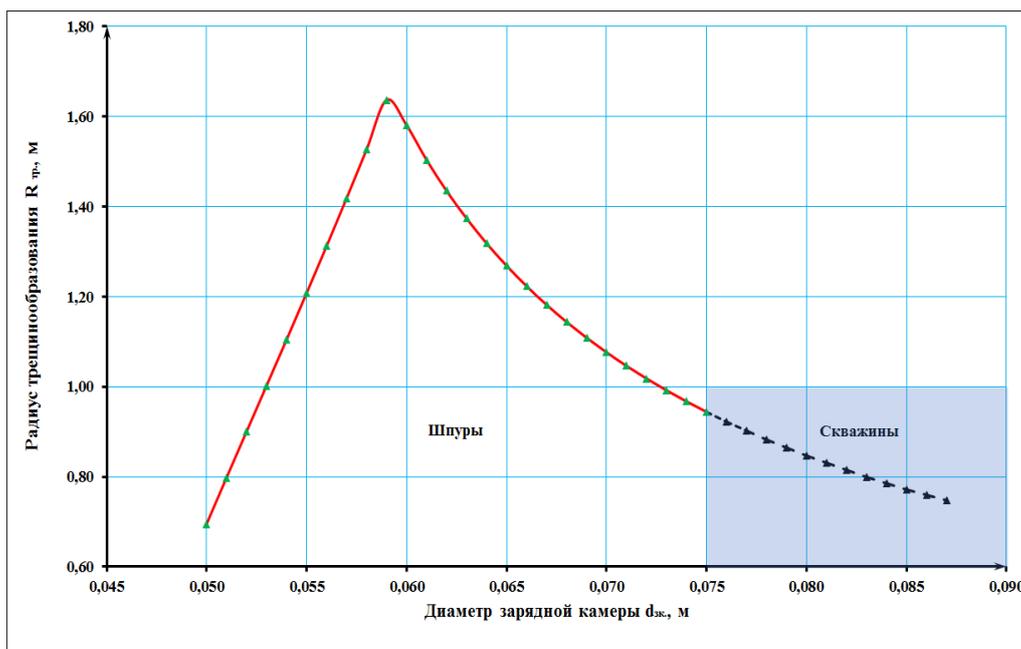


Рис. 3. Зависимость радиуса трещинообразования от диаметра зарядной камеры для патрона ВВ типа аммонит 6ЖВ диаметром 45 мм

4) для уменьшения радиуса трещинообразования при неизменном заряде ВВ в шпуре следует либо уменьшить радиальный зазор до минимально возможного, обеспечивающего зарядание патронов в шпур без усилий, либо увеличить диаметр шпура таким образом, чтобы радиальный зазор не оказывал влияние на величину импульса:

- для патрона диаметром 32 мм – диаметр шпура не менее 62 мм,
- для патрона диаметром 36 мм – диаметр шпура не менее 68 мм,
- для патрона диаметром 45 мм – диаметр зарядной камеры не менее 87 мм

(на рис. 3 часть кривой, соответствующая диаметру от 50 мм до 75 мм, относится к шпурам, выделена красным цветом; свыше 75 мм, выделенная черным пунктиром, относится к скважинам);

5) для увеличения радиуса трещинообразования при неизменном заряде ВВ в шпуре необходимо обеспечить оптимальный радиальный зазор в шпуре $\Delta_0 = 0,3125$, при этом для патронов ВВ диаметром 32 мм диаметр шпура равен 42 мм, для патронов ВВ для патронов диаметром 36 мм – 47 мм, для патронов ВВ для патронов диаметром 45 мм – 59 мм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (регистрационный номер 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Росинский Н.Л., Магойченков М.А., Галаджий Ф.М. Мастер-взрывник: учебник для проф. обучения рабочих на пр-ве. – 3-е изд., перераб. и доп. – М., Недра, 1988. – 384 с. : ил.
2. Мальцев В.М., Аникин В.В. Определение величины линии наименьшего сопротивления шпурового заряда ВВ с учетом его радиального зазора // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 42-46. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.9.
3. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.: ил.
4. Andreiko S.S., Maltsev V.M., Anikin V.V., Nesterov E.A. Calculation of crack formation radius by modeling the explosive charge with a radial clearance // Procedia Structural Integrity. – 2021. – V. 32, № С. – P. 3-9. – DOI: 10.1016/j.prostr.2021.09.002.

РЕЗУЛЬТАТЫ СКВАЖИННЫХ ИСПЫТАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО КАЛИЙНОГО РУДНИКА

Д.А. Поспелов, В.Н. Токсаров
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье приведены результаты натурального определения модуля деформации пород в окрестности одиночных выработок на руднике Гремячинского ГОКа с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана. Экспериментами установлено, что средний модуль деформации в массиве ангидрит-доломитовых пород составляет порядка 7,5 МПа, в массиве сильвинитовых пород – 3,0 МПа, в массиве карналлитовых пород – 2,0 МПа. Установлена взаимосвязь между нарушенностью приконтурного массива и модулем деформации в ангидрит-доломитовых и карналлитовых породах: относительно низкие значения модуля деформации характерны для нарушенного массива, а относительно высокие значения данного показателя – для нетронутого массива.

Ключевые слова: приконтурный массив, нетронутый массив, модуль деформации, скважинный гидродомкрат, деформационные свойства, зона нарушенности, натурные исследования.

Введение

В условиях Гремячинского калийного месторождения проведен комплекс натуральных измерений модуля деформации пород в окрестности одиночных горных выработок (рис. 1) с использованием скважинного гидродомкрата конструкции Гудмана, способного развивать давление до 70 МПа [1, 2]. Определение деформационных свойств пород выполнялось согласно стандарту [3]. Суть экспериментальных исследований заключалась в нагружении стенок скважины гидродомкратом с одновременным измерением давления и деформации [4-6]. Испытания деформационных свойств пород в горизонтальных скважинах проводились с шагом 0,3 м. По результатам испытаний строились диаграммы «напряжение-деформация». Подробно методика проведения испытаний и состав экспериментальной аппаратуры приведены в работе [7].

Измерения проводились на двух экспериментальных участках с тремя замерными станциями. Замерная станция № 1 располагалась в массиве ангидрит-доломитовых пород (рис. 1а), вторая и третья замерные станции располагались, соответственно, в массиве карналлитовых и сильвинитовых пород (рис. 1б).

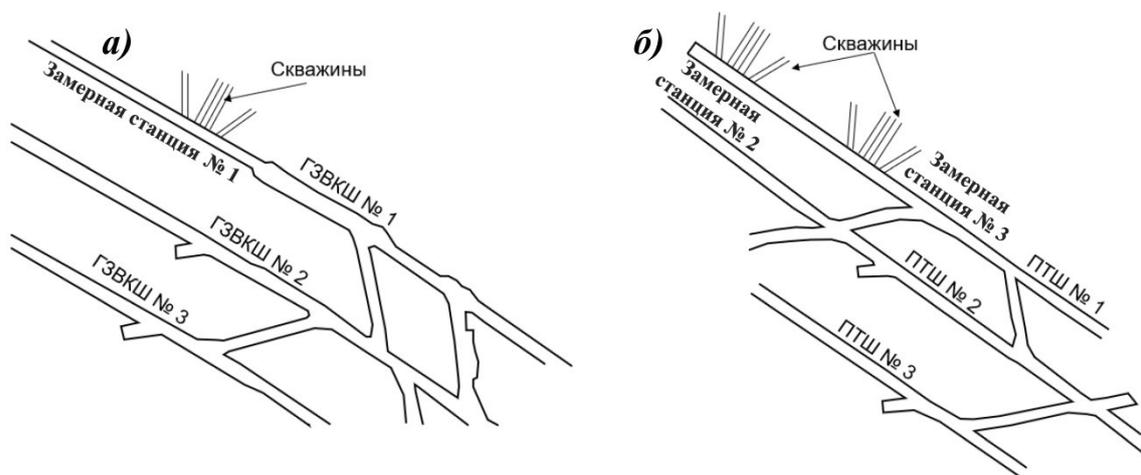


Рис. 1. Схемы размещения замерных станций в (а) ангидрит-доломитовых и (б) соляных породах

Результаты натуральных испытаний деформационных свойств ангидрит-доломитовых пород

На замерной станции № 1, расположенной в главном западном конвейерно-вентиляционном штреке № 1, было исследовано 8 горизонтальных скважин (рис. 1а). В экспериментальных скважинах № 5 и 6 модуль деформации пород определялся в вертикальном направлении, в остальных – в горизонтальном. Характерные графики изменения величины модуля деформации от глубины скважины представлены на рис. 2.

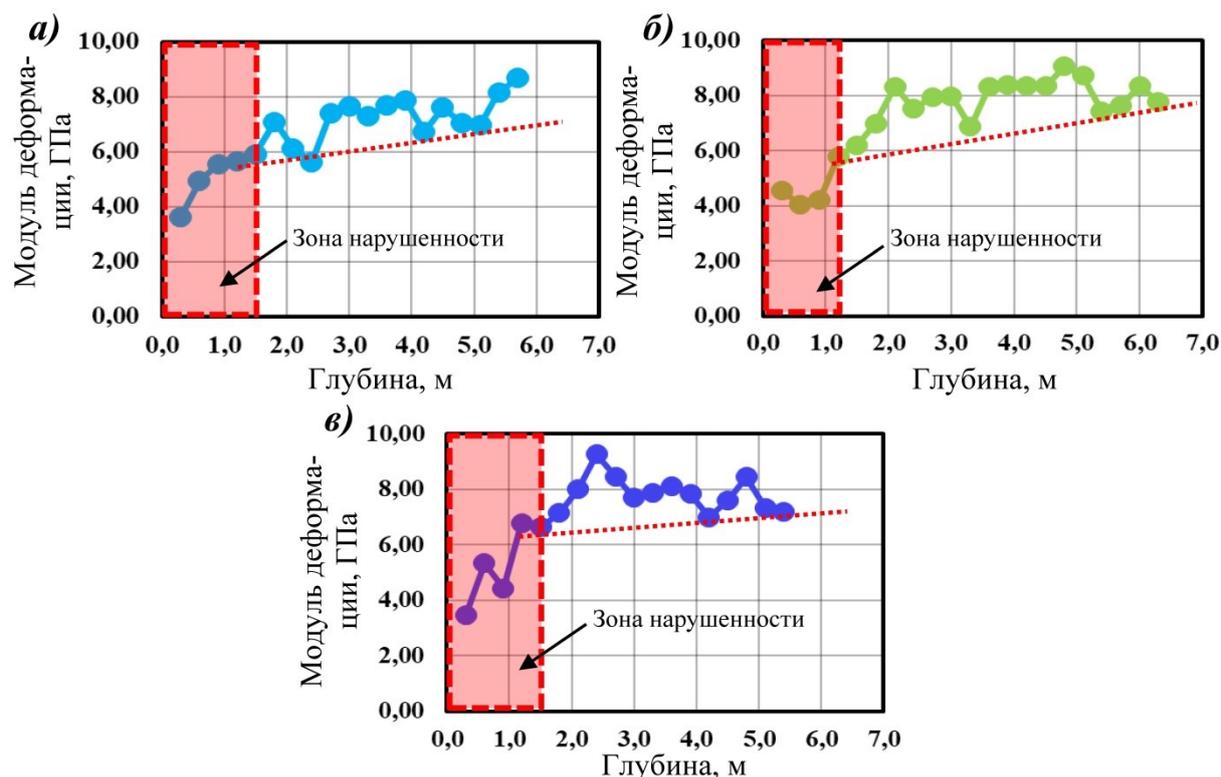


Рис. 2. Некоторые результаты оценки модуля деформации в приконтурном массиве ангидрит-доломитовых пород: (а) скважины № 3-4 (горизонтальное направление); (б) скважины № 7-8 (горизонтальное направление); (в) скважины № 5-6 (вертикальное направление)

Натурными экспериментами установлено, что на глубинах до 1,5 м, приуроченных к зонам нарушенности приконтурных пород, во всех восьми скважинах наблюдаются пониженные значения модулей деформации – порядка 3,5-6,6 ГПа (рис. 2). На больших глубинах величина модуля деформации пород составляет 7-8 ГПа и более.

Таким образом, наблюдается взаимосвязь между степенью нарушенности массива и модулем деформации пород: относительно низкие значения модуля деформации характерны для нарушенного массива, а относительно высокие значения данного показателя – для нетронутого массива (за зоной влияния горной выработки). Экспериментами установлено, что ширина зоны нарушенности в скважинах № 3 и 4 составляет около 1,8 м, в скважинах № 7 и 8 – порядка 1,2 м, в скважинах № 5 и 6 – 1,5 м.

Факт наличия взаимосвязи модуля деформации пород со степенью нарушенности подтверждается результатами полевых испытаний южнокорейских исследователей, проводивших измерения модуля деформации пород с использованием скважинного

гидродомкрата в туннеле, пройденном в массиве гранита [8]. Экспериментами установлено наличие пониженных значений модуля деформации (порядка 15 ГПа) на глубинах до 2 м и более высокие значения (порядка 35 ГПа) – за зоной влияния выработки (рис. 3).

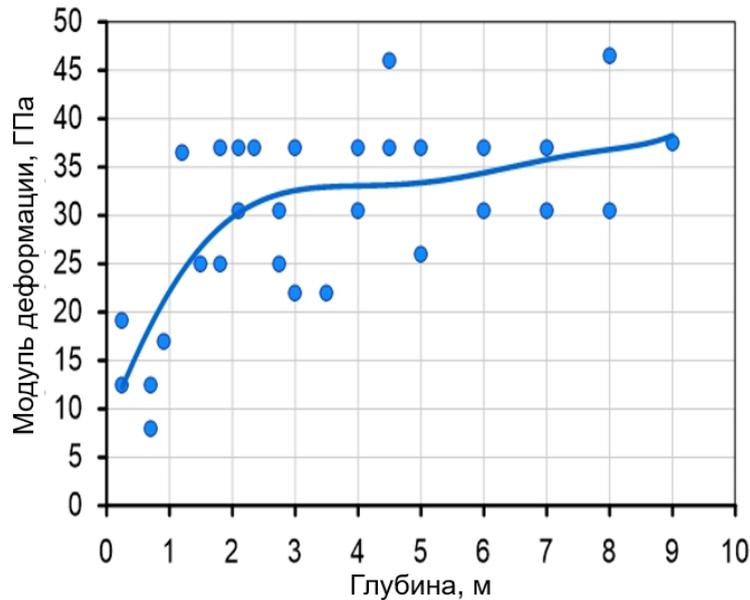


Рис. 3. Распределение модуля деформации с глубиной в горизонтальной скважине, пройденной в массиве гранита [8]

Результаты натуральных испытаний деформационных свойств карналлитовых пород

На замерной станции № 2, расположенной в полевом транспортном штреке № 1, проведены натурные испытания деформационных свойств карналлитовых пород (рис. 1 б). Определение модуля деформации пород в экспериментальных скважинах № 2 и 7 проводилось в вертикальном направлении, а в скважинах № 3-6 – в горизонтальном направлении. По результатам испытаний строились графики изменения величины модуля деформации от глубины скважины (рис. 4).

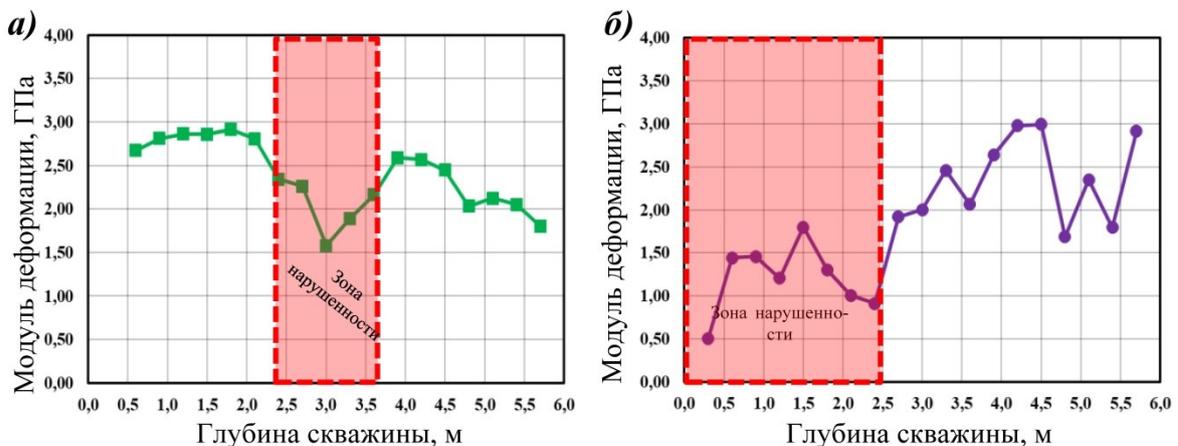


Рис. 4. Некоторые результаты оценки модуля деформации в приконтурном массиве карналлитовых пород: (а) скважина № 7 (вертикальное направление); (б) скважины № 4-5 (горизонтальное направление)

На графиках наблюдаются участки пониженных значений модуля деформации, как на контуре выработки, так и в глубине массива. Считаем, что данные участки также приурочены к зонам нарушенности пород. Таким образом, в карналлитовом массиве наблюдается зональное разрушение. При этом зоны нарушенности в карналлитовом массиве наблюдаются как вблизи контура выработки, так и в глубине массива.

Наличие зонального разрушения в приконтурном массиве карналлитовых пород может быть обусловлено следующими факторами:

- наличием в массиве неоднородностей, примесей;
- хрупкостью самого карналлита;
- предельным состоянием карналлитового массива (предел прочности на одноосное сжатие карналлита равен примерно $10 \div 11$ МПа притом, что $\gamma H = 25$ МПа).

Результаты натуральных испытаний деформационных свойств сильвинитовых пород

На замерной станции № 3, также расположенной в полевом транспортном штреке № 1, проведены натурные испытания деформационных свойств сильвинитовых пород в восьми горизонтальных скважинах (рис. 1б). Модуль деформации пород в скважинах № 9 и 15 определялся в вертикальном направлении, а в остальных – в горизонтальном. Графики изменения величины модуля деформации пород от глубины скважины представлены на рис. 5.

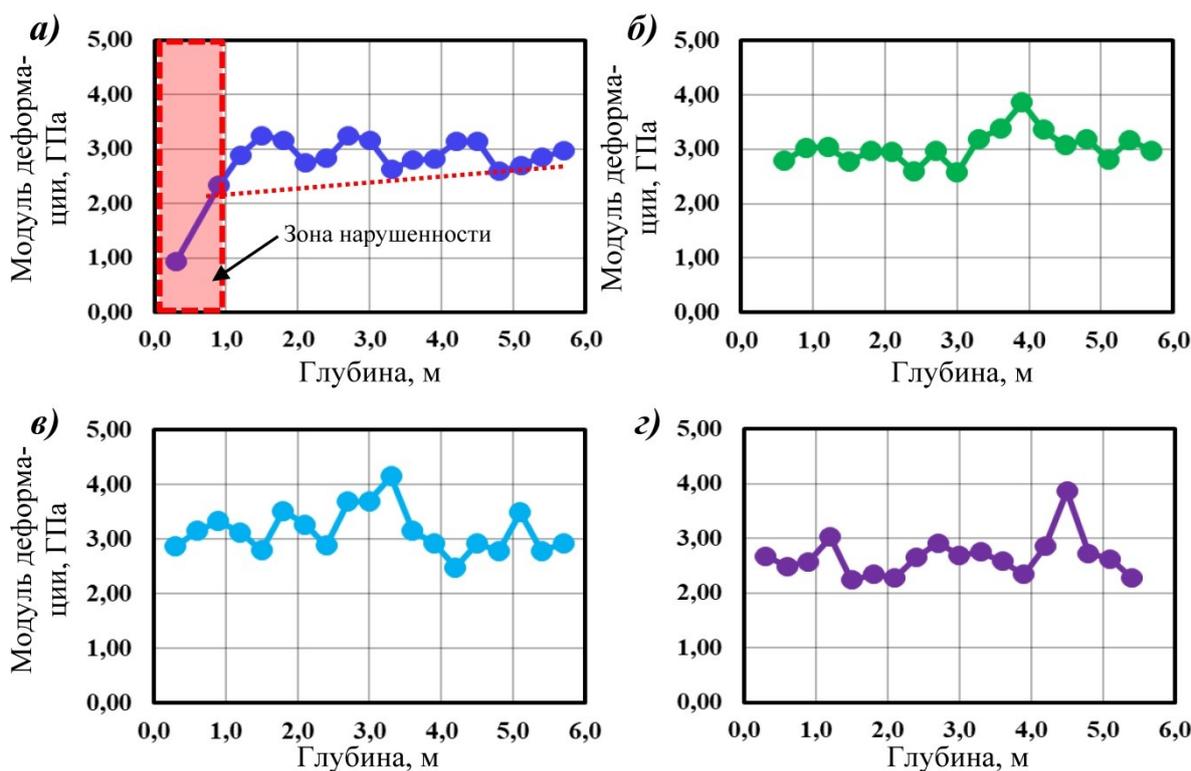


Рис. 5. Некоторые результаты оценки модуля деформации в приконтурном массиве сильвинитовых пород: (а) скважина № 8 (горизонтальное направление); (б) скважины № 10-11 (горизонтальное направление); (в) скважина № 14 (горизонтальное направление) (г) скважина № 9 (вертикальное направление)

На графиках наблюдается относительно равномерный характер распределения модуля деформации сильвинита по глубине. Вследствие отсутствия пористости в сильви-

нитовых породах их деформирование происходит, как правило, без разрыва сплошности, при этом на многих графиках связь между степенью нарушенности и модулем деформации пород не наблюдается (рис. 5).

По результатам проведения комплекса натуральных экспериментальных исследований получены осредненные значения модуля деформации пород в нетронутом массиве (табл. 1).

Таблица 1

Осредненные значения модуля деформации пород в нетронутом массиве

Наименование породы	Модуль деформации, ГПа
Вертикальное направление	
Ангидрит-доломитовые породы	7,53
Сильвинитовые породы	2,77
Карналлитовые породы	2,26
Горизонтальное направление	
Ангидрит-доломитовые породы	7,19
Сильвинитовые породы	3,02
Карналлитовые породы	1,90

Выводы

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

– средний модуль деформации в массиве ангидрит-доломитовых пород составляет порядка 7,5 МПа, в массиве сильвинитовых пород – 3,0 МПа, в массиве карналлитовых пород – 2,0 МПа;

– установлена взаимосвязь между нарушенностью приконтурного массива и модулем деформации пород: относительно низкие значения модуля деформации характерны для нарушенного массива, а относительно высокие значения данного показателя – для нетронутого массива. Особенно четко эта взаимосвязь прослеживается в приконтурном массиве ангидрит-доломитовых пород;

– установлено, что нарушенные зоны в карналлитовом массиве, характеризующиеся относительно низкими значениями деформационных свойств, наблюдаются как на контуре выработки, так и в глубине массива;

– в сильвинитовых массивах часто наблюдается равномерный характер распределения модуля деформации с удалением от контура выработки, вследствие чего оценить размеры зон нарушенности в приконтурной части массива по величине модуля деформации достаточно сложно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (регистрационный номер 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meyer T.O., McVey J.R. NX borehole jack modulus determinations in homogeneous, isotropic, elastic materials // US Bur Mines Rep Invest, 1974. – № 7855.
2. Heuze F.E. Suggested method for estimating the in-Situ modulus of deformation of rock using the NX-Borehole Jack // Geotechnical Testing Journal. – 1984. – Vol. 7, № 4, Dec. – P. 205-210.
3. ASTM D4971-08. Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Using Diametrically Loaded 76-mm (3-in.) Borehole Jack. – 2008. – 7 p.
4. Kuvik M., Kopecký M., Frankovská J. Deformation modulus determination from pressuremeter and dilatometer tests for crystalline rock // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 471, № 4. – № статьи 042010. – DOI: 10.1088/1757-899X/471/4/042010.
5. Agharazi A., Tannant D., Jafari A. Stress and tunnel geometry effects on deformation modulus derived from plate load tests: GeoEdmonton '08: 61st Canadian Geotechnical Conference. – 2008. – P. 601-608.
6. Асанов В.А., Токсаров В.Н., Бельтюков Н.Л. Контроль состояния пород приконтурного массива в зоне влияния геологической аномалии // Геомеханика в горном деле: докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2014. – С. 187-194.
7. Поспелов Д.А., Токсаров В.Н., Бельтюков Н.Л. Методика оценки модуля деформации пород в приконтурном массиве с использованием скважинного гидродомкрата // Горное эхо. – 2022. – № 1 (86). – С. 51-57. – DOI: 10.7242/echo.2022.1.7.
8. Park S., Kim J.-S., Kwon S. Investigation of the development of an excavation damaged zone and its influence on the mechanical behaviors of a blasted tunnel // Geosystem Engineering. – 2018. – V. 21. № 3. – P. 165-181. – DOI: 10.1080/12269328.2018.1461139.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2023.1.9

ОПРОБОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ С ОПЫТНЫМ МОЛОТОМ

В.Ю. Бобров

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Представлены результаты эксперимента по модернизации серийного молота невзрывного импульсного источника AWD-33 с целью повышения эффективности передачи энергии от источника в грунт. Произведено опробование опытного молота на разных типах поверхности наблюдений. Подтверждена зависимость изменения энергетических показателей сигнала в связи с потерями кинетической энергии при отскоке молота.

Ключевые слова: невзрывная сейсморазведка, механизированный источник упругих колебаний, безынерционный молот.

Введение

В наземной или шахтной невзрывной сейсморазведке предполагается, что при ударе по поверхности наблюдения в среде развиваются идентичные волновые процессы, приводящие к возбуждению упругих колебаний. Регистрируемые полезные отраженные волны при условии сохранения формы колебаний определяются интегралом свертки [1, 1]:

$$a(t) = \int_{\tau} j(t) a_n(t - \tau) dt, \quad (1)$$

где $j(t)$ – распределение значений коэффициентов отражений по разрезу, $a_n(t - \tau)$ – импульс, возбуждаемый невзрывным источником, τ – временная задержка, dt – время контакта. Интенсивность и форма начального импульса зависит от ряда факторов, в том числе от характера взаимодействия источника с грунтом и величины действующей на грунт силы.

Рабочий элемент источника приводится в движение в горизонтальной или вертикальной плоскости. Под действием внешних сил в грунте возникают объемные или сдвиговые деформации, выводя частицы грунта из положения равновесия, вследствие чего происходит формирование упругих волн в среде [3]. Регистрация этих волн на поверхности или в скважинном пространстве позволяет решать задачи, поставленные перед сейсморазведкой.

Для решения широкого круга малоуглубинных и инженерных сейсморазведочных задач на территории Верхнекамского месторождения среди невзрывных источников упругих колебаний успешно применяются механизированные молоты типа «падающий груз» AWD-33 и AWD-40. Энергия воздействия данных источников на грунт обеспечивает формирование волнового поля с широким частотным диапазоном и интенсивностью, достаточной для регистрации отраженных волн в интервале исследуемых глубин [4, 5, 6]. Преимуществами данных источников являются безопасность при эксплуатации, экологичность, дешевизна, транспортабельность и возможность генерации неограниченного числа идентичных по времени и энергии накапливаний.

Условия передачи энергии от источника в грунт зависят от поверхности наблюдений. Работы за чертой города обычно проходят в зоне полей, лесов и болотистой мест-

ности. В данном случае условия передачи энергии в значительной степени зависят от необратимых пластических деформаций, создаваемых при ударе. При выполнении работ в пределах города или на промышленных площадках, где в основном поверхность наблюдения представлена твердым покрытием (асфальт, бетон), характер взаимодействия источника с грунтом изменяется. Возникает отскок молота от поверхности наблюдения при ударе, вследствие чего происходит потеря энергии и образование многократных волн.

Данная работа посвящена опробованию механизированного источника с модернизированным молотом с целью повышения энергетических характеристик генерируемого сигнала и улучшения качества волновой картины.

Теория

Результативность невзрывных источников, как правило, определяется тем, какая часть начальной энергии до удара преобразуется в энергию упругих колебаний после удара [7]. Общий баланс энергии можно описать выражением:

$$E = E_1 + E_2 + E_{\text{п}}, \quad (2)$$

где E – энергия молота до удара, E_1 – энергия, израсходованная на образование упругих колебаний, E_2 – энергия молота после удара (энергия молота после отскока), $E_{\text{п}}$ – энергия необратимых пластических деформаций. Как можно заметить, для увеличения эффективности источника необходимо стремиться к уменьшению E_2 и $E_{\text{п}}$. Для минимизации необратимых пластических деформаций используются промежуточные металлические плиты-подложки, благодаря которым увеличивается площадь удара, понижая давление на грунт [8]. Исходя из этого, открытой проблемой является ослабление ударной силы источника за счет перехода части общей кинетической энергии в энергию молота после удара, сопровождающееся отскоком молота от поверхности наблюдения. Отскок молота наиболее весомо влияет на энергетические характеристики генерируемого сигнала при работах на твердых поверхностях, так как при увеличении плотности грунта высота отскока увеличивается, а необратимые пластические деформации при данных условиях практически отсутствуют. Кроме того, многократные отскоки молота влияют на качество сейсмического материала, создавая помехи в окне полезной записи сигнала (Рис. 1).

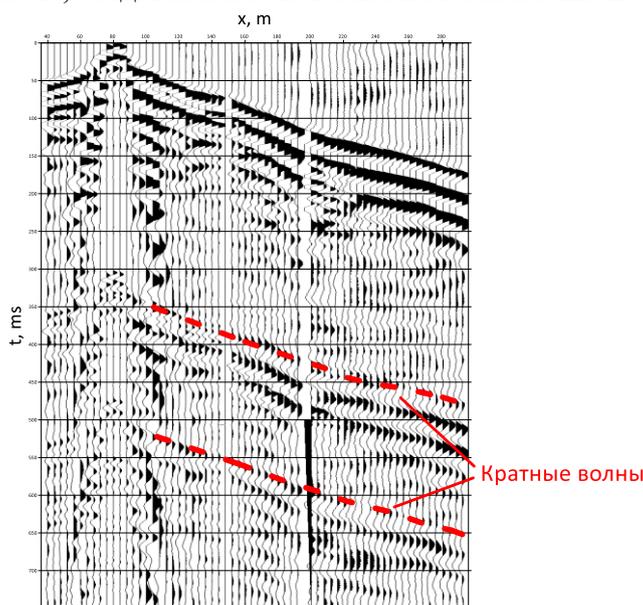


Рис. 1. Сейсмограмма ОПВ с наличием помех в виде кратных волн

Ранние исследования подтверждают зависимость энергетических показателей от величины отскока молота [9]. Произведено опробование плиток-подложек из разного типа металла и разной площади. Благодаря ряду экспериментов выявлено, что использование титановой плиты позволяет минимизировать отскок и добиться наименьших энергетических потерь (Рис. 2). Получив величину коэффициента восстановления [10] можно количественно оценивать потери энергии при разной высоте отскока молота.

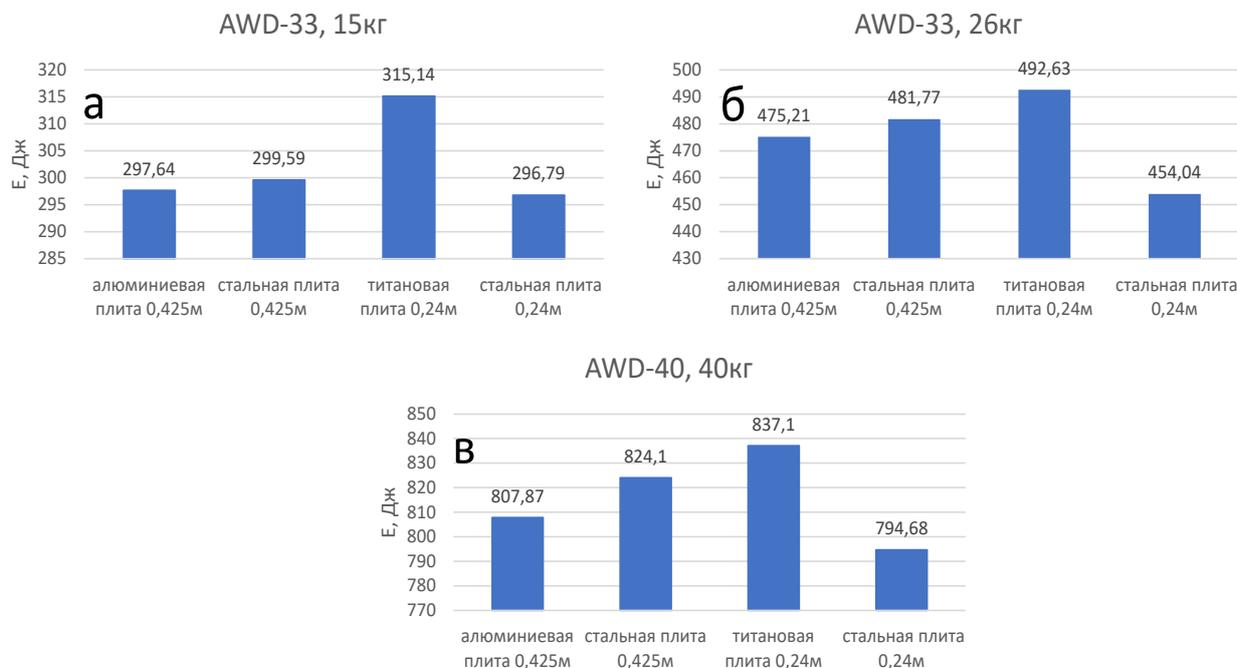


Рис. 2. Распределение энергии, потраченной на образование упругих волн при разных типах плит-подложек:

- а) эксперимент, проводимый с помощью установки AWD-33 15 кг;
- б) эксперимент, проводимый с помощью установки AWD-33 26 кг;
- в) эксперимент, проводимый с помощью установки AWD-40 40 кг

Для того чтобы свести отскок к минимуму, тем самым повысив передачу энергии от источника в грунт, предложено сконструировать опытный молот для механизированного источника AWD-33, взяв за прототип безынерционный молоток.² Данное устройство относится к космической технике, разработано в 70-е годы прошлого века. Отличительной особенностью космического молотка является содержание полости в бойке, которая в свою очередь заполнена сыпучим наполнителем с высокой удельной плотностью. В космическом молотке, разработанным для выполнения технологических операций космонавтами в условиях невесомости, определяют длину полости L при заданных массе молотка M , удельной плотности сыпучего наполнителя ρ и диаметре полости d по зависимости:

$$L = \frac{4(0,4 \div 0,5)M}{\pi d^2 \rho} (1,1 \div 1,2) \quad (3)$$

Важными требованиями для сохранения безынерционных свойств без потерь ударного качества инструмента в земных условиях, являются параметры массы сыпучего

² Патент № RU 2560899

наполнителя m и степень заполнения полости по ее длине l . Данные параметры рассчитываются по формулам:

$$m = (0,4 \div 0,5) M \quad (4.1)$$

$$l = L / (1,1 \div 1,2) \quad (4.2)$$

Принцип работы данной конструкции реализуется следующим образом.

При движении бойка на стадии замаха наполнитель частично смещается в полости к задней стенке бойка, при этом образуются бесконтактные зазоры между частицами и разряжение в среде сыпучего наполнителя.

При движении в направлении нанесения удара корпус бойка опережает сыпучий наполнитель из-за инерционного отставания последнего.

В момент удара происходит начало отскока бойка. Частицы наполнителя вступают в контакт с ударной частью бойка, при этом кинетическая энергия сыпучего наполнителя, уплотнение частиц и трение между частицами обеспечивают сглаживание отскока, обеспечивая равномерный жесткий удар.

Эксперимент

Стандартный молот механического источника AWD-33 выполнен из стали. Выпускается в двух вариациях: литой с массой 33 кг и полый с массой 13 кг. Полость в полном объеме заполняется металлическими шайбами разной массы до необходимого значения в зависимости от конкретных задач.

Опираясь на параметры (4.1) и (4.2), сконструирован молот по типу безынерционного молотка (Таб. 1.). В качестве сыпучего наполнителя использована свинцовая дробь. Для регуляции степени заполненности полости в верхней части молота присутствует штوك, позволяющий зафиксировать верхнюю часть полости в необходимом положении. При реализации не удалось полностью выдержать требуемые параметры в связи с ограничениями конструкции молота серийного производства, что может повлиять на нейтрализацию отскока при ударе.

Таблица 1

Параметры сконструированного молота

1	Масса полого молота (M), кг	13
2	Масса сыпучего наполнителя (m), кг	8
3	Общая масса молота ($M+m$), кг	21
4	Высота молота, м	0,9
5	Длина полости (L), м	0,6
6	Степень заполненности по длине (l), м	0,5

Для сравнения величины отскока и энергетических характеристик генерируемых упругих колебаний опробовано два механизированных источника AWD-33 с серийным и опытным молотами одинаковой массы. Параметры записи, использованные при работах, приведены в таблице 2.

По ходу эксперимента отработано две физических точки с разными поверхностными условиями. На первой точке поверхность наблюдений представлена плотным снежным покровом, а на второй асфальтом проезжей части. Для прослеживания динамики энергетических показателей регистрация сигнала происходила с разным

числом накопчиваний на одной точке наблюдения. Для исключения деформации поверхности наблюдения использовалась алюминиевая плита-подложка с диаметром 0,425 м.

Таблица 2

Параметры системы регистрации

1	Шаг пунктов приема (ПП), м	8
2	Шаг пунктов возбуждения (ПВ), м	8
3	Максимальное удаление ПП – ПВ,	504
4	Количество активных каналов	64
5	Шаг дискретизации, мс	0,5
6	Усиление, Дб	Normal 64

На Рис. 3 представлены выборки сейсмограмм, полученные в результате эксперимента.

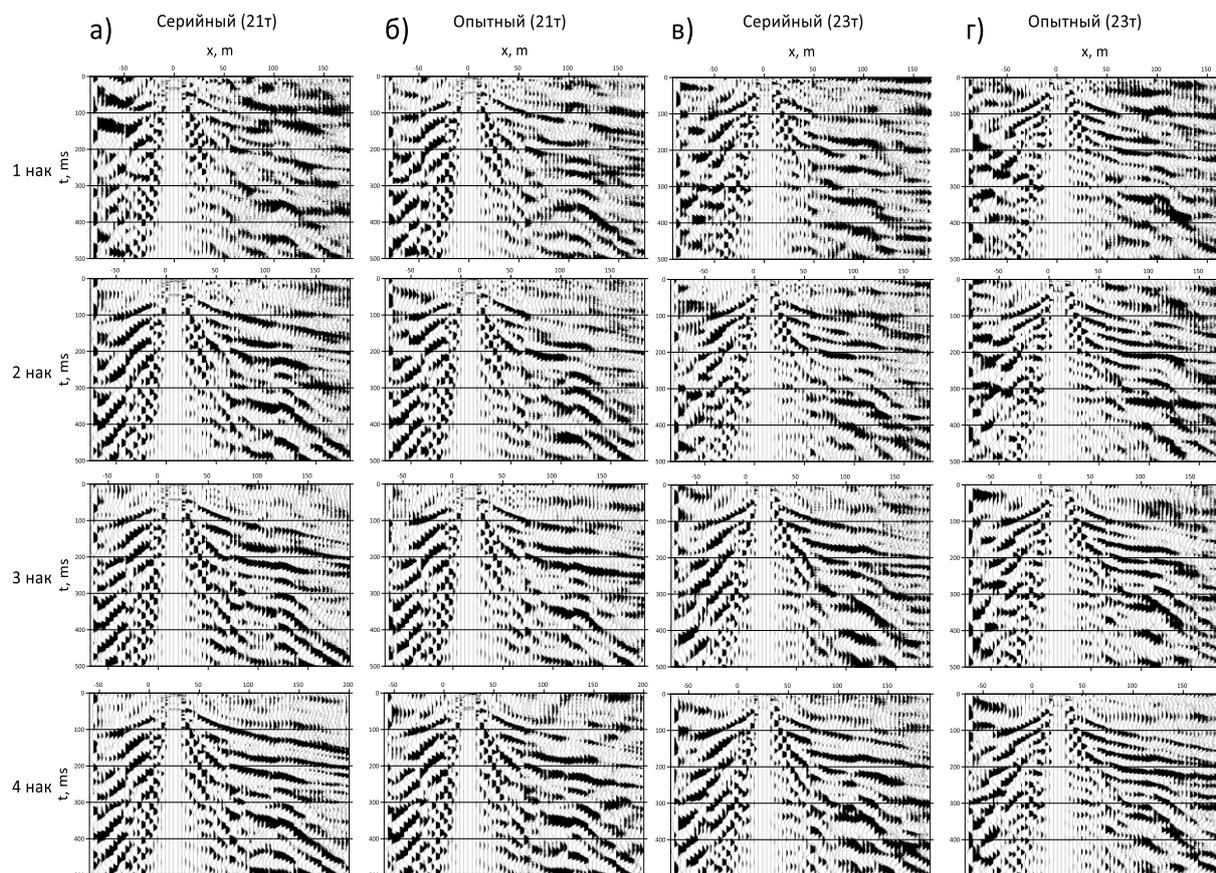


Рис. 3. Сейсмограммы ОПВ полученные в результате удара молота с различным числом накопчиваний: а) серийным молотом по снегу; б) Опытным молотом по снегу; в) серийным молотом по асфальту; г) опытным молотом по асфальту

Визуально сейсмограммы, записанные с использованием разных молотов, с одинаковым числом накопчиваний и при одинаковых поверхностных условиях имеют схожую волновую картину.

Фиксация удара производилась на камеру с частотой записи 240 fps. Увеличенная частота раскадровки позволяет более детально отследить высоту отскока молота при ударе (или его отсутствие). Полученные результаты представлены в таблице 3:

Таблица 3

Средние показатели высоты отскока
серийного и опытного молота от разных поверхностей

	Тип молота	Поверхность наблюдений	Средняя высота отскока h , м
1	Серийный	Снег	0,01 – 0,02
2	Опытный		0,01 – 0,02
3	Серийный	Асфальт	0,04 – 0,05
4	Опытный		0,01 – 0,02

Средняя высота отскока при работах на заснеженной поверхности наблюдений у серийного и опытного молота практически одинакова. Пренебрегая малым коэффициентом восстановления, удар можно классифицировать как абсолютно неупругий [11]. Данный результат объясняется преобладающими необратимыми пластическими деформациями, связанными с утрамбовкой снега. При работах на асфальтовом покрытии характер взаимодействия молота с грунтом изменился. Удар можно классифицировать как не вполне упругий [11]. Необратимые пластические деформации практически отсутствуют. С помощью опытного молота удалось минимизировать средний отскок до 1-2 см, в то время как средний отскок у серийного молота достигает 4-5 см.

На амплитудных спектрах (Рис. 4а), полученных по сейсмограммам ОПВ, в диапазоне полезной записи сигнала прослеживается схожесть энергетических показателей при работах разными молотами на заснеженной поверхности наблюдения.

На асфальтированном покрытии при работе механизированным источником с опытным молотом наблюдается увеличение ширины частотного диапазона (Рис. 4б). В частности, увеличился спектр сигнала в районе 30-40 Гц. Увеличение спектра сигнала сохраняется как при единичном, так и при множественных накапливаниях.

Выводы

Результаты эксперимента подтверждают ранние исследования [9] и указывают на то, что при работах на жестких покрытиях характер передачи энергии от источника в грунт в большей степени зависит от потерь кинетической энергии в связи с отскоком молота.

С помощью опытного молота, спроектированного по прототипу безынерционного молотка, удалось подавить многократные отскоки молота и снизить единичный отскок до 1-2 см от поверхности плиты-подложки, тем самым минимизировав генерацию кратных волн помех. Помимо этого, при применении механизированного источника AWD-33 с опытным молотом замечено увеличение ширины частотного диапазона записываемого сигнала, что в следствии влияет на качество сейсмического материала.

В связи с тем, что параметры опытного молота имеют производственную погрешность, связанную с техническими ограничениями при модернизации серийного экзем-

пляра, не удалось полностью подавить отскок молота. Требуется более детальная проработка конструкции опытного молота для устранения погрешности основных параметров при учете возможности его использования на источнике AWD-33 без серьезных конструктивных изменений последнего.

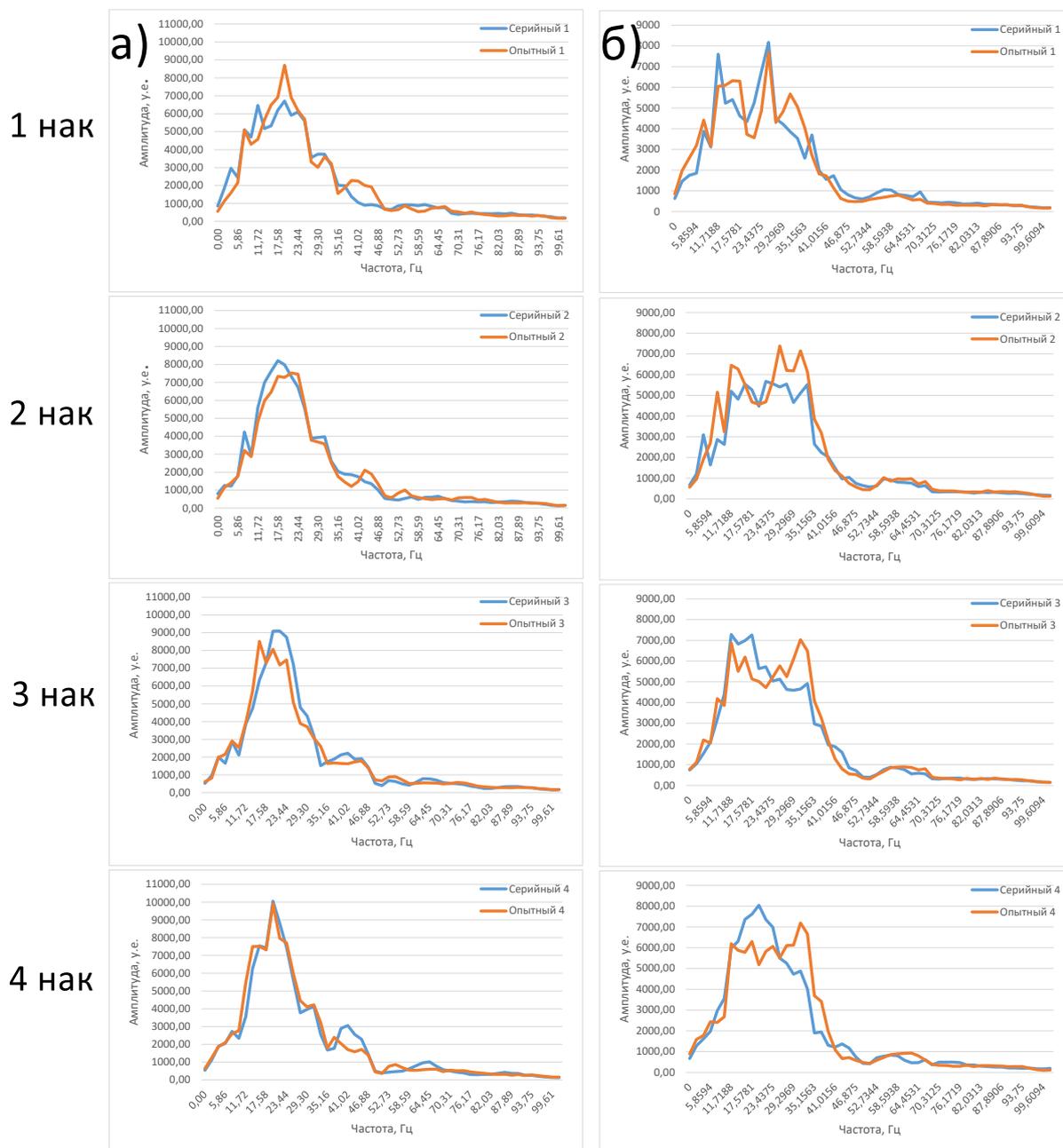


Рис. 4. Амплитудные спектры сейсмограмм ОПВ:
а) поверхность наблюдения снег; б) поверхность наблюдения асфальт

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №20-45-596030 р_НОЦ_Пермский край.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнеерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная сейсморазведка с невзрывными источниками колебаний. – М.: Недра, 1980. – 205 с.: ил.

2. Цифровая обработка сейсмических данных / [Козлов Е.А., Гогоненков Г.Н., Лернер Б.Л. и др.]. – М.: Недра, 1973. – 311 с.: ил.
3. Шнейерсон М.Б., Майоров В.В. Наземная невзрывная сейсморазведка. – М.: Недра, 1988. – 237 с.: ил.
4. Санфиоров И.А., Фатькин К.Б. Сравнительный анализ различных типов невзрывных источников для малоглубинной сейсморазведки // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. конф. / ПГУ. – Пермь, 1997. – С.
5. 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.
6. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. О результатах применения малоглубинной сейсморазведки МОГТ на территории ВКМКС // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии: тр. Междунар. геолого-геофизич. конф., 05-08 февр. 2018 г. / ООО «Центр анализа сейсмологич. данных МГУ». – М., 2018. – С. 664-668 Р.
7. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 176 с.: ил.
8. Санфиоров И.А. Рудничные задачи сейсморазведки МОГТ / ГИ УрО РАН. – Екатеринбург, 1996. – 168 с.
9. Бобров В.Ю., Герасимова И.Ю. Особенности применения невзрывных источников упругих волн на урбанизированных территориях // Инженерная и рудная геофизика – 2022: сб. материалов 18-ой науч.-практ. конф. и выставки, 5-8 сент. 2022 г. – М., 2022. – С. 98-104.
10. Григорьев А.Ю., Григорьев К.А., Малявко Д.П. Соударение тел: учеб.-метод. пособие. – СПб: Ун-т ИТМО, 2015. – 43 с.
11. Краткий технический справочник. Том 1. / под ред. В.А. Зиновьева. — М., Л.: Гос. изд-во технико-теоретич. литературы, 1949. – С. 290.

УДК 550.834.05

DOI:10.7242/echo.2023.1.10

ПРИМЕНЕНИЕ ДАННЫХ МЕТОДА ПЕРВЫХ ВОЛН ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ СКОРОСТНОГО ЗАКОНА В ВЕРХНЕМ ИНТЕРВАЛЕ МАЛЫХ ГЛУБИН

И.Ю. Герасимова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В рамках изучения свойств верхнего интервала малых глубин применены данные, полученные на этапе расчета статических поправок. Сформированы карты распределения скоростей, выделены участки, отличающиеся по скоростному строению от вмещающего массива пород.

Ключевые слова: верхняя часть разреза, верхний интервал малых глубин, статические поправки, Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей, малоглубинная сейсморазведка.

В настоящее время одной из сложных и до конца не формализованных задач, возникающих на этапах обработки и интерпретации данных сейсморазведки, является задача корректного учета поверхностных и глубинных неоднородностей, приуроченных к верхней части разреза (ВЧР) и интервалу разреза от уровня приведения (УП) до верхней отражающей границы (ВОГ). В рамках настоящей задачи можно рассматривать два направления исследований: 1) учет ВЧР за счет вычисления и коррекции различных составляющих статических поправок и 2) определение скоростных характеристик в верхнем интервале разреза на этапах ввода и коррекции кинематических поправок. Совместное и грамотное решение указанных вопросов приводит к формированию однозначного и адекватного отображения геометрии и скоростной модели целевых объектов.

При изучении методами малоуглубинной сейсморазведки Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей часто возникают нетривиальные задачи, обусловленные как сложным неоднородным геолого-геофизическим строением разреза по вертикали и латерали, так и многообразием вопросов, возникающих при разработке [3]. Уместно указать следующие факторы, не позволяющие формализовать процессы обработки и интерпретации: сложный и невыдержанный характер рельефа, не допускающий использование унифицированного уровня приведения при расчете априорных статических поправок иногда даже в пределах одного участка исследований; геологические особенности строения месторождения, обуславливающие использование в качестве ВОГ разных стратиграфических границ, выходящих на уровень приведения в пределах единого шахтного поля.

Традиционно процесс определения и учета априорных статических поправок базируется на вычислении по годографам первых вступлений сейсмограмм средних и граничных скоростей в рамках слоисто-однородной модели верхней части разреза с малым количеством преломляющих границ [1]. Глубинность проникновения первых волн в этом случае в зависимости от строения ВЧР изменяется от 10 до 30 м. Скорость в интервале УП – ВОГ подбирается в интерактивном режиме с использованием специализированных программ, разработанных для интервала малых глубин на основе использования «тотального» поиска эффективных скоростей суммирования для каждого времени, обеспечивающих максимальную суммарную когерентность пакетов отражений в пределах зарегистрированных сейсмограмм [2, 4]. При этом стратиграфическая граница, используемая в качестве ВОГ, может в пределах месторождения залегать на глубинах от 10 до 50 м, иногда до 100 м относительно уровня приведения. Таким образом, скоростное строение среды в диапазоне глубин между изучаемыми по данным преломленных и отраженных волн может быть в отдельных случаях осложнено формально учтенными неоднородностями, требующими более детализированного подхода.

В качестве одного из методов уточнения скоростного строения верхнего интервала малых глубин может использоваться методика внедрения в традиционный граф интерпретации отраженных волн информации, полученной на этапе расчета статических поправок. В предлагаемом случае скорость, получаемая при решении обратной задачи для верхней части разреза, может быть использована в качестве априорной составляющей закона, интерактивно формируемого для глубинных построений.

В качестве априорной составляющей могут быть использованы граничные (скорости в коренных породах, подстилающих ВЧР) или «средние эффективные» (рассчитанные для всей толщи пород ВЧР в предположении однородного строения последней) скорости. Уточним, что при расчете статических поправок граничные скорости могут включать интервал разреза, залегающий как выше, так и ниже уровня приведения (в зависимости от выбора абсолютной отметки УП), а эффективные определяют только верхнюю часть разреза (до УП) и включают обобщенную информацию об особенностях строения в каждом из слоев последней.

Сопоставление значений граничных и эффективных скоростей показывает их автономность относительно друг друга (рис. 1а) и независимость изменений от колебаний рельефа поверхности наблюдений (рис. 1б).

Рассмотрим примеры внедрения в стандартный граф интерпретации априорной скорости, полученной при изучении первых волн, для нескольких потенциально-опасных участков, расположенных в пределах разных шахтных полей Верхнекамского месторождения, отличающихся по геологическому строению и по степени техногенной нагрузки.

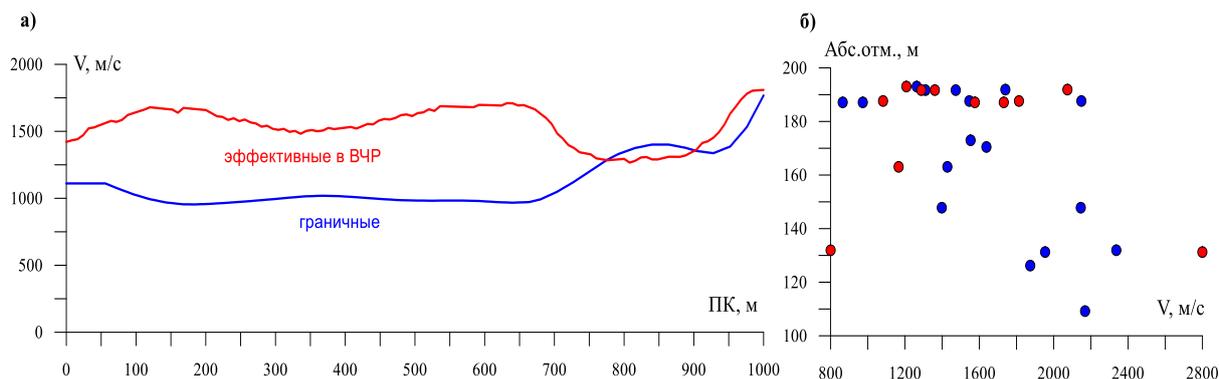


Рис. 1. Графики распределения граничных и эффективных скоростей вдоль линии профиля (а), зависимость значений скорости от абсолютных отметок рельефа (б)

На рис. 2 приведено сопоставление данных, полученных вдоль одной из профильных линий. При сравнении графиков интервальных скоростей УП – ВОГ, рассчитанных по традиционной методике и с учетом скорости в верхней части разреза, можно отметить бóльшую степень изменчивости последней при меньших абсолютных значениях. Разница между величинами интервальных скоростей достигает 800 м/с, составляя в среднем вдоль линии профиля 450 м/с.

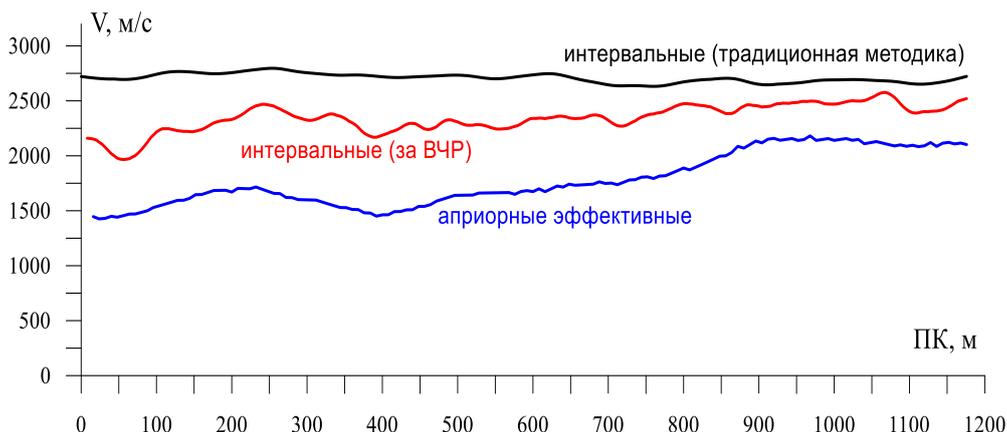


Рис. 2. Графики скоростей вдоль профильной линии до и после этапа интерпретации

После формирования пространственного распределения скоростей в верхнем интервале малых глубин (рис. 3а, б) для участка в пределах городской агломерации наблюдается ряд локальных областей разнонаправленной изменчивости скоростных свойств. Сравнение полей, полученных в разное время, позволяет рассчитать динамику изменений за двухлетний период, определяемую как разность между последующим и предыдущим значениями (рис. 3в). Обращают на себя внимание участки отрицательных изменений в южной и юго-западной областях площадки исследований. При этом по результатам сопоставления данных метода преломленных волн за 2-летний период в интервале глубин выше уровня приведения (18-30 м) вблизи юго-западной границы наблюдается контрастная отрицательная область, а по данным метода отраженных волн (глубина ниже УП до 90 м) – незначительные изменения по сравнению с предыдущим этапом. Таким образом, можно предположить, что негативные изменения свойств массива, отмечаемые в ВЧР, затухают в интервале глубин выше кровли соляно-мергельной толщи, используемой в качестве ВОГ.

По результатам сравнительного анализа количественных оценок скоростей распространения упругих волн, выполненного для потенциально-опасного участка, расположенного в пределах следующего шахтного поля, наблюдается расширение низкоскоростной зоны и контрастная отрицательная область в интервале глубин до 60 м ниже уровня приведения.

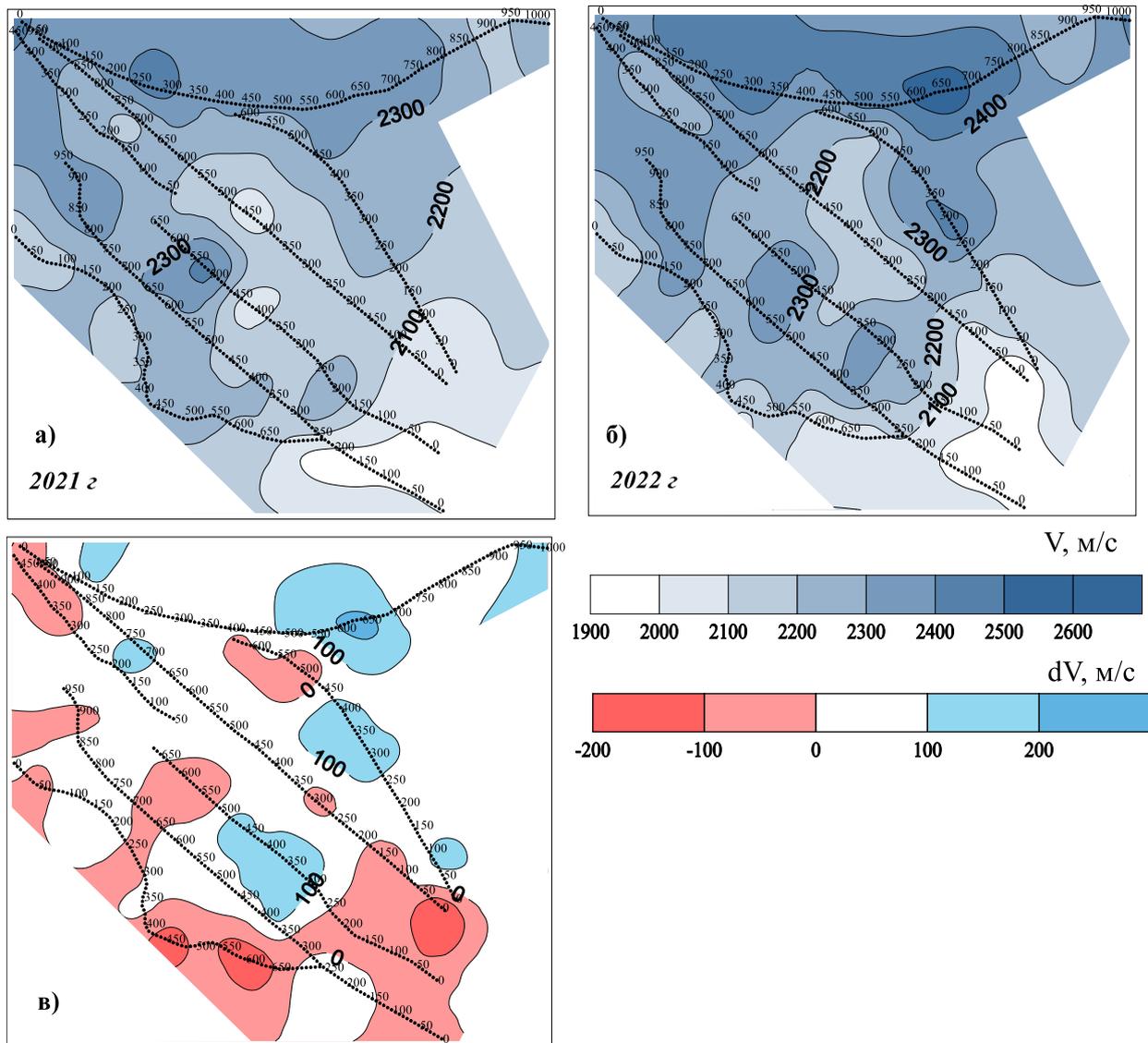


Рис. 3. Участок № 1. Схемы интервальных скоростей УП - СМТ (а, б) и скоростной изменчивости (в) (2022-21 гг.)

Таким образом, обобщенные данные параметров первых волн могут быть использованы для учета искажений, вносимых влиянием верхней части разреза во времена регистрации отраженных волн в верхнем интервале малых глубин. Отметим, что технология внедрения априорной скорости в стандартный граф интерпретации программно реализована, не сопряжена со значительными временными затратами и может быть применена для получения дополнительной информации при изучении участков, требующих особого внимания.

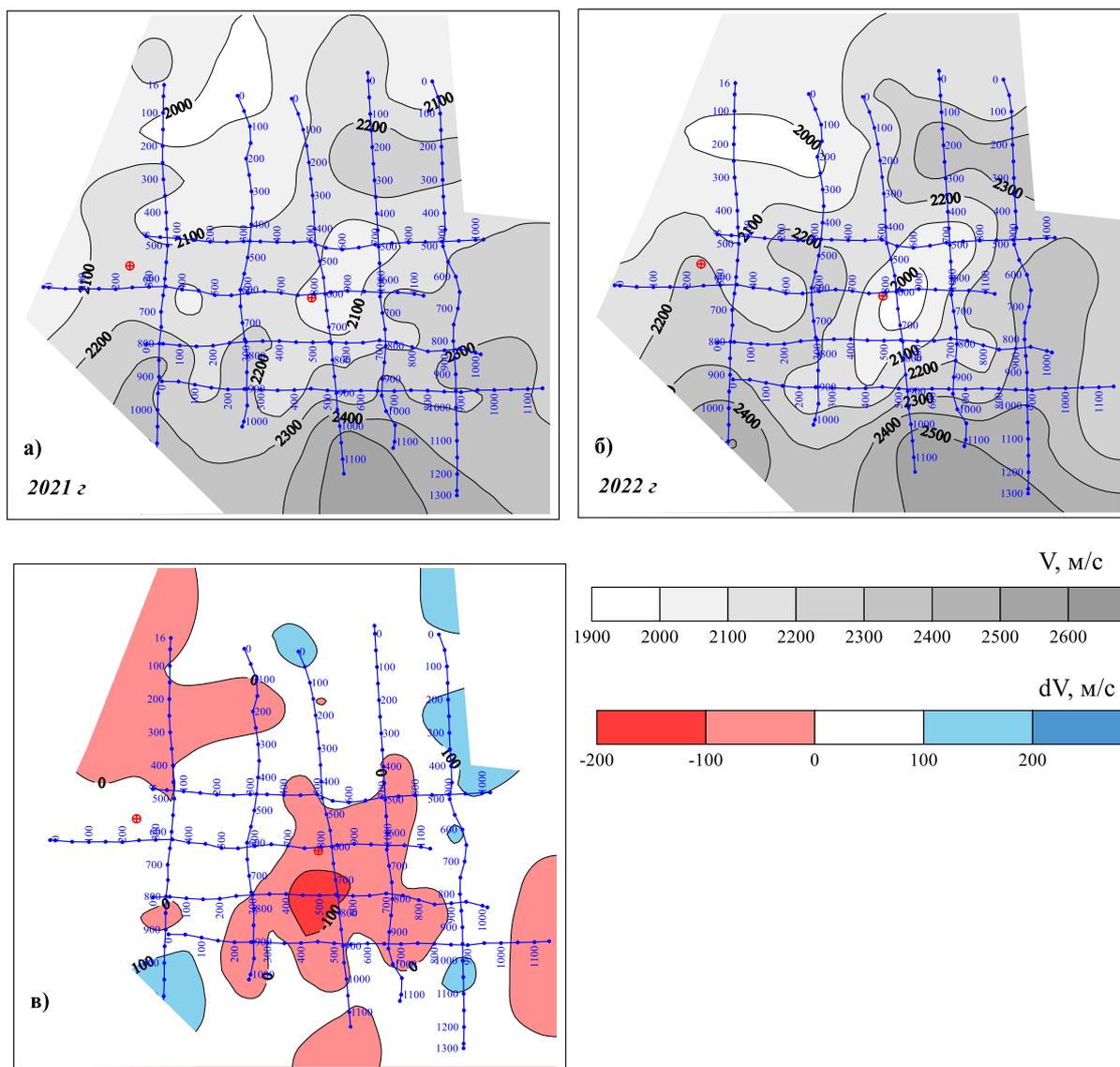


Рис. 4. Участок № 2. Схемы интервальных скоростей УП - СМТ (а, б) и скоростной изменчивости (в) (2022-21 гг.)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №20-45-596032 р_НОЦ_Пермский край

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спасский Б.А. Учет верхней части разреза в сейсморазведке // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. – 2019. – Вып. 2 (39). – С. 201-206.
2. Тарантин М.В. Алгоритмы обработки сейсморазведочных данных для повышения достоверности результатов скоростного анализа // Горное эхо. – 2021. – № 2 (83). – С. 60-64. – DOI: 10.7242/echo.2021.2.12.
3. Sanfirov I.A., Zhikin A.A., Yaroslavcev A.G., Babkin A.I. Ideas of Urupov A.K. In velocity analysis of the shallow seismic data // Geofizika. – 2013. – № 5. – P. 12-16.
4. Yaroslavtsev A.G., Tarantin M.V., Baibakova T.V. Improving the reliability of velocity analysis of shallow seismic data // 17th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics 2021. – Gelendzhik, 2021. – Код 171372. – DOI: 10.3997/2214-4609.202152103.

ИСТОКООБРАЗНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

А.С. Долгаль

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой компьютерной технологии трансформации аномалий силы тяжести в пределах больших территорий на примере п-ва Таймыр. На основе серии вычислительных экспериментов установлена целесообразность использования при расчетах сферы Каврайского. Проведены оценки обусловленности матриц коэффициентов систем уравнений, возникающих в процессе истокообразной аппроксимации. Реализован алгоритм Хагера для приближенного определения нормы обратной матрицы без ее вычисления в явном виде. Даны рекомендации по выбору глубин эквивалентных источников при работе с глобальными моделями гравитационного поля в высоких широтах.

Ключевые слова: гравиразведка, трансформация, сфера Каврайского, широта, долгота, эквивалентный источник, система уравнений, матрица, оценка, обусловленность.

Введение

На величину гравитационных аномалий в каждой из точек наблюдения оказывают влияние многочисленные геологические объекты, имеющие разную плотность и форму, залегающие на различных глубинах. Для решения практических задач важно осуществить такое преобразование наблюдаемого поля, которое «сфокусировало» содержащуюся в суммарном поле информацию об аномалиях, связанных с отдельными геологическими образованиями и позволило их увидеть.

В основе использования трансформаций геопотенциальных полей лежит «принцип фильтрации», формулируемый следующим образом: трансформация осуществляется с целью подавления мешающей информации и наиболее четкого выявления части полезной информации [4]. Иллюстрацией служит рис. 1, на котором показаны результаты вычисления производной V_{zz} по данным измерений силы тяжести Δg над двумя сближенными объектами.

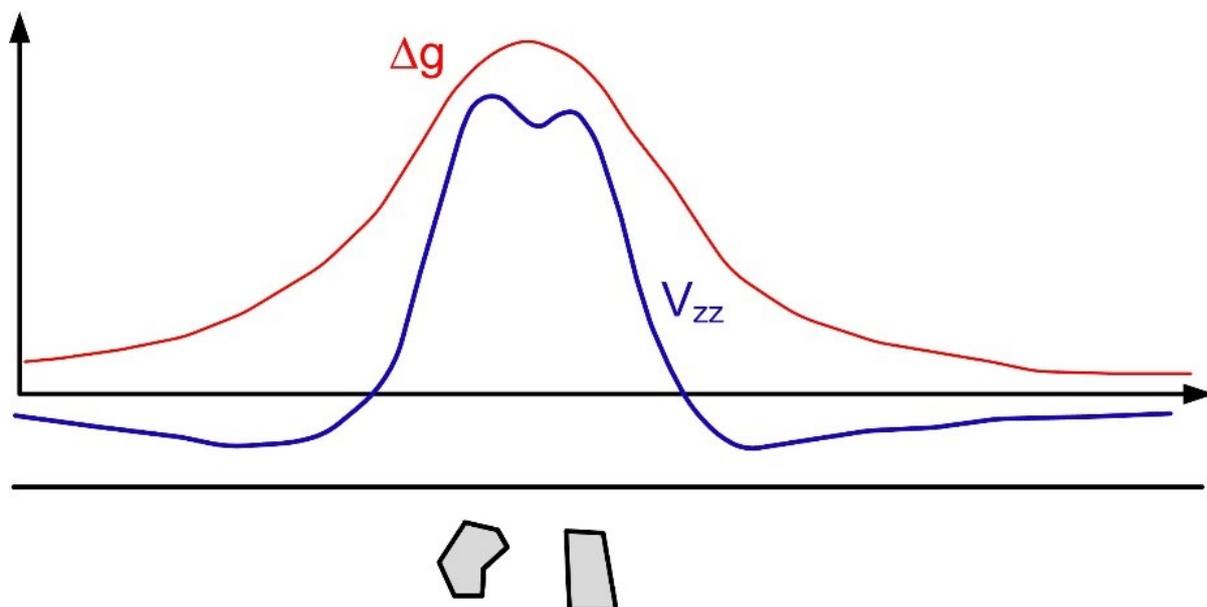


Рис. 1. Локализация аномалий от двух близко расположенных объектов путем трансформации поля силы тяжести Δg в вертикальный градиент V_{zz} (по Ю.И. Блоху)

Пусть $u(x, y)$ – некоторый элемент аномального поля (для гравиразведки обычно $u = \Delta g$), заданный на поверхности S в системе декартовых координат Σxyz . Во многих случаях принимают, что S – горизонтальная плоскость $z = 0$, но в общем случае это поверхность, описываемая уравнением $z = f(x, y)$, характеризующим рельеф земной поверхности или фактическую линию полета при аэросъемке. Трансформантой функции $u(x, y)$ называется новая функция $v(x, y, z)$, определенная на новой поверхности S^* :

$$v(x, y) = T\{u(x, y)\}, u = \Delta g \quad (1),$$

где T – некоторый оператор трансформации (например, обеспечивающий вычисление 1-й вертикальной производной поля $\partial u / \partial z$).

Трансформации могут выполняться для совокупности 2D или 3D дискретных значений поля u , являющихся результатами профильных или площадных измерений, соответственно. Выбор типа трансформации (вида функции v) определяется характером решаемой геологической задачи, объемом имеющейся априорной информации и зависит от интуиции интерпретатора.

При трансформации региональных аномалий силы тяжести, зафиксированных в пределах больших территорий, требуется учет сферообразной формы Земли. По оценкам В.Н. Страхова, речь идет о площадях с размерами от 100 км в поперечнике [12]. В этом случае могут использоваться сферическая система координат $\Sigma \varphi \lambda R$ или глобальная прямоугольная система координат ΣXYZ . Соответственно, в роли элементов гравитационного поля u будут выступать радиальная производная $V_R = \partial V / \partial R$ гравитационного потенциала V или нормальная (по отношению к земному эллипсоиду) составляющая поля $V_n = \partial V / \partial n$ [6].

Далее будем говорить о трансформации региональных аномалий с использованием наиболее эффективного подхода – истокообразной аппроксимации [1, 8]. В его основе лежит приближение наблюдаемого поля U теоретическим полем U^* , представленным в виде системы истокообразных функций. Поле U^* отвечает аномальному эффекту элементарных источников, обладающих соответствующими значениями масс. Несомненными достоинствами метода является высокая точность преобразований цифровых моделей геофизических полей, учет различий в высотах точек измерений, подавление негармонической составляющей (помехи), возможность одновременного выполнения 3D-интерполяции и трансформации данных [7]. В сферической системе координат расчет трансформант выглядит следующим образом:

$$v(\varphi, \lambda, R) = T\{u(\varphi, \lambda, R)\}, u = V_R. \quad (2)$$

В статье будет рассмотрен ряд вопросов, связанных с выбором модели Земли при моделировании региональных гравитационных аномалий и обусловленностью систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающих при определении масс эквивалентных источников.

Выбор модели Земли

Основные геометрические модели Земли в геодезии – это сфера и сфероид. Частным случаем сфероида является эллипсоид вращения с малым сжатием. Эту фигуру Земля могла бы принять, если бы находилась в состоянии гидростатического равновесия, только под влиянием сил взаимного тяготения ее частиц и центробежной силы вращения вокруг неизменной оси [9]. В 2021 г автором был предложен алгоритм трансформации аномалий силы тяжести на «квазиэллипсоидальной Земле» – сфере Каврайского,

занимающей промежуточное положение между «сферической» и «эллипсоидальной» моделями [3].

Далее будут рассмотрены экспериментальные оценки различий результатов трансформации аномалий силы тяжести для указанных выше моделей. Эквивалентными источниками во всех случаях являлись шары (точечные массы), находящиеся под точками задания поля на фиксированной глубине R^* , близкой к шагу сети цифровой GRID модели поля. Подбор масс осуществлялся путем приближенного решения СЛАУ:

$$\mathbf{Gm} = \mathbf{u}, \quad (3)$$

где \mathbf{G} – квадратная матрица значений гравитационных эффектов для точечного источника с единичной массой ($m = 1$), \mathbf{m} – вектор неизвестных значений аномальных масс, \mathbf{u} – вектор значений аномалий силы тяжести V_R или V_n .

Элементами матрицы $\mathbf{G} = \{g_{ij}\}$ для «сферической Земли» являются значения радиальной производной гравитационного потенциала точечного источника V_R , определенные в сферической системе координат:

$$V_R(R_0, \varphi_0, \lambda_0) = fm(R_0 - r \cos \omega) / r_0^3, \quad (4)$$

где $f = 6,67 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ – гравитационная постоянная; m – масса источника; $R_0, \varphi_0, \lambda_0$ – координаты точки измерений; r, φ, λ – координаты источника; $r_0 = \sqrt{R_0^2 + r^2 - 2R_0r \cos \omega}$; ω – угол при центре O земного шара между точкой измерений и источником: $\cos \omega = \cos \varphi_0 \cos \varphi + \sin \varphi_0 \sin \varphi \cos(\lambda_0 - \lambda)$.

Для «эллиптической Земли» коэффициенты СЛАУ (1) $\{g_{ij}\}$ представляют собой нормальную (по отношению к поверхности земного эллипсоида) составляющую гравитационного поля V_n , определенную в глобальной геоцентрической прямоугольной системе координат:

$$V_n(\xi, \eta, \zeta) = fm(\alpha V_X + \beta V_Y + \gamma V_Z), \quad (5)$$

где ξ, η, ζ – координаты точки измерений; X, Y, Z – координаты источника; $V_X = (\xi - X) / r^3$, $V_Y = (\eta - Y) / r^3$, $V_Z = (\zeta - Z) / r^3$ – первые производные гравитационного потенциала V по осям X, Y, Z ; $r = \sqrt{(\xi - X)^2 + (\eta - Y)^2 + (\zeta - Z)^2}$; $\alpha = \cos B \cos L$, $\beta = \cos B \sin L$, $\gamma = \sin B$ – направляющие косинусы, B – широта, L – долгота. Напомним, что геодезическая широта B точки – это угол между нормалью к поверхности земного эллипсоида в этой точке и плоскостью геодезического экватора. Геодезическая долгота L точки – это двугранный угол между ее геодезическим меридианом и Гринвичским меридианом.

Переход от геодезических координат точек задания поля к сферическому осуществляется просто:

$$\begin{cases} \varphi = \pi/2 - B, \\ \lambda = L, \\ R = R_{\text{зем}} + H, \end{cases} \quad (6)$$

где $R_{\text{зем}} = 6371,1 \text{ км}$ – радиус Земли, отвечающей по объему референц-эллипсоиду Ф.Н. Красовского, H – геодезическая высота, представляющая собой расстояние от точки до поверхности земного эллипсоида, отсчитанное по нормали к этой поверхно-

сти. В случае использования сферы Каврайского преобразование широты выглядит следующим образом:

$$\varphi = \pi/2 - B + 8'39'' \sin 2B \quad (7)$$

Для сферы Каврайского относительные погрешности в расстояниях составляют 0,08%, в угловых величинах – до 0,1% по сравнению с эллипсоидом вращения [3]. Для сферы с радиусом 6371,1 км погрешности вычисления расстояний и углов заметно выше – до 0,5% и до 0,4%, соответственно [3].

В глобальной геоцентрической системе координат ΣXYZ , начала осей которой совпадает с центром масс Земли, преобразование координат выглядит сложнее:

$$\begin{cases} X = (N + H)\cos B\cos L \\ Y = (N + H)\cos B\sin L \\ Z = [(1 - e^2)N + H]\sin B \end{cases} \quad (8)$$

где X, Y, Z – прямоугольные координаты точки; B, L, H – геодезические координаты; N – радиус кривизны первого вертикала; e – эксцентриситет эллипсоида. Радиус кривизны первого вертикала N и эксцентриситет e эллипсоида вычисляются по формулам:

$$N = a/\sqrt{1 - e^2\sin^2 B} \quad (9)$$

$$e^2 = (a^2 - b^2)/b^2 \quad (10)$$

На рис. 2 показаны «эллипсоидальная» (с полуосями a и b) и «сферическая» (с радиусом $R_{\text{зем}}$) модели Земли.

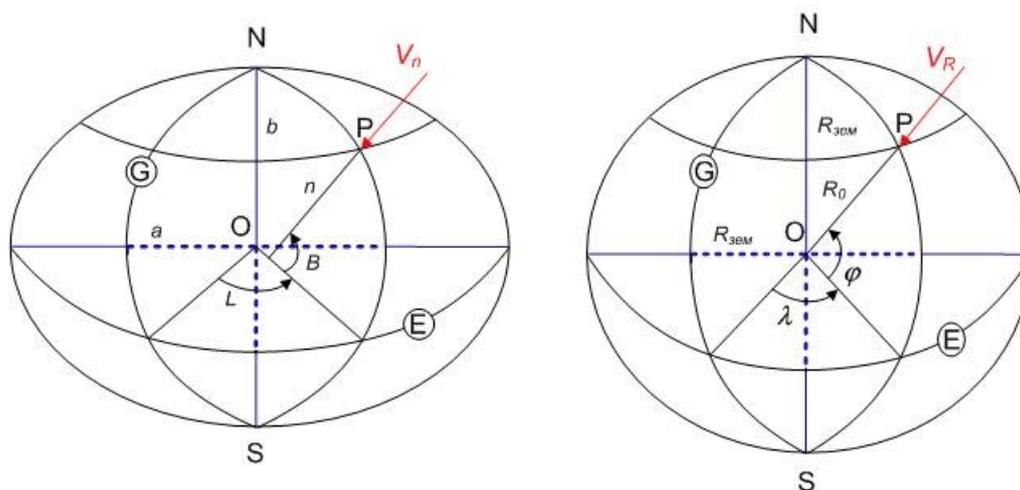


Рис. 2. «Эллипсоидальная» и «сферическая» модели Земли:
 N,S – полюса; G – плоскость Гринвичского меридиана; E – плоскость экватора;
 B – геодезическая широта; φ – геоцентрическая широта; L, λ – долгота.
 Красный цвет – вектор силы тяжести

В настоящее время широкое применение в практике геодезии, геофизики и других наук находят глобальные модели геопотенциала Земли. Более 150 моделей представлены на сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле в городе

Потсдам (ICGEM), который является одним из шести центров Международной гравитационной полевой службы Международной ассоциации геодезии. Все эти модели доступны в виде нормированных коэффициентов сферических гармоник в стандартном формате, который был принят Европейским космическим агентством (ESA – European Space Agency) в качестве официального формата данных международного космического проекта GOCE (Global Ocean Circulation Experiment). При выполнении данной работы использовалась одна из этих моделей – EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD, полученная на основе данных спутниковых миссий GRACE и SLR в 2019 г.

Для эксперимента была выбрана территория на п-ве Таймыр с координатами 68° - 76° с.ш., 84° - 108° в.д., имеющая площадь ~ 893 тыс. км². Основными населенными пунктами в ее пределах являются г. Норильск, поселки Волочанка и Хатанга. Модель поля включала в себя гравитационные аномалии в полной редукции Буге с плотностью промежуточного слоя $2,67$ г/см³, с включенными поправками за влияние топографических масс, а также за влияние атмосферных масс. Также использовалась глобальная модель рельефа земной поверхности ETOPO1. Все данные представлены в системе геодезических параметров Земли WGS84.

Сеть задания значений поля Δg и высот земной поверхности составила $12'$ по широте B и $36'$ по долготе L , т.е. расстояния s между точками по меридиану составили $\sim 22,2$ км, по параллели $\sim 25,1$ км на южной границе и $\sim 16,2$ км – на северной границе. Точки задания поля находились на поверхности Земли (нижней границе атмосферы), их число $N = 1681$. Амплитуда аномалий силы тяжести изменялись от $-107,8$ мГал до $33,5$ мГал, максимальная высотная отметка рельефа достигала 1454 м (рис. 3).

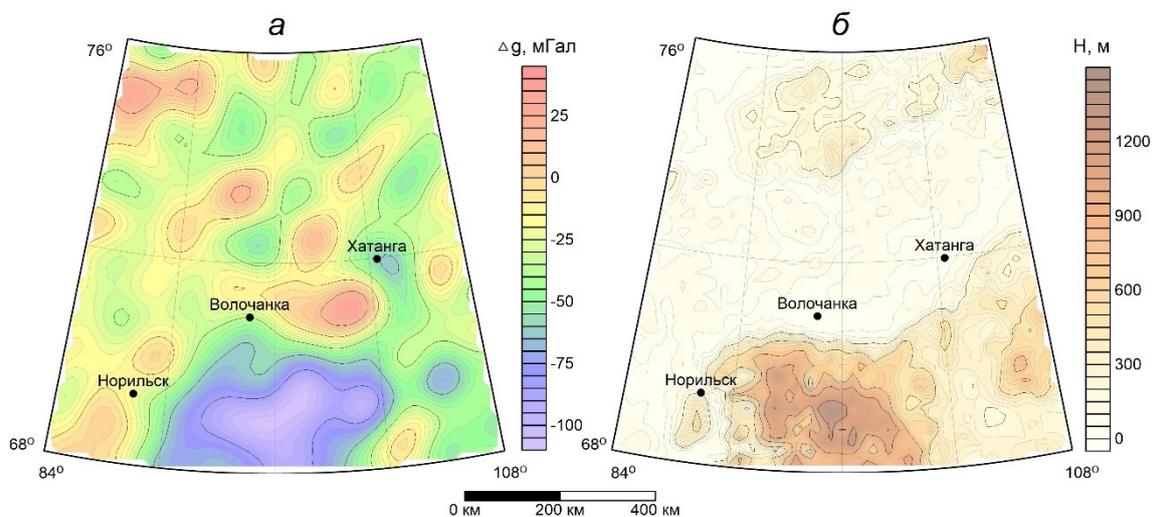


Рис. 3. Карты изоаномал силы тяжести в редукции Буге (а) и изогипс рельефа дневной поверхности (б) района исследований

Модель гравитационного поля EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD, представленная 300 сферическими гармониками, не содержит негармонических помех, поэтому представленные в ней значения поля условно можно считать точными. Для сопоставления трансформант использовался подбор исходного поля с точностью $\|U - U^*\|_{L^2} = 0,001$ мГал. Глубина эквивалентных источников $R^* = 36$ км. Решение СЛАУ (1) осуществлялось методом Зейделя при числе итераций от 56 до 59. Созданная аппроксимационная конструкция (множество векторов $\{X, Y, Z, m\}$) применялась для восстановления вторых производных силы тяжести $\partial^2 V / \partial R^2$ и $\partial^2 V / \partial n^2$ на высоте 10 км путем решения прямой задачи гравиразведки (рис. 4). Статистические характеристики полученных трансформант приведены в табл. 1.

Для всех «эллипсоидальных» моделей результаты совпали с точностью до 3-го знака после запятой. Следовательно, использование любой из представленных моделей эллипсоидов при полосовой фильтрации аномального гравитационного поля позволяет получать практически тождественные результаты. Поэтому любую из этих моделей можно взять в качестве базовой для сравнения со сферическими представлениями о Земле. В данном случае базовой моделью служил общеземной эллипсоид ПЗ-90.11, который Постановлением правительства РФ от 28 декабря 2012 г. введен в качестве единой государственной системы координат в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач. Характеристики разностных полей даны в табл. 2.

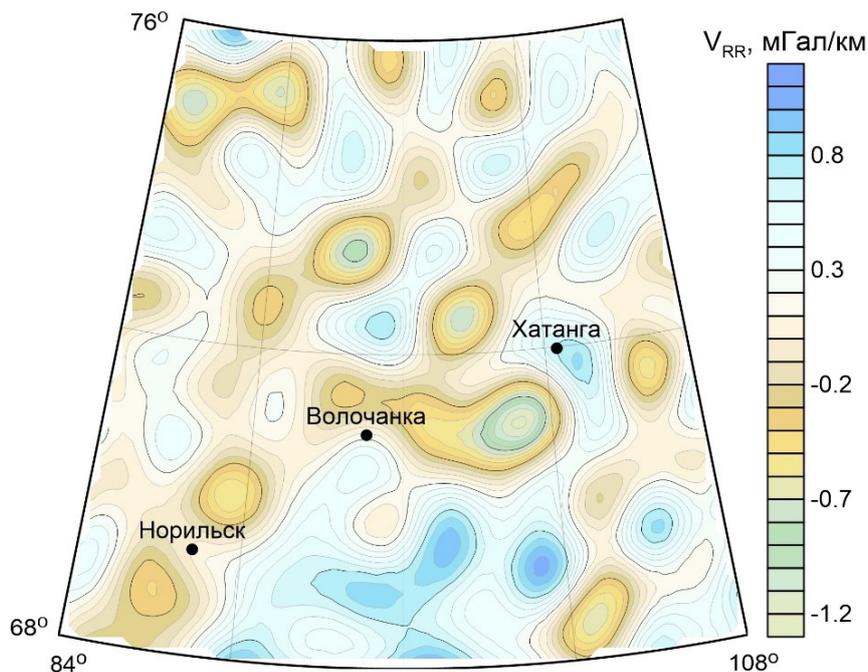


Рис. 4. Карта изолиний второй радиальной производной силы тяжести V_{RR} района исследований на сфере Каврайского

Таблица 1
Статистические характеристики вторых производных силы тяжести на высоте 10 км (п-ов Таймыр)

Модель Земли	Параметр	Статистические параметры, мГал/км			
		Минимум	Максимум	Среднее	СКО
«Сферическая Земля»	$\partial^2 V / \partial R^2$	-1,280	1,018	0,126	0,355
Сфера Каврайского	$\partial^2 V / \partial R^2$	-1,302	1,106	0,128	0,374
Эллипсоид ПЗ-90.11	$\partial^2 V / \partial n^2$	-1,303	1,106	0,128	0,374
Эллипсоид WGS-84	$\partial^2 V / \partial n^2$	-1,303	1,106	0,128	0,374
Эллипсоид GRS-80	$\partial^2 V / \partial n^2$	-1,303	1,106	0,128	0,374
Эллипсоид Красовского	$\partial^2 V / \partial n^2$	-1,303	1,106	0,128	0,374

Таблица 2

Характеристики разности δ трансформант силы тяжести на высоте 10 км

Разность δ	Статистические параметры, мГал			
	Минимум	Максимум	Среднее	СКО
$\partial^2 V / \partial R^2$ (сфера Каврайского) – $\partial^2 V / \partial R^2$ («сферическая Земля»)	-0,003	0,004	3×10^{-4}	0,001
$\partial^2 V / \partial R^2$ (сфера Каврайского) – $\partial^2 V / \partial n^2$ (эллипсоид ПЗ-90.11)	-0,0005	0,0007	4×10^{-5}	2×10^{-4}
$\partial^2 V / \partial R^2$ («Сферическая Земля») – $\partial^2 V / \partial n^2$ (эллипсоид ПЗ-90.11)	-0,003	0,003	-3×10^{-4}	0,001

Как очевидно, дисперсия разности δ для сферы Каврайского и эллипсоида ПЗ-90,11 на превышает 0,03% от дисперсии самого поля, т.е. различием $\partial^2 V / \partial R^2$ и $\partial^2 V / \partial n^2$ можно пренебречь. Для модели «сферической Земли» различия примерно на порядок выше. Следовательно, при трансформации региональных аномалий гравитационного поля достаточно выполнять расчеты на сфере Каврайского. Использование моделей «эллипсоидальной Земли» в данном случае может лишь увеличить вычислительную сложность задач, но не приведет к реальному повышению точности результатов.

Оценка обусловленности матрицы коэффициентов СЛАУ

Как правило, порядок СЛАУ (1) составляет $N = 10^4 - 10^6$, что влечет за собой использование приближенных итерационных методов для ее решения [2]. Нужно заметить, что матрица коэффициентов \mathbf{G} размером $N \times N$ имеет значительно более высокую точность (которая зависит только от ошибок округления – обычно это 7-20 значащих цифр), чем правая часть системы \mathbf{u} (включающая в себя погрешности наблюдений и редуцирования, т.е. не более 5-6 значащих цифр). Обусловленность матрицы коэффициентов СЛАУ является важнейшей характеристикой, определяющей сложность процесса ее решения и точность полученных результатов [13, 14]. Стандартное число обусловленности (H -число Тодда) матрицы \mathbf{G} :

$$\text{cond } \mathbf{G} = \nu_{\mathbf{G}} = \|\mathbf{G}^{-1}\| \|\mathbf{G}\| \quad (11)$$

определяет влияние неточностей в задании исходных данных на окончательный результат [10]. Напомним, что минимально возможная величина $\nu_{\mathbf{G}} = 1$, СЛАУ с высокими значениями $\nu_{\mathbf{G}} \gg 1$ называют плохо обусловленными.

Числа обусловленности матрицы коэффициентов часто используются как средства априорной оценки ошибок, возникающих при решении СЛАУ. Связь относительной погрешности τ решения СЛАУ с погрешностями ее правой части определяется числом $\nu_{\mathbf{G}}$:

$$\tau = \frac{\|\Delta \mathbf{m}\|}{\|\mathbf{m}\|} \leq \nu_{\mathbf{G}} \frac{\|\Delta \mathbf{u}\|}{\|\mathbf{u}\|}. \quad (12)$$

Размерность подавляющего большинства практических задач истокообразной аппроксимации такова, что формирование обратной матрицы \mathbf{G}^{-1} связано с большими вы-

числительными затратами [5]. Это существенно ограничивает возможности использования прямых вычислений чисел обусловленности по формуле (11). В статье [15] Хагер (Hager) опубликовал метод оценки числа обусловленности обратной матрицы на основе матрицы коэффициентов СЛАУ. В рамках этого подхода российскими учеными А.Н. Рогалевым, С.В. Дорониным разработано несколько алгоритмов вычисления оценки $\gamma \leq \|A^{-1}\|$ для заданной матрицы $A \in R^{N \times N}$ [11]. В одном из них для оценки $\|A^{-1}\|$ требуется последовательно решить две СЛАУ. Первая СЛАУ $A^T y = e$, где вектор e с компонентами ± 1 выбирается случайным образом. Затем решается система $Aw = y$ и $\|A^{-1}\|$ оценивается отношением $\|w\|/\|y\|$.

Сравним результаты применения этого алгоритма со стандартными значениями чисел обусловленности ν_G , полученными с помощью обращения матрицы G методом Шульца второго порядка [10]. Будем использовать те же цифровые данные по п-ву Таймыр, но с разреженной сетью значений исходных параметров: 1° по широте B и 3° по долготе L . В этом случае расстояния s между точками по меридиану составили ~ 111.1 км, по параллели $81,0 \leq s \leq 125,5$ км. Моделью Земли здесь и далее является сфера Каврайского. Рассматривались четыре варианта размещения эквивалентных источников на глубинах $R^* = 55.5, 111.1, 165.7, 222.2$ км. Для характеристики матрицы G была выбрана норма $\|G\|_1 = \max_j (\sum_i |g_{ij}|)$, согласованная с нормой $\|m\|_1 = \sum_j |m_j|$ в пространстве векторов m . Точность решения всех СЛАУ была не ниже 0,001 мГал в метрике L^2 . Результаты расчетов приведены в таблицах 3, 4.

Таблица 3

Точные и приближенные значения
нормы обратной матрицы G^{-1} (сеть $1^\circ \times 3^\circ$)

Глубина R^* , км	55,5	111,1	166,7	222,2
Точная величина $\ G^{-1}\ _1$	770,3	10258	127375	1484612
Оценка $\gamma \leq \ G^{-1}\ _1$	493,3	4838	53672	765210

Таблица 4

Характеристика обусловленности матрицы G (сеть $1^\circ \times 3^\circ$)

Глубина R^* , км	55,5	111,1	166,7	222,2
Норма $\ G\ _1$	0,0045	0,0033	0,0028	0,0024
Стандартное число ν_G	3,5	33,9	356,7	3563,1
Оценка ν_G по Хагеру	2,2	16,0	150,3	1836,5

Установлено совпадение результатов, полученных путем точного и приближенного определения чисел обусловленности ν_G матрицы G , достаточное для априорной оценки сложности решения СЛАУ (1). Отмечается закономерное увеличение чисел обусловленности ν_G с ростом относительных глубин R^* . Влияние величины ν_G на процесс решения СЛАУ будет продемонстрировано ниже.

Выполним оценку обусловленности матриц коэффициентов по Хагеру с использованием всех имеющихся цифровых данных, т.е. при увеличенной в 5 раз плотности сети точек. Размер матрицы G в этом случае составляет 1681×1681 (табл. 5). Отношения

глубины источников к шагу сети задания поля по меридиану сохранялись прежними: 0.5s, 1s, 1.5s, 2s.

Таблица 5

Характеристика обусловленности матрицы G (сеть 0,2°×0,6°)

Глубина R^* , км	11,1	22,2	33,3	44,4
Норма $\ G\ _1$	0,1248	0,1030	0,0982	0,0945
Оценка $\gamma \leq \ G^{-1}\ _1$	19,8	196	2395	31481
Оценка ν_G по Хагеру	2,5	20,2	235,2	2975
Число итераций k	10	22	37	165

Как очевидно, тенденция к росту значений ν_G с увеличением параметра R^* сохраняется. По мере приближения матрицы коэффициентов к вырожденной возрастает число итераций k в методе Зейделя, необходимых для достижения невязки ~0,001 мГал. Сравнение табл. 4 и 5 свидетельствует о некотором ухудшении обусловленности СЛАУ (1) при увеличении размерности решаемых задач.

Заключение

Модель «квазиэллипсоидальной Земли» (сфера Каврайского) позволяет осуществлять высокоточный расчет трансформант аномального гравитационного поля с использованием системы точечных масс и геодезических координат B, L точек задания поля. Адекватность этой модели подтверждается результатами экспериментального сопоставления вторых производных $\partial^2 V / \partial R^2$ и $\partial^2 V / \partial n^2$ гравитационного потенциала на высоте 10 км. Основные вычислительные сложности при трансформации связаны с решением СЛАУ большой размерности ($N = 10^4 - 10^6$) итерационными методами. Точность и скорость решения систем уравнений зависят от их обусловленности.

Выполнены оценки обусловленности матриц G коэффициентов СЛАУ при разных глубинах размещения эквивалентных источников при аппроксимации аномалий силы тяжести на территории п-ва Таймыр (68°-76° с.ш., 84°-108° в.д.). При вычислении чисел обусловленности $\nu_G = \|G\|_1 \|G^{-1}\|_1$ использовались обращение матрицы G методом Шульца и алгоритм Хагера. Последний представляет собой эффективный метод приближенного определения нормы $\|G^{-1}\|_1$ без вычисления обратной матрицы в явном виде. Он может применяться к задачам большой размерности, т.к. затраты машинного времени являются сопоставимыми с удвоенным временем приближенного решения СЛАУ (1) при тех же цифровых данных.

Отмечается увеличение ν_G для цифровой модели аномального гравитационного поля при погружении источников на глубину R^* , превышающую длину s шага сети по меридиану. Это увеличение существенно сказывается, в первую очередь, на точности и скорости приближенного решения СЛАУ итерационными методами. Поэтому в условиях высоких (от 60°) при формировании аппроксимационной конструкции желательно приближенное равенство между R^* и расстояниями s между точками задания поля по широте и долготе. Выбор одинакового шага $\Delta B = \Delta L$ в градусной мере не рекомендуется.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 23-27-00113.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аронов В.И. Методы построения карт геолого-геофизических признаков и геометризация залежей нефти и газа на ЭВМ. – М.: Недра, 1990. – 301 с.
2. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – 8-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. – 622 с.: ил.
3. Воздушная навигация: справочник / [Белкин А.М. и др.]. – М.: Транспорт, 1988. – 303 с.
4. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий: учеб. пособие. – 2009. – 232 с. – Текст электронный. – URL: <http://sigma3d.com/index.php/publications/books> (Дата обращения 14.02.2022 г.).
5. Долгаль А.С. Оценка влияния формы поверхности измерений в методе истокообразной аппроксимации геопотенциальных полей // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 49-57. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.10.
6. Долгаль А.С., Костицын В.И., Пугин А.В., Хохлова В.В. Выбор модели Земли для трансформации аномалий силы тяжести в процессе региональных исследований // Геофизика. – 2022. – № 5. – С. 6-12.
7. Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В. Алгоритмы аппроксимации геопотенциальных полей истокообразными функциями // Геофизика. – 2016. – № 5. – С. 4-10.
8. Долгаль А.С., Пугин А.В., Новикова П.Н. История метода истокообразных аппроксимаций геопотенциальных полей // Физика Земли. – 2022. – № 2. – С. 3-26. – DOI: 10.31857/S0002333722020028.
9. Кауфман А.А., Хансен Р. Принципы метода гравиметрии: Пер. с англ. В.А. Ефремова, Т.А. Тимакиной. – Тверь: Междунар. Ассоц. «АИС», 2011. – 376 с.
10. Математический форум Math Help Planet. – Текст электронный. – URL: <http://mathhelpplanet.com/static.php?p=iteratsionnyi-metod-shultsa-nakhozheniya-obratnoi-matritsy> (Дата обращения 2.02.2023 г.)
11. Рогалев А.Н., Доронин С.В. Использование критериев обусловленности при численных расчетах напряженного состояния силовых конструкций // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 2 (30). – С. 91-99.
12. Страхов В.Н., Керимов И.А., Степанова И.Э. Разработка теории и компьютерной технологии построения линейных аналитических аппроксимаций гравитационных и магнитных полей. – М.: ИФЗ РАН, 2009. – 254 с.: ил.
13. Фадеев Д.К. Об обусловленности матриц // Труды математического института АН СССР. – 1959. – Т. 53. – С. 387-391.
14. Цей Р., Шумафов М.М. Число обусловленности матрицы как показатель устойчивости при решении прикладных задач // Труды ФОРА. – 2011. – № 16. – С. 61–67.
15. Hager W.W. Condition estimates // SIAM Journal on scientific and statistical computing. – 1984. – V. 5, № 2. – P. 311-316.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2023.1.12

**ЛОКАЛИЗАЦИЯ ГОРИЗОНТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ
В НАДСОЛЕВОЙ ТОЛЩЕ ПОРОД МЕТОДОМ СОПРОТИВЛЕНИЙ
С ЦЕЛЬЮ ЗАКАЧКИ ИЗБЫТОЧНЫХ РАССОЛОВ**

Е.С. Зубрикова, М.С. Лучников
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. В работе представлены результаты электроразведочных работ, направленные на поиск и локализацию горизонтов-коллекторов, с целью закачки избыточных рассолов. Для выделения разуплотненных участков пониженных удельных сопротивлений проведен расчет суммарной продольной проводимости.

Ключевые слова: электроразведка, избыточные рассолы, горизонт-коллектор, удельное электрическое сопротивление, суммарная продольная проводимость.

Избыточные рассолы калийных предприятий являются жидкими отходами, получаемыми при производстве калийных удобрений. Классически проблема утилизации жидких отходов во всем мире решается строительством шламонакопителей. С ростом производства и накоплением отходов таких сооружений требуется все больше. Накопление избыточных рассолов в шламохранилищах исчисляется миллионами кубических метров в год. Для того чтобы сократить количество шламохранилищ и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду современные компании прорабатывают возможность безопасно размещать и утилизировать избыточные рассолы в подземных горизонтах. Для локализации горизонтов-коллекторов в пределах горного отвода был проведен геофизический комплекс работ.

На участке работ (рис. 1) ранее был выполнен ряд геолого-геофизических исследований, включающий как наземные сейсморазведочные и электроразведочные исследования, солеразведочное бурение с проведенным комплексом ГИС, так и структурно-тектонический анализ состояния водозащитной толщи.

Участок работ расположен в восточной краевой полосе южной части Верхнекамского месторождения. С запада и с севера от исследуемого участка расположены Дурыманский и Быгельско-Троицкий участки детальной разведки, на востоке – граница месторождения, с юга – Сибирское месторождение нефти [2]. Разведка данного участка началась с 1968 года [3]. На данный момент в пределах исследуемого участка пройдено 63 скважины, из них 42 – разведочных, 11 структурных, 7 гидрогеологических и 4 скважины под задачи картирования и съемку поверхности.

Электроразведочные работы на исследуемой площади выполнены методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [1]. В качестве рабочей применялась симметричная четырехэлектродная установка Шлюмберже, в которой расстояние между питающими электродами и центром измерительной установки последовательно увеличивалось с прогрессией 1,25. Максимальный разнос питающей линии (АВ) составлял 1000 м. Шаг по профилю составлял 40 м.

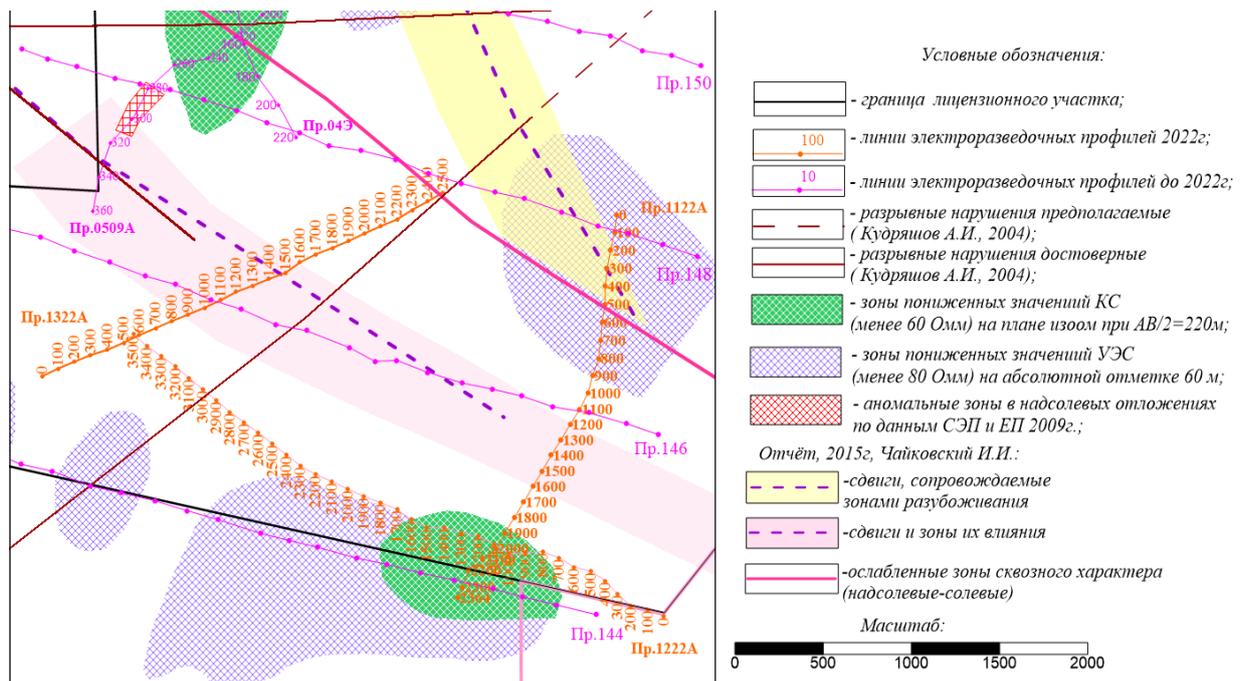


Рис. 1. Схема расположения электроразведочных профилей

Сопоставление результатов количественной интерпретации параметрических ВЭЗ, расположенных вблизи скважин, с данными бурения указывает, что в результатах интерпретации находят отображение практически все основные комплексы пород, включая четвертичные отложения, ПЦТ, ТКТ, СМТ, ПП+ПКС. Граница кровли опорного электрического горизонта относится как к кровле переходной пачки (ПП), так и к кровле покровной каменной соли (ПКС). Условно опорный электрический горизонт отождествляется с кровлей нерасчлененной толщи ПП+ПКС.

Для качественной характеристики электрических свойств надсоляного комплекса и опорного электрического горизонта, отождествляемого с кровлей нерасчлененной пачки ПП+ПКС, построены соответствующие схемы изоом кажущихся сопротивлений для полуразносов питающей линии 220 и 400 метров, представленных на рисунке 2.

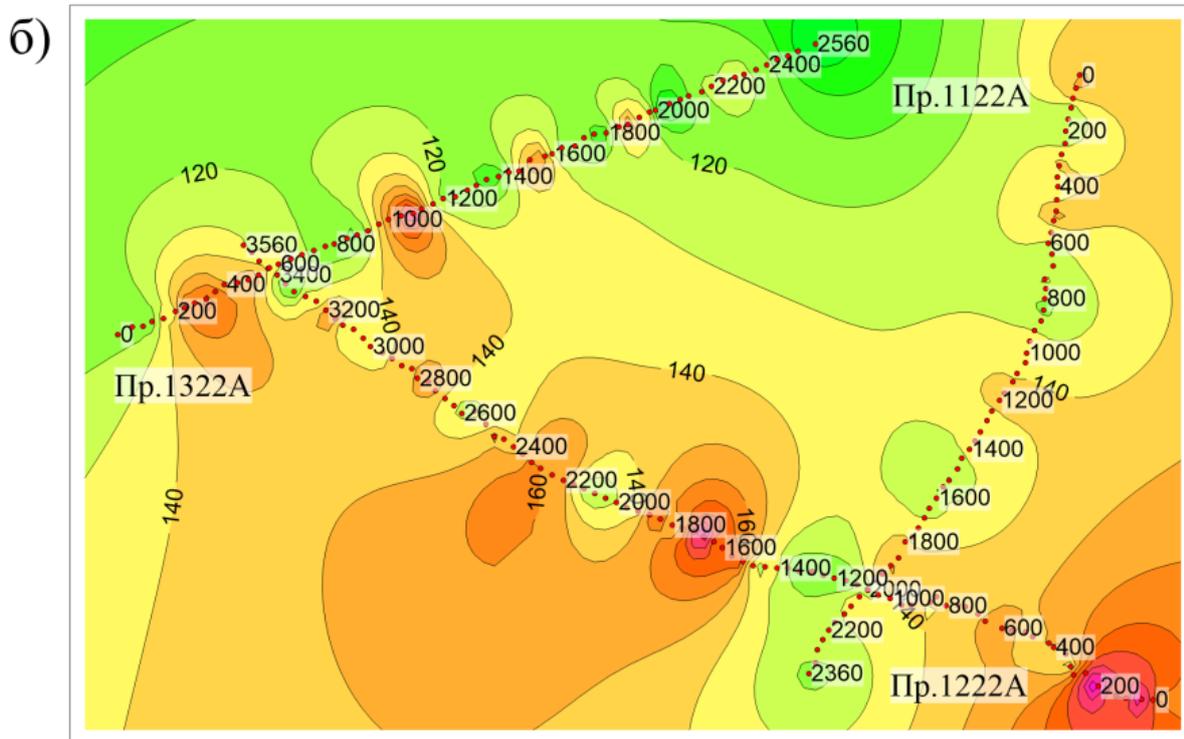
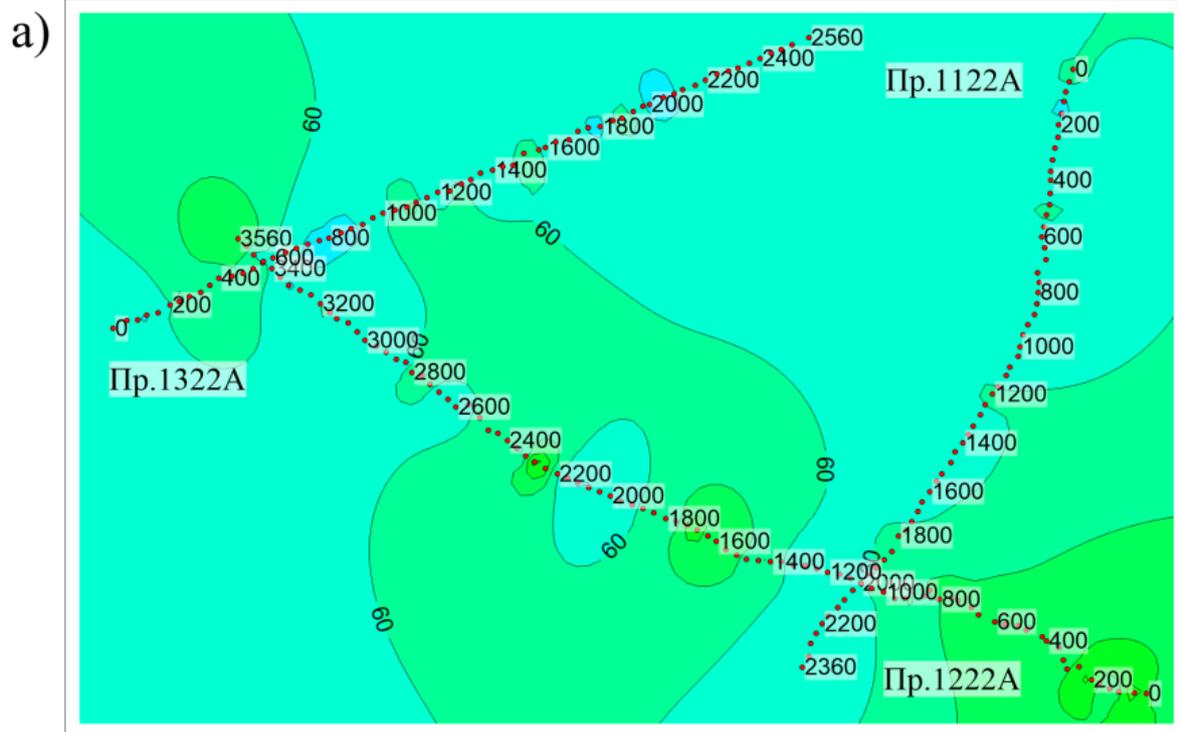
На схеме изоом КС для $AB/2 = 200\text{м}$ (рис. 2а) поле спокойное, на большей части участка изменяется в пределах 50-70 Ом*м. Встречаются локальные зоны пониженных сопротивлений (ПР 1322А – ПК 680-840 м; ПК 1900 – 2200 м). Обращает на себя внимание «рукав» по изолинии 60 Ом*м в районе пересечения профилей 11 и 12, т.к. в этом же месте прослеживается зона пониженных сопротивлений и на схеме КС для $AB/2 = 400\text{м}$. Кажущиеся сопротивления на схеме для $AB/2 = 400\text{м}$ (рис. 4б) изменяются от 70 до 240 Ом*м. Зона пониженных КС (меньше 100 Ом*м) выделяется на северо-восточном окончании профиля 1322А. Это обусловлено пониженными значениями УЭС в СМТ и кровле опорного электрического горизонта. Это отмечено ниже при описании результатов интерпретации по данному профилю. Зона высоких КС выделена в начале профиля 1222А ПК 0-400м.

Профиль 1222А простирается в субширотном направлении с востока на запад. Рельеф осложнен двумя логами, русла которых приурочены к пикетам 240 м в восточной части и к пикету 1660 м в центре профиля. В районе этих логов наблюдается осложнение поля кажущихся сопротивлений.

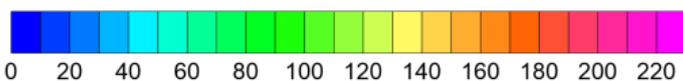
Количественная интерпретация проводилась с помощью программ IPI-1D и IPI2Win [5]. Как видно из геоэлектрического разреза УЭС (рис. 3б, в) в ТКТ на востоке меньше, чем в центральной, а на западе имеет мозаичный характер. В восточной части профиля ПК 0-360 м сопротивление в СМТ повышенное – 190-240 Ом*м. На остальном интервале профиля УЭС изменяется от 70 до 140 Ом*м. В опорном электрическом горизонте выделяется три зоны пониженных (менее 1000 Ом*м) УЭС в интервалах 200-500, 1366-1600 и 2080-2440 метров.

Для выделения разуплотненных участков пониженных удельных сопротивлений (повышенной электропроводности) по профилям, которые, как отмечено выше, и соответствуют породам с повышенными коллекторскими свойствами, нами рассчитаны значения суммарной продольной проводимости для средней части СМТ (рис. 3г).

По архивным данным (Беляев, 1989 г.) аномально низкими сопротивлениями для данной абсолютной отметки 60 метров считается УЭС ниже 80 Ом*м. Если с «запасом» принять значение ниже 75 Ом*м, то в пересчете на суммарную продольную проводимость [4] разуплотненным зонам соответствуют участки профиля с проводимостью более 2,3 См/м. Исходя из этого, по данным электроразведки выделяются зоны разуплотнения в СМТ по профилю 1222А – интервалы ПК: 840-1360 м; 1840-2280 м; 2800-3400м. Аналогичным образом суммарная продольная проводимость была рассчитана для других профилей.



Шкала кажущегося сопротивления, Ом*м



Масштаб, м



- электроразведочные профили 2022г.;



- солеразведочные скважины.

Рис. 2. Схемы изоом кажущихся сопротивлений а) $AB/2 = 200$ м, б) $AB/2 = 400$ м

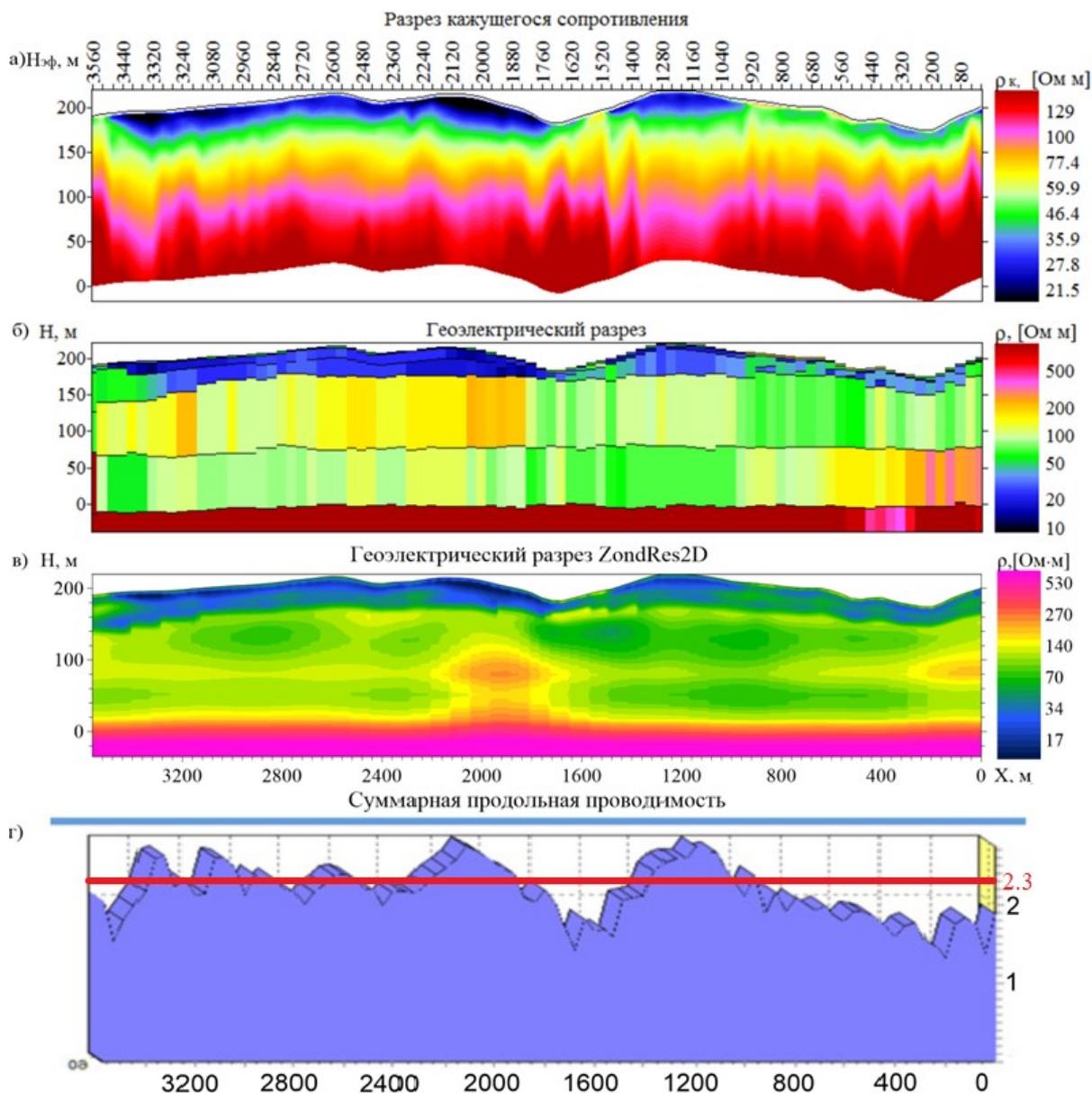


Рис. 3. Разрез кажущегося сопротивления (а), геоэлектрические разрезы (б, в), суммарная продольная проводимость на абсолютной отметке 60 м по профилю 1222А

По результатам комплексной интерпретации всех данных была построена сводная схема полученных результатов (рис. 4). Таким образом, в пределах пикетов 1500-2100 профиля 1222А наблюдается:

- совпадение аномальных зон в СМТ, выделяемых по всем геофизическим данным разных лет и характеризующих повышенные коллекторские свойства разреза;
- повышенная мощность верхней части коллектора (выше реперного пласта гипсов), на основании чего можно предположить и потенциальное увеличение резервуара для закачки;
- повышенная прочность подстилающих коллектор отложений.

Анализ геолого-геофизической информации прошлых лет и комплексная интерпретация результатов сейсмо- и электроразведочных работ позволяет выделить в качестве наиболее перспективного для закачки рассолов участок в пределах пикетов 1500-2100 профиля 1222А.

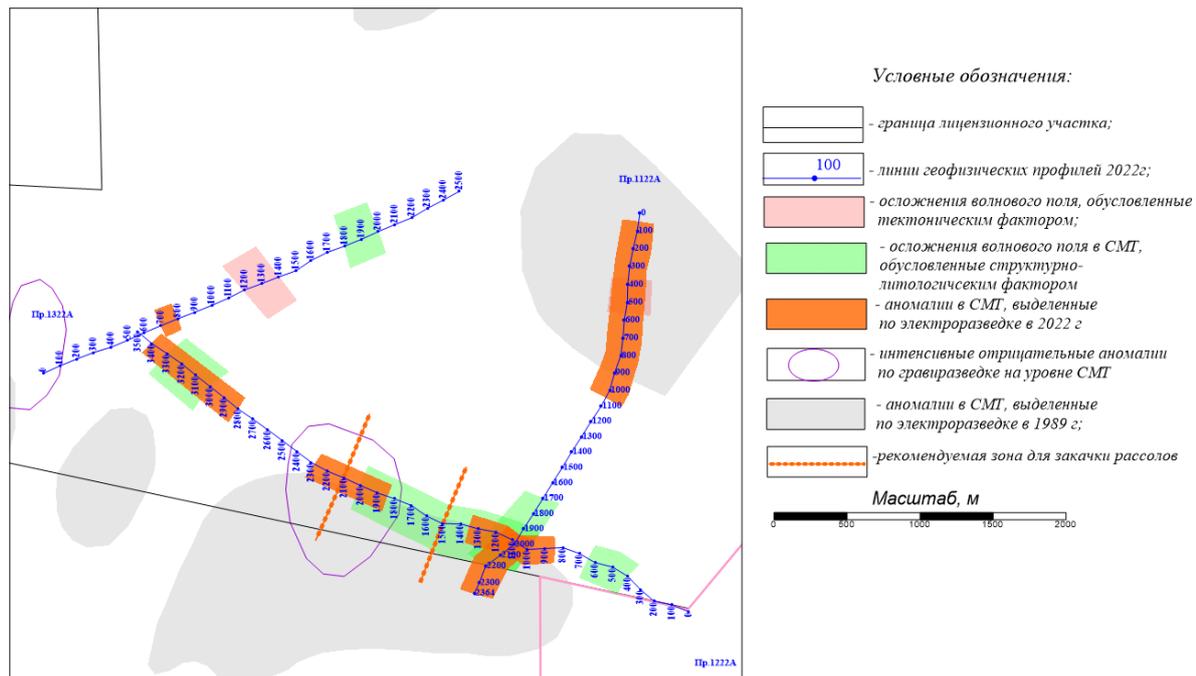


Рис. 4. Результаты комплексной интерпретации геофизических данных

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ № 122012000398-0.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований / ГИ УрО РАН. – М.: Науч. мир, 2007. – 247 с.
2. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
3. Лучников М.С. Изучение электрических свойств надсолевых отложений на Восточно-Талицком участке ВКМКС // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 62-67. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.14.
4. Матвеев Б.К. Электроразведка. – М.: Недра, 1990. – 368 с.: ил.
5. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion 1 // Geophysical Prospecting. – 1996. – V. 44, № 3. – P.499-523.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2023.1.13

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА СКОПЛЕНИЯ СВОБОДНОГО МЕТАНА В ТРЕЩИННОМ КОЛЛЕКТОРЕ ПО ДАННЫМ ПЕТРОФИЗИКИ УГЛЕНОСНЫХ ФОРМАЦИЙ

Л.А. Иванов, В.В. Туманов

*Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ)
Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики (Донецк)*

Аннотация: Использование прогрессивных геоэлектрических технологий для выявления скоплений свободного метана весьма актуально, так как с этими скоплениями связана аварийность и гибель людей на угольных шахтах. Незначительные размеры и слабая геоэлектрическая контрастность данных

скопления создают неблагоприятные условия для использования методов электромагнитного зондирования. Улучшить данные условия позволяют априорные геоэлектрические разрезы, характеризующиеся максимальной адекватностью реальному геологическому разрезу. Показан путь построения адекватных геоэлектрических разрезов, заключающийся в использовании петрофизического разреза, естественной стратификации геологического разреза на литолого-стратиграфические пачки, учета латерального изменения состава данных пачек, влияния трещинообразования и газонасыщенности на удельное электрическое сопротивление пород.

Ключевые слова: геоэлектрический разрез, петрофизика угольных формаций, скопления метана на угольных шахтах.

Введение

Скопление свободного метана на угольных шахтах представляет собой весьма опасное природное образование, поскольку неожиданное вскрытие его горными выработками приводит к авариям и гибели шахтеров. Поэтому обнаружение данных скоплений остается актуальным вопросом, перспективы решения которого связаны с использованием современных геофизических технологий.

К числу современных относятся методы активного и пассивного электромагнитного зондирования. Лучшим примером активного зондирования является метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), пассивного метода – аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТЗ). Применение данных методов предполагает использование в качестве основы интерпретации геоэлектрического разреза, представляющего собой вертикальную последовательность пачек (крупных слоев), характеризующихся мощностью и удельным электрическим сопротивлением (УЭС) [1, 2]. При этом весьма важным моментом исследования является решение вопроса адекватности априорного разреза его реальному эквиваленту.

Целью исследований является обоснование петрофизического подхода к построению априорного геоэлектрического разреза скопления свободного метана в трещинном коллекторе.

Методика исследований

Методика исследований заключается в решении следующих задач:

- определение наиболее точных значений УЭС пород по фондовым материалам;
- расчленение разреза на литолого-стратиграфические пачки;
- определение УЭС пачек до и после образования скопления метана.

УЭС пород достаточно просто определяется путем количественной интерпретации данных потенциал-зонда метода кажущихся сопротивлений или бокового каротажа по скважине, пройденной на исследуемом участке. При этом для пересчета кажущегося сопротивления в истинное значение необходимы дополнительные данные по УЭС бурового раствора и фактическому диаметру скважины. Однако фондовые материалы «Дела скважины» часто характеризуются потерей геофизических диаграмм, их плохой сохранностью, отсутствием данных по буровому раствору и диаметру скважины.

Поэтому для определения УЭС пород используется петрофизический подход, заключающийся в «посадке» петрофизического разреза на геологический разрез исследуемого участка. Петрофизические разрезы построены ранее для различных геологических объектов: в целом для Донбасса, угленосных районов, отдельных месторождений и глубоких скважин [3]. Посадка выполняется путем совмещения зон метаморфизма углей геологического и петрофизического разрезов. В результате получается петрофизический разрез исследуемого участка. Достоверность построения этого разреза контролируется по коэффициенту общей пористости пород и скорости распространения продольных упругих волн, полученной по данным акустического каротажа. Значения коэффициента пористости и скорости упругих волн петрофизического и геологического разрезов должны совпадать.

При выделении литолого-стратиграфических пачек используется свойство разреза образовывать ассоциации пород при заданной величине минимальной мощности пачки. В нашем случае она составляет 30 м. Пачкой определенного литологического типа считается последовательность слоев, удовлетворяющая двум требованиям: содержанию слоев данного типа более 50%; отсутствию перерыва мощностью более 30 м, состоящего из пород иного типа. К основным типам пород относятся песчаники, алевролиты и аргиллиты. Поэтому разрез расчленяется на песчаниковые, алевролитовые, аргиллитовые и смешанные пачки. Маломощные известняки и угли не образуют самостоятельных литолого-стратиграфических пачек мощностью более 30 м.

УЭС пачек рассчитывается как обратная величина средневзвешенной электропроводимости слоев пород по их мощности. В УЭС пачек, содержащих скопления свободного метана, вносится поправка за трещинообразование и газонасыщенность пород. Трещинообразование приводит к уменьшению УЭС водонасыщенных пород, газонасыщенность – к увеличению их УЭС. Большее воздействие оказывает газонасыщенность, поэтому совместное влияние трещиноватости и газонасыщенности заключается в увеличении УЭС. По данным ЗСБ величина УЭС трещиноватого углепородного массива на средних стадиях метаморфизма углей увеличивается примерно в 2 раза [4].

На завершающем этапе проверяется достоверность выделения пачек по УЭС. В качестве критерия используется отличие пачки от перекрывающей и подстилающей пачки на величину, не меньшую двукратной погрешности определения параметра геофизическим методом.

Построение геоэлектрического разреза выполнено на примере висячего крыла Григорьевского надвига вблизи границы шахт им. А.Ф. Засядько и «Щегловская-Глубокая» Донецкого каменноугольного бассейна. Следует отметить, что данный надвиг располагается в зоне динамического влияния Волновахско-Кадиевского глубинного разлома и характеризуется газопроявлениями в разведочных скважинах, положительными аномалиями газонасыщенности угольных пластов и плотности теплового потока, изотопным составом углерода метана углей и проявлениями ацетилена, указывающими на глубинный источник газа [5-7].

Результаты исследований

Построение геоэлектрического разреза скопления свободного метана является результатом использования и преобразования промежуточных конструкций: петроэлектрического разреза, геологического разреза и геоэлектрического разреза ненарушенных водонасыщенных пород.

Петроэлектрический разрез (ПЭР) является сокращенным вариантом петрофизического разреза [3]. Он отражает непрерывное изменение физических свойств однотипных пород по разрезу месторождения, обусловленное их катагенезом и литологической принадлежностью (рис. 1).

Данный разрез вскрывает зоны метаморфизма углей и катагенеза пород от 2Г до 6ОС. Наиболее распространенными типами пород разреза, как в и целом в Донбассе, являются песчаники, алевролиты и аргиллиты. Об их однотипности свидетельствует постоянная величина минералогической плотности на геоэлектрическом разрезе.

Синтетическим петрофизическим параметром, определяющим изменение других физических свойств однотипных пород, является коэффициент общей пористости (K_n). Сверху вниз по ПЭР от стадии 2Г до 6ОС параметр K_n заметно уменьшается от 5,2-9,4% до 3,0-3,3%. Данное уменьшение пористости приводит к существенному уве-

личению параметра $\rho_{п}$ от 30-60 Ом·м до 60-180 Ом·м. При этом большими значениями параметров $K_{п}$ и $\rho_{п}$ характеризуются песчаники, меньшими значениями – аргиллиты.

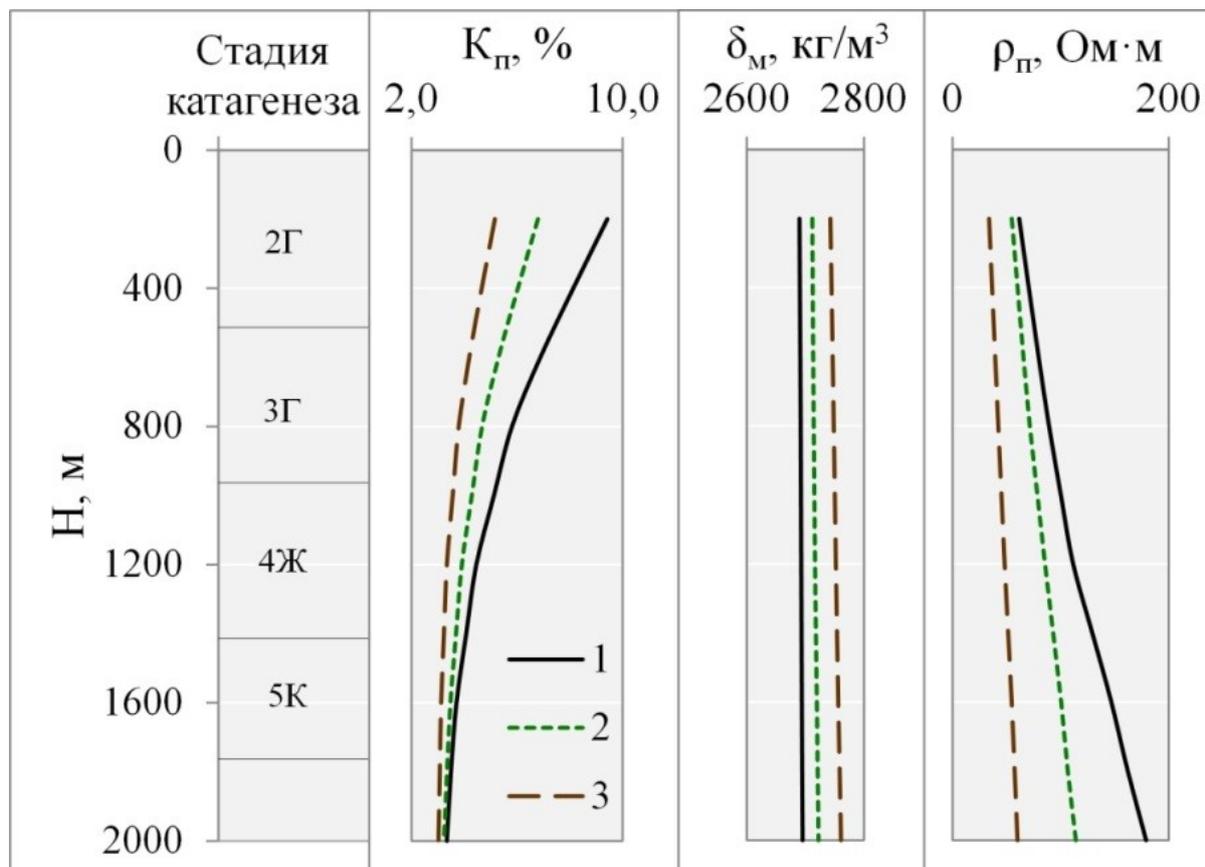


Рис. 1. Петроэлектрический разрез: $K_{п}$ – коэффициент общей пористости; δ_m – минералогическая плотность пород; $\rho_{п}$ – удельное электрическое сопротивление пород; 1 – песчаник мелкозернистый с глинистым цементом; 2 – алевролит с глинистым цементом; 3 – аргиллит

Существенной особенностью данного ПЭР является то, что на глубине около 1000 м параметр $K_{п}$ песчаников уменьшается и становится равным 5%. В результате начиная с указанной глубины и ниже по разрезу исчезают коллекторы гранулярного типа. Однако за счет увеличения хрупкости пород, обусловленной катагенезом, и проявления тектонического трещинообразования вблизи разломов создаются благоприятные условия для возникновения коллекторов трещинного типа, отличающихся высокой проницаемостью.

Геоэлектрический разрез (ГЭР) ненарушенных водонасыщенных пород, в отличие от ПЭР, отражает дискретное изменение физических свойств пачек, т.е. так, как их «видят» методы геофизических зондирований. Для литолого-стратиграфического расчленения разреза на пачки мощностью более 30 м использовался геологический разрез рядом расположенной углеразведочной скважины (рис. 2).

ГЭР отражает изменение содержания песчаников, алевролитов и аргиллитов, а также коэффициента общей пористости песчаников ($K_{п}$) и УЭС 19 пачек. Разрез характеризуется крайне неравномерным распространением песчаниковых пачек и относительно равномерным распределением аргиллитовых пачек. Песчаниковые пачки залегают на глубине 100, 200 и 1000 м. Данные пачки образуют положительные аномалии по УЭС. Особенно резко выделяется пачка на глубине 1000 м. Ее УЭС (100 Ом·м) в два раза превышает УЭС перекрывающей и подстилающей пачки.

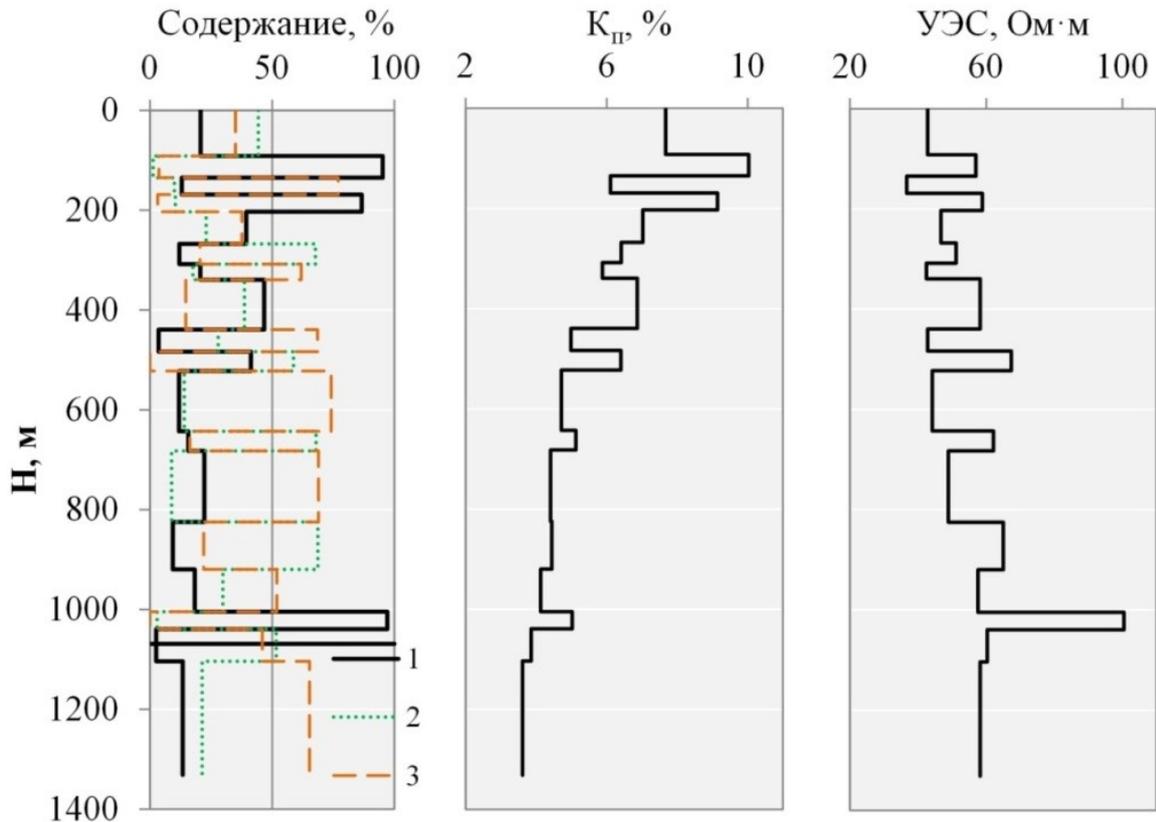


Рис. 2. Геоэлектрический разрез ненарушенных водонасыщенных пород: 1 – содержание песчаников; 2 – содержание алевролитов; 3 – содержание аргиллитов; K_p – коэффициент общей пористости песчаников; УЭС – удельное электрическое сопротивление пачки; H – глубина

Геоэлектрический разрез со скоплением свободного метана (ГЭРС) представляет собой фрагмент предыдущего геоэлектрического разреза, состоящий из четырех пачек, из которых две средние пачки подвержены трещинообразованию и смене водного флюида газовым, что соответствует условию скопления метана в трещинном коллекторе (Рис. 3).

На ГЭРС приведены те же показатели литологического состава пачек и параметр УЭС, что на ГЭР, а также дополнительно введен коэффициент $K_{УЭС}$.

Коэффициент $K_{УЭС}$ представляют собой отношение УЭС трещиноватых газонасыщенных пород к нетрещиноватым водонасыщенным породам:

$$K_{УЭС} = \frac{УЭС_{тгп}}{УЭС_{вп}}, \quad (1)$$

где $УЭС_{тгп}$ – удельное электрическое сопротивление пачки трещиноватых газонасыщенных пород; $УЭС_{вп}$ – удельное электрическое сопротивление пачки нетрещиноватых водонасыщенных пород.

Особенность данного коэффициента заключается в его конструкции. В данном коэффициенте, чтобы отразить влияния трещиноватости и газонасыщенности на УЭС пачки, за основу берется УЭС этой же пачки, но при условии, что она водонасыщенная. Аналогичный прием используется в нефтегазовой петрофизике при расчете параметра насыщения коллектора газом (нефтью) по данным электрических методов геофизических исследований скважин [8]. При этом УЭС водонасыщенных пород определяется по другой скважине, расположенной за контуром газонасыщенности, либо находится рас-

четным путем. В нашем случае УЭС водонасыщенных пород определяется по петрофизическим зависимостям, учитывающим тип породы, степень катагенеза, температуру и минерализацию пластовых вод [4].

Охарактеризуем пачки сверху вниз по ГЭРс.

1. Аргиллитовая пачка. По литологическому составу она неоднородная. Содержит 18% песчаников, 30% алевролитов и 52% аргиллитов. Пачка нетрещиноватая и водонасыщенная. Параметр УЭС составляет 58 Ом·м. Коэффициент $K_{УЭС}$ равен 1,0 отн. ед. и свидетельствует о водонасыщенном состоянии пород. Залегает в интервале глубин от 920 до 1005 м. Мощность пачки равна 85 м.

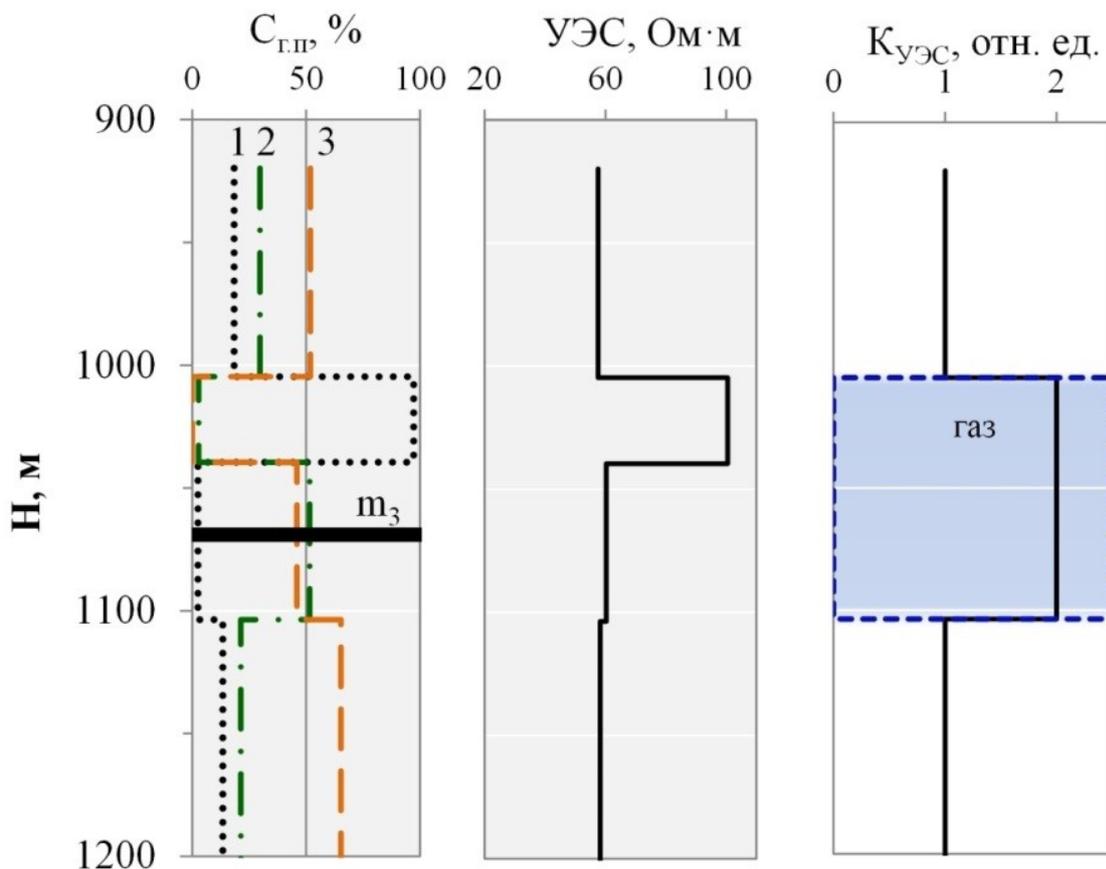


Рис. 3. Геоэлектрический разрез скопления свободного метана в трещинном коллекторе: УЭС – удельное электрическое сопротивление пачки; $K_{УЭС}$ – коэффициент изменения УЭС; $C_{гл.}$ – содержание горных пород в пачке; 1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – аргиллиты; m_3 – синонимика целевого угольного пласта; Н – глубина; «газ» – газонасыщенное состояние пачки

2. Песчаниковая пачка. В ней содержание песчаников весьма высокое и составляет 97%, алевролитов – всего лишь 3%. Пачка трещиноватая и газонасыщенная. В водонасыщенном состоянии параметр УЭС равен 100 Ом·м. Газонасыщение увеличивает параметр УЭС и поэтому коэффициент $K_{УЭС}$ составляет около 2 отн. ед. Пачка залегаєт в интервале глубин от 1005 до 1040 м. Ее мощность равна 35 м.

3. Алевролитовая пачка. По литологическому составу она приближается к аргиллитовой пачке, поскольку содержание алевролитов и аргиллитов соответственно равно 52 и 46%, песчаников – всего 2%. Пачка трещиноватая и газонасыщенная. В водонасыщенном состоянии ее параметр УЭС составляет 60 Ом·м. В результате газонасыщения параметры УЭС увеличивается и коэффициент увеличения $K_{УЭС}$ составляет около 2 отн. ед. Пачка содержит целевой угольный пласт m_3 . Она залегаєт в интервале глубин от 1040 до 1105 м. Мощность пачки составляет 65 м.

4. Аргиллитовая пачка. Содержит 13% песчаников, 21% алевролитов и 66% аргиллитов. Пачка нетрещиноватая и водонасыщенная. Параметр УЭС составляет 58 Ом·м, коэффициент $K_{УЭС}$ равен около 1 отн. ед. Пачка залегает в интервале глубин от 1105 до 1330 м. Ее мощность равна 225 м.

Анализ ГЭРс показывает, что песчаниковые и алевролитовые пачки, представляющие собой трещиноватый коллектор свободного метана, уверенно выделяются по увеличению УЭС относительно пачек водонасыщенных нетрещиноватых пород эквивалентного состава и степени катагенеза. При этом увеличение УЭС оценивается величиной в 2 раза.

Обсуждение результатов исследований

Построение геоэлектрического разреза скопления свободного метана в трещинном коллекторе угленосных отложений выполнено как трансформация петрофизического разреза. Петрофизический путь выбран потому, что практически невозможно из фондовых материалов извлечь необходимую информацию об истинном значении удельного электрического сопротивления пород, а также потому, что не всегда геологоразведочные скважины размещаются на исследуемом участке.

Отказ от удельного электрического сопротивления, измеренного в скважине, расположенной на участке исследования, вовсе не означает потерю достоверности данных. Напротив, обоснованное распространение данных петрофизического разреза на исследуемый разрез гарантирует достоверность значений УЭС конкретных типов пород.

Трансформация петрофизического разреза имеет еще одно преимущество. Петрофизический разрез описывает непрерывное изменение геофизического параметра по всему интервалу глубин исследования. Непрерывность петрофизического разреза позволяет определить значения физических свойств пачки, расположенной в любой части геологического разреза.

Литологическое расчленение разреза используется по ближайшей скважине при условии выдержанности строения разреза в соседних скважинах. При отсутствии указанной выдержанности вносятся коррективы в строение разреза, учитывающие латеральное изменение литологического состава пород. По проверенному геологическому разрезу производится его литолого-стратиграфическое расчленение на пачки.

Рассматриваемый способ построения геоэлектрического разреза позволяет достичь максимальной адекватности реальному разрезу в пункте зондирования двум основным атрибутам: мощности пачек и их УЭС. За счет контроля латерального изменения литологического состава пачек обеспечивается реалистичность состава и мощности пачек. Использование петрофизических закономерностей также позволяет не допустить к рассмотрению случайных данных и получить наиболее реалистичные значения УЭС.

Конструкция коэффициента изменения УЭС пачек копирует параметр насыщения пород газом (нефтью), широко используемый при геофизических исследованиях скважин газовых и нефтяных месторождениях. По величине данного коэффициента, равной около 2 отн. ед., на месторождениях угля средних стадий метаморфизма выделяются природные скопления свободного метана в трещинных коллекторах. Данный коэффициент позволяет выделять не только природные, но и техногенные коллекторы метана в подработанном углепородном массиве. Для использования рассматриваемого коэффициента на других стадиях метаморфизма углей необходимо проведение исследований по определению величины данного коэффициента.

Выводы

Выполненные исследования позволили получить следующие результаты:

1. Показан путь построения геоэлектрического разреза скопления свободного метана в терригенном коллекторе, который сводится к решению следующих ключевых задач: привязке известного петрофизического разреза к исследуемому геологическому разрезу для определения его петрофизических параметров; объединению слоев геологического разреза в литолого-стратиграфические пачки, мощность которых (не менее 30 м) позволяет их выделять методами электромагнитного зондирования; определению УЭС данных пачек по УЭС и мощности слагающих их слоев; пересчету УЭС пачек на трещиноватое газонасыщенное состояние пород.

2. Для оценки увеличения УЭС пачки за счет газонасыщения предложено использовать коэффициент $K_{УЭС}$, равняющийся отношению УЭС газонасыщенной пачки к ее УЭС в водонасыщенном состоянии. При этом УЭС газонасыщенной пачки измеряется геофизическим методом, а ее УЭС в водонасыщенном состоянии определяется по петрофизическим зависимостям УЭС пород от их литологической принадлежности, степени катагенеза, температуры и минерализации пластовых вод, свойственных данной пачке.

3. Установлено, что на средних стадиях метаморфизма углей коэффициент $K_{УЭС}$ литолого-стратиграфических пачек в газонасыщенном состоянии почти в 2 раза больше водонасыщенных пачек, что служит основанием для выделения скоплений свободного метана в трещинных коллекторах угленосных формаций по данным электромагнитного зондирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Кожевников Н.О. Выделение пластов-коллекторов в разрезе осадочного чехла юга Сибирской платформы по данным зондирований становлением поля в ближней зоне // Геофизика. – 2010. – № 6. – С. 47-52.
2. Сараев А.К., Антащук К.М., Симаков А.Е., Шлыков А.А. Перспективы применения электромагнитных зондирований с мощным контролируемым источником при поисках углеводородов в арктическом регионе России // Недропользование XXI век. – 2016. – № 3 (60). – С. 92-103.
3. Гречухин В.В. Петрофизика угленосных формаций / НПО «Нефтегеофизика». – М.: Недра, 1990. – 472 с.: ил.
4. Анциферов А.В., Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В., Анциферов В.А. Использование электромагнитного зондирования для оценки состояния подработанного углепородного массива // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 15-19. – DOI: 10.15372/FPVGN2021080102.
5. Корчемагин В.А., Павлов И.О, Никитенко А.В. Структурно-тектоническая позиция скоплений метана в угленосных отложениях Донецко-Макеевского района // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Гірничо-геологічна. – 2011. – Вип. 13 (178). – С. 25-30. – Текст электронный. – URL: <http://masters.donntu.ru/2014/igg/antropova/library/article4.pdf>.
6. Анциферов А.В., Канин В.А., Голубев А.А., Галемский П.В. Данные о глубинных подтоках флюидов, формирующих современную газонасыщенность пород Донбасса // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2014. – № 14. – С. 384-398.
7. Тараник А.А., Тихолиз А.М. Исследование химического состава рудничных газов с целью определения их генезиса в угольном пласте I₁ шахты им. А.Ф. Засядько // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XVII Междунар. науч. шк. им. акад. С.А. Христиановича / Таврич. нац. ун-т [и др.]. – Симферополь, 2007. – С. 288-290.
8. Итенберг С.С. Промысловая геофизика. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 388 с.

ОБ УСЛОВИЯХ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТДЕЛЬНО ВЗЯТОГО РАЗЛОМА В СВЯЗИ С ВЫЯВЛЕНИЕМ АНОМАЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ МЕТАНА

Л.А. Иванов

*Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт
горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ)
Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики (Донецк)*

Аннотация: Для заблаговременного выявления опасных скоплений метана на угольных шахтах методами пассивной сейсморазведки априори решается вопрос локализации разнотипных микросейсм в отдельно взятом разломе. Обобщая литературные данные об условиях формирования тектонических напряжений при активизации разлома, установлено, что места образования и тип микросейсм определяются, главным образом, двумя видами изгибов разлома. Показано, что на свободных изгибах формируются микросейсм с механизмом растяжения, а на ограничивающих изгибах – микросейсм с механизмом сжатия. О благоприятном условии образования аномального скопления метана вблизи глубинного разлома свидетельствует комбинация из двух типов участков – вверху с микросейсм типа сжатия и внизу с микросейсм типа растяжения.

Ключевые слова: тектонические напряжения, разломы, микросейсм, аномальные скопления метана.

Введение

Под аномальным скоплением метана (АСМ) на угольном месторождении понимается сравнительно небольшое по размерам скопление свободного метана, находящееся при сверхгидростатическом давлении. Небольшие размеры, не превышающие расстояния между геологоразведочными скважинами (около 200 м), не позволяют их закартировать при разведке месторождения. Случайное вскрытие АСМ сопровождается газопроявлениями в скважине в виде выбросов флюида и длительного (от нескольких дней до нескольких месяцев) дегазирования. Неожиданное вскрытие таких образований горными выработками создает аварийную ситуацию на шахте, приводит к гибели шахтеров. Поэтому выявления АСМ до начала ведения добычи угля является актуальным вопросом.

К прогрессивным способам решения данного вопроса относятся геофизические методы, базирующиеся на использовании микросейсм. Данные методы позволяют поиски АСМ на угольных месторождениях вести на новой физической основе. При этом АСМ выявляются не по их физическим свойствам, на чем базируются традиционные геофизические методы, а по микросейсмическому излучению, обусловленному трещинообразованием и содержанием газа. Существующие варианты микросейсмического зондирования позволяют определить координаты роя микросейсмических событий, обусловленных трещинообразованием, установить механизм их формирования (сбросовый, сдвиговый, взбросовый), а также оценить тип флюида (вода, нефть, газ) [1-4]. Перечисленные задачи успешно решаются на месторождениях нефти и газа. Их решение представляется весьма перспективным при обнаружении АСМ.

Подход к исследованию

Ранее нами рассматривался вопрос поиска мест, благоприятных для образования АСМ, по данным априорной геологической информации. В наиболее общем виде этот вопрос нашел решение, как выявление разломов, способных содержать АСМ. В основу его решения было положено представление о генетической связи АСМ с подтоком газа по глубинному разлому. Данный подток имеет принципиальное значение, поскольку он

компенсирует вековую дегазацию, создает аномально высокое давление газа и тем самым формирует и сохраняет АСМ. Кроме пространственной связи с глубинным разломом в качестве прямых признаков АСМ использовались газопроявления в разведочных скважинах, положительные аномалии газоносности угольных пластов, изотопный состав углерода метана углей, проявления ацетилена, положительные аномалии плотности теплового потока [5].

Основными косвенными признаками АСМ являются структурный и геодинамический показатели. К структурному признаку относится цепочка разрывных структур, начинающаяся с глубинного разлома и заканчивающаяся зоной трещиноватости на уровне угольного месторождения. Геодинамическим признаком является определенное условие залегания разрыва в современном поле тектонических напряжений. При образовании АСМ первый признак отвечает за наличие трещиноватого «коридора», второй признак – за раскрытость трещин и проницаемость данного «коридора».

Детализация мест АСМ в пределах отдельно взятого разлома сводится к решению двух вопросов: латеральному изменению раскрытости трещин и определению типа флюидонасыщения в зоне динамического влияния разлома. В данной статье рассматривается вопрос о латеральном изменении раскрытости трещин, благоприятной для формирования АСМ.

С тектонодинамических позиций рассматриваемый вопрос является родственной задачей нахождения места в массиве кристаллических пород для создания длительно (многие тысячи лет) герметичного хранилища радиоактивных отходов. Данная задача обращает на себя внимание потому, что для ее решения разработаны соответствующие методические основы. Суть их сводится к выделению в каркасе разрывно-трещинной структуры гидравлически активных и пассивных элементов, а также к определению динамики их изменения в неоднородном поле напряжений в течение многих тысяч лет [6].

Цель исследования настоящей статьи заключается в определении мест локализации разнотипного микросейсмического излучения в отдельно взятом разломе в связи с поисками АСМ.

Результаты исследований

Типы тектонических напряжений и режимов выделяются по пространственному положению трех главных осей нормальных напряжений при условии, что сжимающие напряжения положительные. Они имеют следующее соотношение:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3, \quad (1)$$

где σ_1 – ось максимального нормального напряжения; σ_2 – ось промежуточного нормального напряжения; σ_3 – ось минимального нормального напряжения.

Основные типы тектонических напряжений представлены сжатием, сдвигом и растяжением (рис. 1). Данные типы напряжений, согласно [6], образуют два тектонических режима напряжений: режим сжатия и расширения. В режиме сжатия ось σ_1 соответствует оси основного горизонтального напряжения (S_H). В этом режиме формируются типы напряжений сжатия и сдвига. Режим растяжения выделяется по вертикальному положению оси σ_1 . В этом режиме образуется тип напряжений сброса.

Тектонические режимы определяют условия образования и активизации разрыво-трещинных структур. Их образование обычно происходит в течение длительного геологического времени и со сменой тектонических режимов. Активизация раз-

лома в настоящем времени происходит в условиях современного тектонического режима.

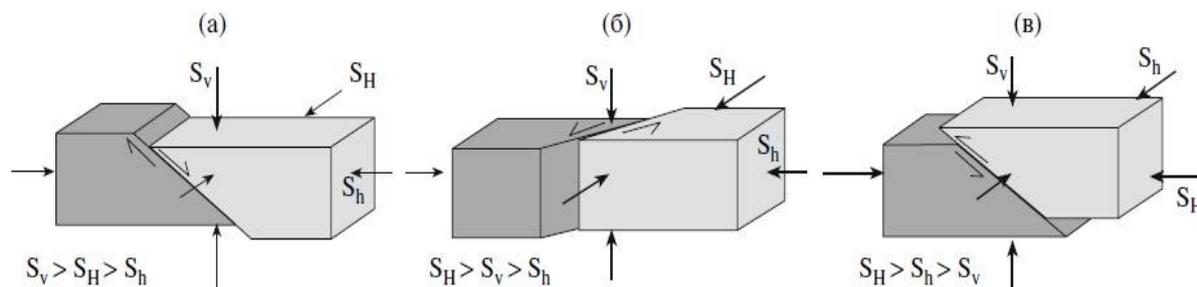


Рис. 1. Основные типы тектонических напряжений в верхней части земной коры по Reinecker *et al.*, 2005 из [6]: а – сброс; б – сдвиг, включая сбросовую и сдвиговую компоненты; в - взброс;
 S_H – основное горизонтальное напряжение; S_h – второстепенное горизонтальное напряжение;
 S_v – вертикальное напряжение

Условие раскрытия разрыва определяется, прежде всего, параллельностью его сместителя и оси σ_1 , а также эффективным давлением. При параллельности сместителя и оси σ_1 раскрытие и проницаемость разрыва достигают максимального значения, а отклонение от данного условия сопровождается их уменьшением.

Рисунок 2 показывает изменение проницаемости разрыва в зависимости от условий его залегания в различном тектоническом режиме.

В тектоническом режиме сжатия проницаемыми являются две группы разрывов:

- а) субгоризонтальные;
- б) наклонные разрывы с простиранием субпараллельным оси σ_1 .

Увеличение угла падения (α) разлома и угла между осью σ_1 и линией простирания (β) приводит к постепенному уменьшению проницаемости. При достижении углов α и β величины, равной 90° , разрыв становится непроницаемым.

В тектоническом режиме растяжения проницаемость разрыва зависит лишь от угла падения разрыва, поскольку только угол α определяет величину отклонения поверхности разрыва от вертикального положения оси σ_1 .

Эффективное давление представляет собой разницу между геостатическим и гидростатическим давлением. Эффективное давление закономерно уменьшается с глубиной за счет большего вертикального градиента гидростатического давления по сравнению с геостатическим давлением. Начиная с определенной глубины и ниже эффективное давление способно приобрести отрицательное значение. При положительной величине эффективное давление препятствует разрушительной силе геостатического давления, при отрицательном значении – способствует гидроразрыву пласта. Согласно [7] в режиме растяжения ($S_v = \sigma_1$) образуются вертикальные трещины отрыва в условиях гидростатического флюидного давления до глубины 1 км и в условиях надгидростатического давления на более глубоких горизонтах (до 12 км и более). В режиме сжатия ($S_H = \sigma_1$) и гидростатического давления, превышающего геостатическое давление, субгоризонтальные разрывы могут формироваться на всем интервале отмеченных глубин.

Гидравлически активные и пассивные элементы представляют собой, соответственно, пути фильтрации и непроницаемые барьеры в каркасе разрыво-трещинной системы массива горных пород.

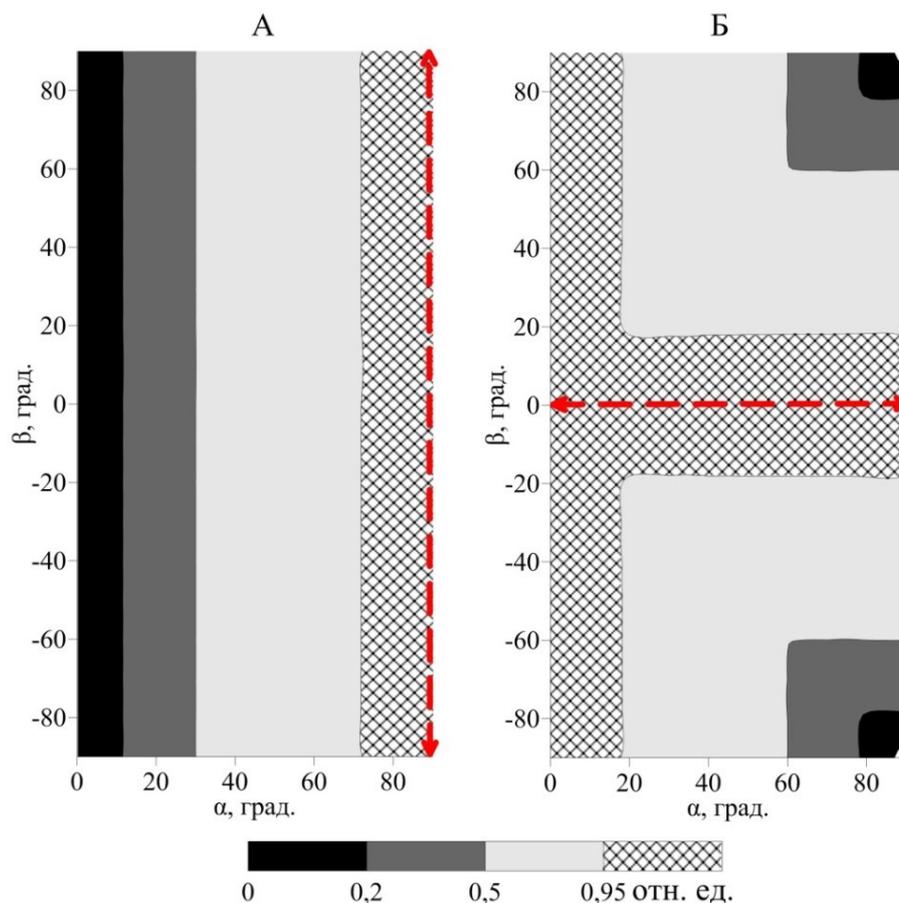


Рис. 2. Изменение относительной проницаемости разрывов в зависимости от их угла падения (α) и направления простирания (β) относительно оси максимальных нормальных напряжений в тектоническом режиме растяжения (А) и сжатия (Б): пунктирная линия – ось максимального нормального напряжения (σ_1)

Д.П. Хиллом (1977) для оценки механизмов образования разрыво-трещинной системы предложена модель поведения трещин скола и отрыва в поле напряжений, возникающих в результате землетрясения (рис. 3). Данная модель применима и для других случаев образования трещиноватости. Главным достоинством модели является ее инвариантность, заключающаяся в графическом постоянстве сети разрывов по отношению к осям σ_1 и σ_3 , независимо от их пространственного положения. При этом по отношению к оси σ_1 трещины скола занимают диагональное, а трещины отрыва субпараллельное положение. Как следствие инвариантности, тектонические режимы растяжения и сжатия характеризуются, соответственно, субвертикальным и субгоризонтальным расположением трещин отрыва.

Ценность данной модели заключается в том, что она позволяет понять изменение условий миграции потока флюида, движущегося по разлому и прилегающим трещинам, в зависимости от расположения оси σ_1 относительно сместителя. При этом выделяются две основные обстановки: первая с ортогональным и вторая с субпараллельным расположением сместителя относительно оси σ_1 .

В первой обстановке сместитель превращается в непроницаемый барьер, препятствующий миграции флюида через него, а прилегающая к сместителю система открытых трещин максимально глубоко отводит флюид вглубь крыльев разлома. Во второй обстановке проницаемыми становятся сместитель и параллельная ему система трещиноватости. Поэтому поток флюида мигрирует вдоль сместителя.

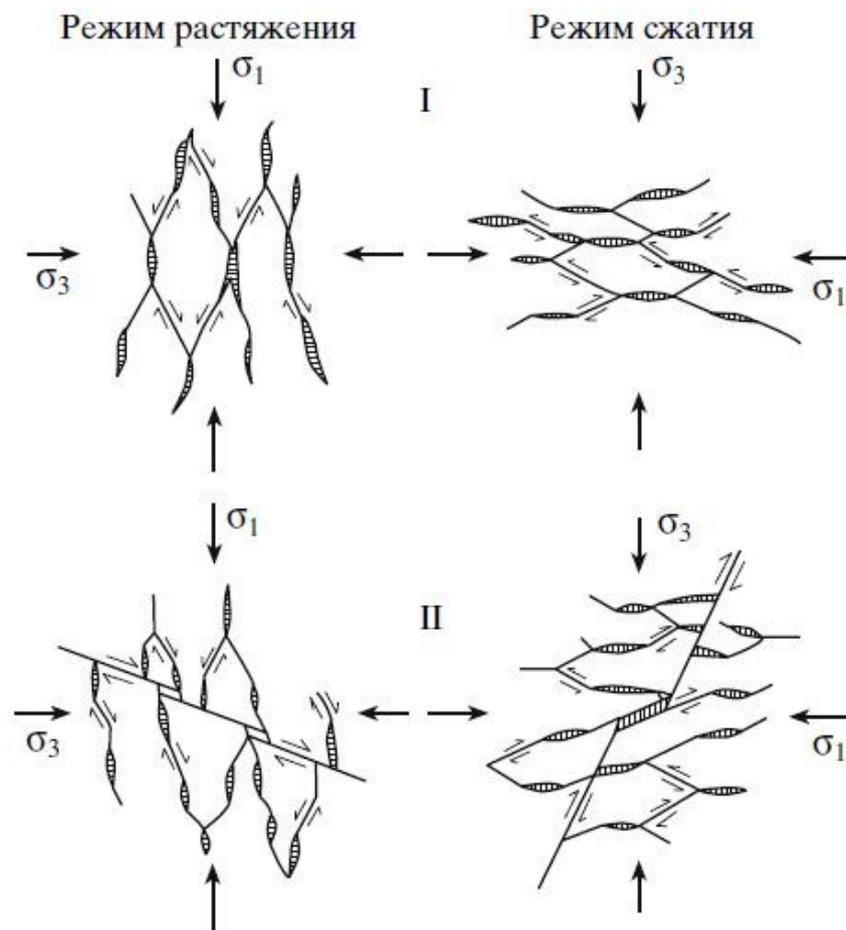


Рис. 3. Развитие сети трещин в режиме растяжения и сжатия без секущего разлома (I) и при наличии его (II) по данным [7]: отрезки линии – закрытые трещины; заштрихованные фигуры – открытые трещины; стрелки – направление осей главных нормальных напряжений; σ_1 – ось максимального сжатия; σ_3 – ось минимального сжатия

Особые условия фильтрации возникают в местах пересечения открытых разломов и трещин растяжения (отрыва). В этом случае образуются трубообразные (тубулярные) каналы и дополнительная компонента трещинной проницаемости [6]. По этим каналам происходит наиболее интенсивная миграция флюида в плоскости сместителя.

Следовательно, субпараллельное расположение оси σ_1 и сместителя определяет условие его открытия, при котором поток флюида сходится к сместителю и мигрирует по нему и прилегающей трещиноватости. Ортогональное расположение оси σ_1 и сместителя приводит к его закрытию и препятствию фильтрации флюида по нему, однако способствует проникновению потока вглубь крыльев разлома. При косом расположении сместителя относительно оси σ_1 формируется обстановка фильтрации, промежуточная между двумя основными. По тубулярным каналам узкие потоки флюида мигрируют в плоскости сместителя в вертикальном и латеральном направлениях.

Таким образом, гидродинамическая активность разрыва в каркасе разрыво-трещинной системы является результатом проявления двух основных факторов: взаимного расположения оси σ_1 и плоскости разрыва, а также величины эффективного давления. Тектонический режим фиксирует пространственное расположение оси σ_1 (вертикальное или горизонтальное), что позволяет активность разрыва связы-

вать с элементами залегания его сместителя. Эффективное давление с глубиной уменьшается и до определенной глубины препятствует, а затем способствует трещинообразованию.

Локальная раскрытость и проницаемость отдельно взятого разлома представляет собой наибольший интерес с точки зрения формирования АСМ и одновременно является весьма сложной задачей в ее определении. В работе [8] указывается, что вопрос факторов и закономерностей развития отдельно взятых разломов относится к числу малоизученных. Особенно данное замечание относится к изучению разломов в условиях их естественного залегания.

Для описания физических свойств и напряжений пород детали разлома удобно объединить и представить в виде трех зон: ядра, области динамического влияния и вмещающих пород (рис. 4).

Ядро является наиболее деформированной частью разлома, состоящей из обломочного материала, хемогенного цемента и пустотного пространства. Обломочный материал представлен глиной трения, миллонитом, катаклазитом и тектонической брекчией. Глинка трения, будинирование и цементация являются факторами экранирования разлома. Степень заполнения обломочным материалом ядра в значительной мере определяет его открытость и фильтрационно-емкостные свойства.

Данный материал образуется за счет разрушения крыльев, поэтому степень заполнения им ядра находится в зависимости от физико-механических свойств пород и амплитуды смещения разрыва. Объем пустотного пространства с увеличением амплитуды смещения сначала увеличивается, затем достигает максимума и уменьшается. Максимум пустотного пространства и проницаемости появляется при амплитуде в несколько десятков метров [10]. При разрушении глинистых пород крыльев ядро приобретает экранирующие свойства.

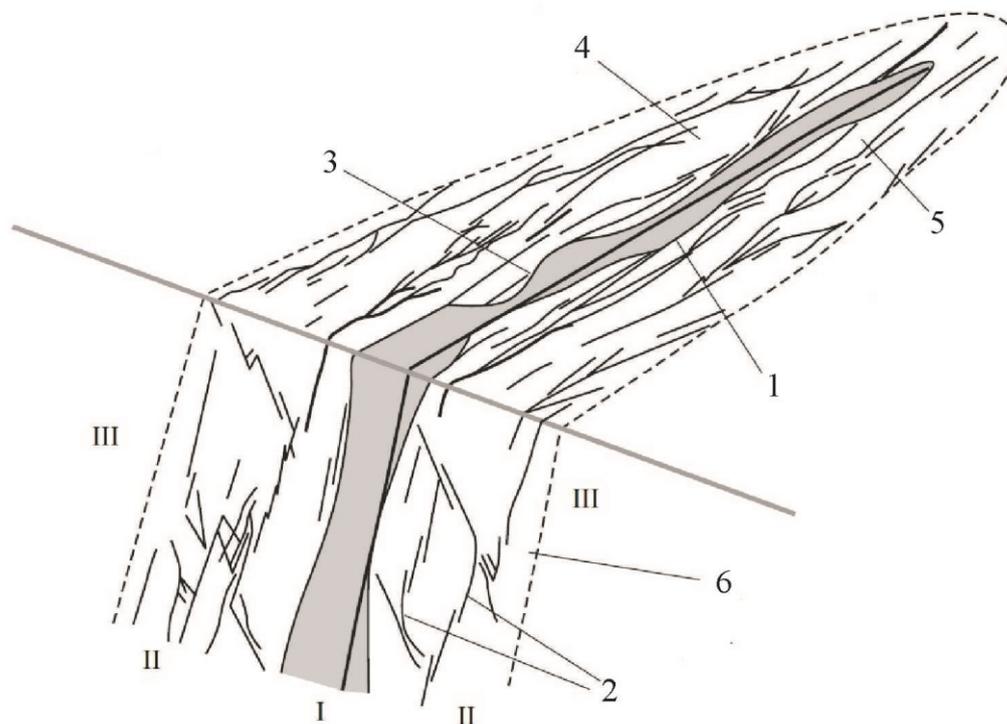


Рис. 4. Элементы внутреннего строения разлома по данным [9]: 1 – основной сместитель и граница ядра разлома; 2 – трещины скола и отрыва; 3 – глинка трения, миллониты, катаклазиты, тектонические брекчии; 4 – жилы, прожилки, просечки; 5 – перемещение пород в зоне разрушения; 6 – граница зоны разрушения пород; I – ядро разлома; II – зона динамического влияния; III – вмещающие породы

Следовательно, проницаемость ядра, связанная с сохранением в нем пустотного пространства, зависит, главным образом, от амплитуды смещения разлома и содержания глинистых пород в геологическом разрезе. Максимум проницаемости достигается при оптимальной величине смещения, способной создать зияние разлома и не допустить большого поступления продуктов разрушения крыльев в ядро разлома. Образованию максимальной проницаемости также способствует минимальное содержание глинистых пород.

Пустотное пространство ядра состоит преимущественно из полостей и пор. Они в значительно меньшей мере, по сравнению с трещинами, подвержены изменению под влиянием вариаций напряженного состояния пород. Поэтому современной динамикой раскрытия ядра при активизации разлома можно пренебречь.

Зона динамического влияния разлома разбита трещинами скола и отрыва. Их раскрытость, в отличие от пустотного пространства ядра, в значительной мере зависит от формирования областей локального уменьшения (рассредоточения) и возрастания напряжений. Распределение этих областей в зоне динамического влияния определяется многими факторами, основными из которых являются самоорганизация трещин, сегментация разлома по активности, тектонический режим активизации разлома, морфология поверхности смесителя, физико-механические свойства пород.

Самоорганизация трещин или отдельных сегментов разлома происходит под влиянием внешнего тектонического поля напряжений. Самоорганизация трещин заключается в их последовательном прохождении периодов аккумуляции напряжений, прерывающихся моментами разрядки. На участках накопления напряжений происходит слияние субпараллельных разрывов в одну плоскость. Слияние обусловлено интерференцией и увеличением напряжений на окончаниях сближенных разрывов. На участках разрядки напряжений разрывы до определенного момента времени находятся в области «нулевых» напряжений или «деформационной тени» и не перемещаются. Участки разрядки напряжений располагаются по обе стороны от участков аккумуляции напряжений. С течением времени происходит мозаичная смена участков аккумуляции и разрядки напряжений. В результате формируется пространственно-временное изменение локальных напряжений [11].

Данное изменение не поддается прогнозированию во времени и пространстве и поэтому рассматривается как фон или помеха, затушевывающая регулярное изменение напряженного состояния разлома.

Сегментация является базовым свойством динамики разрыва. Она заключается в изменении амплитуды смещения и деформации крыльев по простиранию разрыва с течением времени. Данная особенность отчетливо проявляется в однородном материале при физическом моделировании сдвига [8]. При этом по признаку приращения амплитуды смещения выделяются активные и пассивные сегменты. Активные сегменты подразделяются на два типа. Первый тип характеризуется положительным приращением амплитуды, второй – отрицательным (т.е. обратным) приращением. В одном типе активных сегментов может проявляться левостороннее смещение, в другом – правостороннее. Пассивный сегмент выделяется по отсутствию в нем подвижек.

Сущность сегментации разлома заключается в чередовании участков растяжения и сжатия в каждом крыле в направлении простирания сместителя. При этом сегменты, контактирующие между собой по плоскости разрыва, чаще всего отличаются по абсолютным значениям и типу деформаций.

По данным [8] смена типов сегментов разрыва отражает возвратно-поступательный характер смещений, который является закономерной особенностью деформационной

динамики всех разрывов. Поэтому реальной активностью обладает не целый разлом, а лишь его отдельные сегменты.

Следовательно, в соответствии с принципом сегментации с течением времени в теле активного разлома всегда происходит мозаичное перераспределение сегментов локального сжатия и растяжения. Подразделение разлома на данные сегменты означает выделение блоков пород с открытой и закрытой трещиноватостью.

Кинематика разрыва с ровным сместителем определяет направление простирания локальных зон напряжений. В условиях сдвиговой деформации локальные зоны напряжений простираются диагонально по отношению к сместителю и одновременно области уменьшения напряжений простираются почти ортогонально относительно областей увеличения напряжений. При деформациях типа сброса и взброса с углом падения сместителя не менее 60° области уменьшения напряжений ориентируются ортогонально по отношению к сместителю. Области возрастания напряжений концентрируются на окончаниях разрывов [11].

Изгибы сместителя свойственны всем типам разрывных нарушений и придают им ступенчатую траекторию. Ее образование связано с чередованием в разрезе компетентных и некомпетентных пород. К некомпетентным породам приурочены субпластовые участки сместителя, к компетентным – более короткие секущие пласт (рамповые) участки [12].

В угленосных формациях компетентными являются литологические пачки, состоящие преимущественно из слоев песчаника, некомпетентными – пачки, представленные слоями аргиллитов. Поэтому при пересечении аргиллитовой пачки траектория сместителя стремится к субпараллельному с ней залеганию и отклоняется от общего направления смещения. При пересечении песчаниковых пачек сместитель в меньшей мере отклоняется от общего направления смещения (рис. 5А).

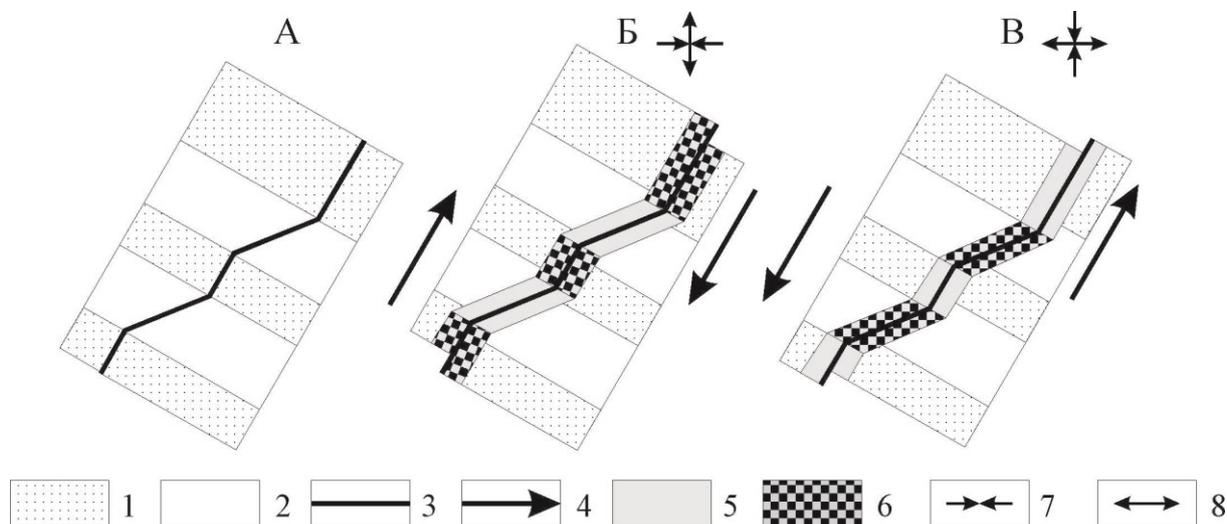


Рис. 5. Образование локальных зон сжатия и растяжения при активации смещения по изогнутому сместителю разрыва:

А – разрыв до смещения крыльев; Б – режим тектонического сжатия и образования взброса;

В – режим тектонического растяжения и образования сброса;

- 1 – компетентные слои; 2 – некомпетентные слои; 3 – сместитель; 4 – направление смещения блоков;
5 – зона локального растяжения на свободном изгибе сместителя; 6 – зона локального сжатия на ограничивающем изгибе сместителя; 7 – ось максимального нормального напряжения;
8 – ось минимального нормального напряжения

Выделяется два вида изгибов: свободные и ограничивающие. В изгибах свободного типа в ходе смещения происходит расхождение крыльев, в изгибах ограничивающего

типа – их столкновение. Свободные изгибы, в отличие от ограничивающих, не препятствуют перемещению крыла.

Главное свойство изгибов заключается в формировании участков локального растяжения на изгибах свободного типа и участков локального сжатия на ограничивающих изгибах при активизации разлома.

Виды изгибов определенным образом связаны с компетентностью пород и тектоническим режимом. В режиме тектонического сжатия свободные изгибы приурочены к участкам некомпетентных пород (рис. 5Б). На этих участках происходит расхождение крыльев по нормали к сместителю. На ограничивающих изгибах, приуроченных к компетентным породам, крылья сближаются. Поэтому при активизации разлома в режиме тектонического сжатия на компетентных породах образуется область локального сжатия, а на некомпетентных породах – область локального растяжения.

В режиме тектонического растяжения данная картина сменяется противоположной (рис. 5В). Свободными изгибами являются участки компетентных пород, ограничивающими изгибами – участки некомпетентных пород. В соответствии с данным распределением типов изгибов локальные области сжатия и растяжения образуются, соответственно, на некомпетентных и компетентных породах.

Таким образом, на свободных и ограничивающих изгибах сместителя возникают, соответственно, области локального растяжения и сжатия. В режиме тектонического сжатия области локального сжатия и растяжения связаны, соответственно, с компетентными и некомпетентными породами. В случае тектонического растяжения, наоборот, области локального сжатия и растяжения приурочены, соответственно, к некомпетентным и компетентным породам.

Данный вывод относится к деформациям сбросового и взбросового типа, а также к деформациям сдвигового типа. В последнем случае на свободном изгибе образуются дополнительные сбросо-сдвиги (дуплекс растяжения), а на ограничивающих изгибах – взбросо-сдвиги (дуплекс сжатия) [12].

Глубина вносит дополнительную лепту в изменение напряженного состояния и раскрытости разрыва, обусловленную сменой тектонического режима сжатия в верхней зоне режимом растяжения в нижней зоне. При этом горизонтальное направление оси σ_1 сменяется вертикальным. В зависимости от условий залегания разрыва на фоне изменения общего тектонического режима образуются зоны локального увеличения и уменьшения напряжений. Им соответствуют участки уменьшения и увеличения раскрытости и проницаемости разрыва.

Выделяются несколько типичных вариантов изменения проницаемости сместителя с глубиной. В первом варианте (рис. 6А) субгоризонтальное залегание сместителя в верхней зоне сменяется субвертикальным в нижней зоне. В верхней зоне сместитель простирается параллельно оси σ_1 . В нижней зоне поверхность сместителя также субпараллельна оси σ_1 . В этом случае сместитель везде субпараллелен оси σ_1 и поэтому является открытым и способным дренировать флюид на всю глубину.

Во втором варианте (рис. 6Б) по сравнению с первым простираение сместителя и осей σ_1 не изменяется, тогда как падение сместителя становится диаметрально противоположным: субвертикальным в верхней зоне и субгоризонтальным внизу. В верхней зоне поверхность сместителя и ось σ_1 являются субпараллельными. В нижней зоне угол между осью σ_1 и поверхностью сместителя увеличивается от 0° до 90° , что сопровождается потерей проницаемости сместителя. Поэтому проницаемость сместителя с глубиной уменьшается и он становится непроницаемым в нижней зоне.

Третий вариант (рис. 6В) характеризуется таким же падением сместителя, как первый, однако простирание сместителя при этом повернуто на 90° . Из-за смены простирания сместитель в верхней зоне не является субпараллельным оси σ_1 . В нижней зоне поверхность сместителя и ось σ_1 остаются субпараллельными. Поэтому сместитель сохраняет проницаемость в нижней зоне и становится непроницаемым в верхней части разреза.

Четвертый вариант (рис. 6Г) аналогичен третьему, за исключением дополнительного усложнения нижней части сместителя, где он приобретает субгоризонтальное залегание. Из-за этого усложнения в нижней части сместитель теряет субпараллельность с осью σ_1 и свою проницаемость.

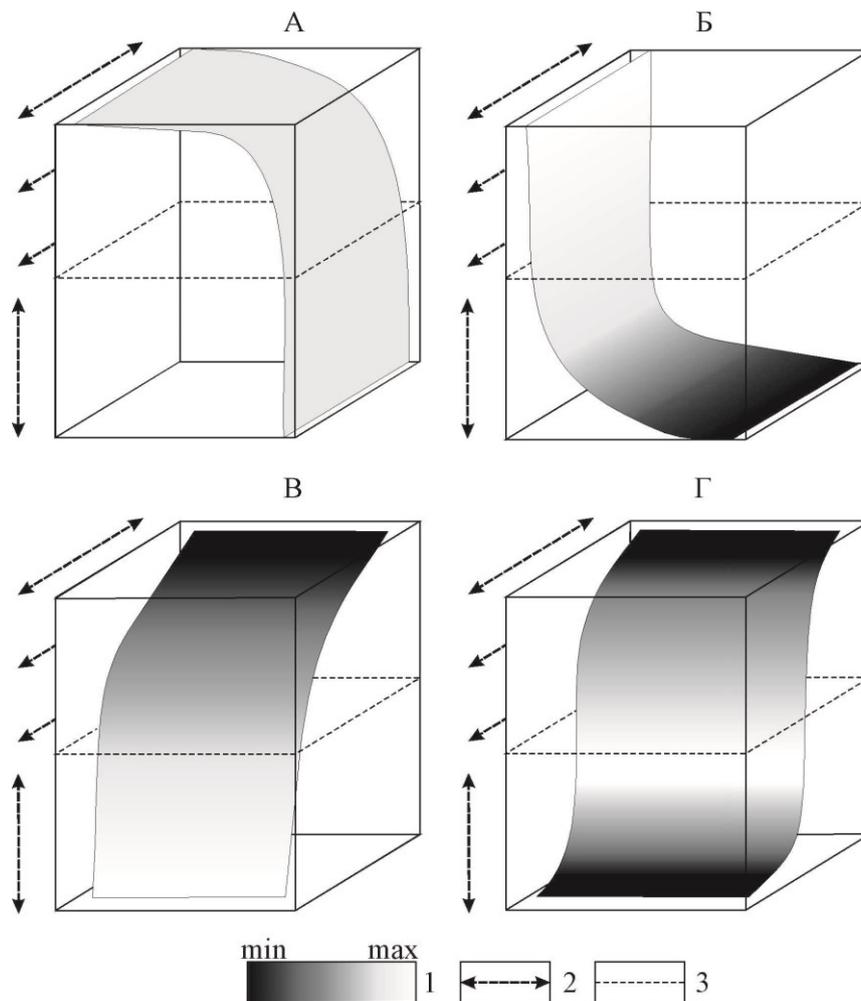


Рис. 6. Проницаемость изогнутого сместителя разлома:

- А – раскрытие всего сместителя; Б – раскрытие верхней части сместителя;
 В – раскрытие нижней части сместителя; Г – раскрытие средней части сместителя;
 1 – условный показатель проницаемости; 2 – направление оси максимального нормального напряжения;
 3 – граница зон режимов тектонического сжатия (вверху) и растяжения (внизу)

Анализ рассмотренных вариантов показывает, что с ростом глубины на фоне смены тектонического режима сжатия режимом растяжения как в верхней, так и в нижней части разреза образуются зоны локального сжатия и растяжения. Зоны локального растяжения формируются в верхней части разреза (в режиме тектонического сжатия) только при условии субпараллельности оси σ_1 и линии простирания сместителя, а также в нижней части разреза (в режиме тектонического растяжения) при условии субверти-

кального залегания разрыва. Нарушение указанных условий приводит к формированию локальных зон сжатия.

Места локации и механизм образования микросейсм обусловлены распределением областей локального сжатия и растяжения. При этом выделяется две группы факторов, определяющие микросейсмичность отдельно взятого разлома: группа статических факторов и динамическая группа. Статическая группа, в отличие от динамической, не изменяется с течением текущего времени. Кроме этого, данные группы отличаются своей функцией в формировании микросейсм.

Статическая группа факторов определяет места локации микросейсм различного типа. Главным фактором является изгиб сместителя. При активизации смещения крыльев разлома на свободных изгибах сместителя формируются микросейсм типа растяжения, а на ограничивающих изгибах – микросейсм типа сжатия.

Недостаточная плотность скважин, вскрывающих сместитель, затрудняет детальное описание его геометрии и выделение изгибов. В таких случаях они могут быть выделены по распределению в разрезе компетентных и некомпетентных пород и общему тектоническому режиму. Как показано выше, к некомпетентным породам приурочены субпластовые участки сместителя, к компетентным породам – более короткие секущие пласт участки.

Динамическая группа факторов, в отличие от статической, определяет не место, а механизм образования микросейсм, соответствующий условиям локального сжатия и растяжения. Главными факторами этой группы являются тектонический режим активизации и сегментация разлома.

Следует учесть, что активизация разлома в виде движения его крыльев характеризуется набором периодов различной продолжительности. Условно выделяются длительные и короткопериодные движения разломов. К первым относятся периоды, исчисляемые сутками, месяцами, годами и миллионами лет. Короткопериодная активизация характеризуется широким спектром колебаний. Наиболее четко выделяются гармоники с продолжительностью периодов от 20 до 120 минут [13].

Причины тектонической активизации по отношению угольному бассейну подразделяются на внешние и внутренние. Большое значение придается внешним факторам, главными из которых считаются тектоническая активность соседних геологических структур, ротационное изменение напряженного состояния пород, лунно-солнечные приливы.

Неотектоническая активизация, экстраполируемая на настоящее время в Донецком бассейне, объясняется развитием внешних по отношению к бассейну тектонических процессов. Наиболее вероятной причиной по [14] является «резонансный отклик» глубинных структур Донбасса на тектонические события, активно развивающиеся в соседнем Среднеземноморском геосинклинальном поясе. В качестве возможного механизма передачи усилий вдоль литосферной плиты могут быть низкоскоростные деформационные волны. Их скорость распространения оценивается от 20 до 40 км/год [15]. Прохождение фаз сжатия и растяжения такой волны через разлом способно в течение полугода-года изменить его напряженное состояние и тип тектонического режима.

Ротационное изменение напряженного состояния пород обусловлено небольшим изменением скорости вращения Земли вокруг оси в течение года, которое по высвобождаемой энергии соизмеримо с сейсмичностью планеты за тот же период. Минимумы скорости вращения припадают на III и IX месяцы, максимум – на VI месяц [16]. Поэтому изменение скорости вращения Земли способно периодически (четыре раза в год) изменить общее напряженное состояние разлома.

Лунно-солнечные приливы повторяются с периодичностью около 12 часов. В течение суток земная поверхность дважды испытывает поднятие и опускание, что изменяет общее напряженное состояние разлома, повторяющееся дважды в сутки. Периодичность лунно-солнечных приливов тесно коррелируется с динамикой геофизических полей, в том числе, и с микросейсмичностью [17].

Активизация разлома является результатом суммирования за определенный период наблюдения периодик различной продолжительности. Результирующая активность определяет общий текущий тектонический режим разлома, представленный сжатием или растяжением. На локальных участках разлома, или сегментах, общий режим испытывает трансформацию: усиливается, ослабляется, сменяется противоположным.

По механизму образования выделяются два основных типа микросейсм: первый тип – микросейсм сжатия и второй тип – микросейсм растяжения. Их локализация обусловлена образованием изгибов сместителя. Микросейсм типа сжатия приурочены к ограничивающим изгибам сместителя. Микросейсм типа растяжений локализируются на изгибах свободного типа.

Общий тектонический режим и форма сместителя определяют свободный или ограничивающий тип изгиба и, как следствие, механизм образования микросейсм, соответственно, типа растяжения или сжатия. Один и тот же сегмент разлома в зависимости от общего тектонического режима может быть местом формирования микросейсм типа сжатия или растяжения.

Например (см. рис. 5), при активизации разлома в режиме тектонического сжатия микросейсм типа сжатия локализируются на крутых коротких фрагментах сместителя, а микросейсм типа растяжения – на длинных пологих участках. Смена общего режима активизации разлома приводит к смене знака локальных напряжений: на коротких крутых фрагментах формируются микросейсм типа растяжения, на длинных пологих фрагментах – микросейсм типа сжатия.

Таким образом, места локализации микросейсм соответствуют участкам локального изменения напряжений, приуроченным, главным образом, к изгибам сместителя разрыва. Механизм образования микросейсм на этих участках определяется видом изгиба, который зависит от направления изгиба и тектонического режима активизации разлома. Направление изгиба определенным образом связано с компетентностью пород крыльев разлома.

Обсуждение результатов

Исследование микросейсмического излучения зоны динамического влияния разлома остается одной из больших научных проблем, в решении которой заинтересованы ученые из различных отраслей: от сейсмологии и геодинамики до рудной, нефтегазовой и инженерной геофизики. При этом выделяются вопросы, связанные как с причинами, порождающими микросейсм, так и с реакцией разлома на эти причины в виде разнотипных микросейсм. В основе исследования микросейсм лежат геодинамические, тектонофизические и петрофизические представления о разломообразовании.

Трудности исследования в первую очередь заключаются в сложности самого объекта исследования. Область динамического влияния имеет большие размеры по площади и глубине. Ее полный охват возможен лишь на основе картирования, складывающегося в единое целое сведения о разрозненных фрагментах разлома, полученных в результате документации обнажений горных пород, бурения разведочных скважин и выполнения геофизических работ. При этом нет полной уверенности, что обнаружены и учтены все особенности строения разлома, генерирующие микросейсм.

Отдельные фрагменты разлома исследуются при помощи физического моделирования. Данный метод позволяет, упростив строение разлома, установить причинно-следственные связи параметров процесса разломообразования. Однако эти связи применимы лишь для отдельного элемента разлома, вычлененного из его общего строения. Тем не менее, результаты физического моделирования в ряде случаев позволяют правильно истолковать данные геофизических исследований.

Вся зона динамического влияния разлома в условиях естественного залегания пород может быть исследована при помощи геофизических методов на основе мониторинга микросейсмического излучения. При этом использование микросейсм имеет свои трудности, связанные с однозначностью решения таких задач, как разделение спектра микросейсм по источникам образования, выделение мест локации микросейсмических событий, установление механизма их образования и характера насыщения пород. Поэтому при исследовании микросейсмического излучения важно оттолкнуться от известных особенностей разлома, определяющих характер микросейсмического излучения.

В данной работе решается первоочередной вопрос микросейсмических исследований – определение мест локализации и типа микросейсмического излучения в отдельно взятом разломе по априорным данным. Рассматривается простейший вариант разлома, в зоне динамического влияния которого не распространены другие сопутствующие разломы и складки.

Внимание акцентируется на особенностях строения разлома, определяемых по данным ранее проведенной разведки угольного месторождения. К таким особенностям прежде всего относятся свободные и ограничивающие изгибы сместителя. С ними связаны места локации микросейсм. Вид изгиба устанавливается по форме сместителя и общему тектоническому режиму. Форма сместителя определяется по трехмерным координатам точек его пересечения разведочными скважинами, либо реконструируется по распределению компетентных и некомпетентных пород в крыльях разлома. Общий тектонический режим устанавливается по данным линейamentного анализа космических снимков, натурных измерений напряженного состояния пород и геофизических исследований. В зависимости от тектонического режима компетентные породы могут быть местами локализации областей сжатия или расширения.

Определение участков локализации микросейсмического излучения разного типа имеет непосредственное отношение к поиску АСМ вблизи разломов, дренирующих глубинный газ. Микросейсмическое излучение типа растяжения указывает на развитие в зоне динамического влияния разлома локальных участков пород с открытым типом трещиноватости. Прослеживание таких участков по простиранию и падению разлома позволяет проследить трещинные «коридоры» или каналы для миграции глубинных газов. Микросейсмическое излучение типа сжатия свидетельствует о закрытом типе трещиноватости и барьере на пути миграции газа. Комбинация, состоящая из проницаемого коридора и блокирующего его непроницаемого барьера, представляет собой АСМ с подводным каналом.

Следует отметить, что в работе проанализированы условия микросейсмического излучения разлома и возможности формирования АСМ, определяемые по априорным данным. Экспериментальные данные микросейсмического мониторинга позволяют детализировать картину распределения раскрытости трещиноватости в области динамического влияния разлома. Пластовые карты латерального изменения раскрытости трещин дают возможность спрогнозировать АСМ до начала добычи угля.

Выводы

В результате исследований установлено следующее.

1. Места локации микросейсм, связанные с аномальными скоплениями метана, располагаются на участках локального изменения напряженного состояния разлома, главным фактором образования которых при активизации разлома является наличие изгиба сместителя.

2. Механизм образования микросейсм обусловлен видом изгиба: микросейсм с механизмом растяжения формируются на свободных изгибах; с механизмом сжатия – на ограничивающих изгибах. Вид изгиба сместителя в свою очередь определяется его формой и тектоническим режимом активизации разлома.

3. Форма сместителя определяется по трехмерным координатам точек его вскрытия разведочными скважинами. При дефиците таких данных форма сместителя реконструируется по распределению ассоциаций компетентных и некомпетентных пород в крыльях разлома.

4. Тектонический режим активизации разлома характеризуется периодическим изменением, обусловленным, прежде всего, тектонической активностью соседних геологических структур, ротационным изменением напряженного состояния пород, лунно-солнечными приливами. Тектонический режим также изменяется с увеличением глубины залегания пород. О современном тектоническом режиме свидетельствуют данные линеamentного анализа космических снимков и натурные измерения напряженного состояния пород.

5. Комбинация участков микросейсм типа сжатия вверху и микросейсм типа растяжения внизу в поле микросейсм отражает наиболее благоприятное условие образования аномального скопления метана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добрынина А.А., Саньков А.В., Саньков В.А. Анизотропия микросейсм в зонах активных разломов // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы шестой молодежной тектонофизич. шк.-семинара / ИФЗ РАН. – М., 2019. – С. 96-98.
2. Кузнецов О.Л., Чиркин И.А., Арутюнов С.И., Ризанов Е.Г., Дыбленко В.П., Дрягин В.В. Сейсмические исследования неравномерности открытой трещиноватости и неоднородности флюидонасыщения геологической среды для оптимального освоения месторождений нефти и газа // Георесурсы. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 206-215. – DOI: 10.18599/grs.2018.3.206-215.
3. Кушнир А.Ф., Варыпаев А.В., Рожков М.В., Епифанский А.Г., Дрикер И. Определение параметров очагов микросейсмических событий по данным поверхностных сейсмических групп при сильных коррелированных помехах и сложных механизмах источников излучения // Физика Земли. – 2014. – № 3. – С. 28-50. – DOI: 10.7868/S000233371403003X.
4. Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Каляшин С.В., Колигаев С.О., Радван А.А. Мониторинг микросейсмической эмиссии для обеспечения экологической безопасности разведки и разработки нефтяных месторождений на акватории // Вестн. РАН. – 2014. – № 4. – С. 8-14.
5. Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана // Труды РАНМИ. – 2022. – № 16-17 (31-32). – С. 46-59.
6. Петров В.А., Леспинас М., Хаммер Й. Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 2. – С. 99-126.
7. Sibson R.H., Scott J. Stress/fault controls on the containment and release of overpressured fluids: examples from gold-quartz vein systems in Juneau, Alaska; Victoria, Australia and Otago, New Zeland // Ore Geology Reviews. – 1998. – V. 13, № 1-5. – P. 293-306. – DOI: 10.1016/S0169-1368(97)00023-1.
8. Тарасова А.А. Сегментная активизация разломов (по результатам физического моделирования) // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы третьей молодежной шк.-семинара / ИФЗ РАН. – М., 2013. – Т. 1. – С. 310-320.

9. Shipton Z.K., Cowie P.A. A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone // *Journal of Structural Geology*. – 2003. – V. 25, № 3. – P. 333-344. – DOI: 10.1016/S0191-8141(02)00037-8.
10. Тугарина М.А., Семинский К.Ж. Отражение пространственно-временных закономерностей разрывообразования в характере обводненности разломной зоны // *Внутренняя структура континентальных разломных зон: прикладной аспект* / [К.Ж. Семинский и др.]. – Новосибирск, 2005. – С. 94-112.
11. Cowie P.A. A healing-reloading feedback control on the growth rate of seismogenic faults // *Journal of Structural Geology*. – 1998. – V. 20, № 8. – P. 1075-1087. – DOI: 10.1016/S0191-8141(98)00034-0.
12. Прокопьев А.В., Фридовский В.Ю., Гайдук В.В. Разломы: (Морфология, геометрия и кинематика): учеб. пособие. – Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2004. – 148 с.: ил.
13. Панжин А. А. Исследование короткопериодных деформаций разломных зон верхней части земной коры с применением спутниковой геодезии // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2003. – № 2. – С. 43-54.
14. Корчемагин В.А. Геологическая структура и поля напряжений в связи с эволюцией эндогенных режимов Донбасса: дис. ... д.г.-м. н.: 04.00.04 / Корчемагин Виктор Александрович. – Москва, 1984. – 380 с.
15. Шерман С.И. Деформационные волны как триггерный механизм сейсмической активности в сейсмических зонах континентальной литосферы // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2013. – Т. 4., № 2. – С. 83-117.
16. Акуленко Л.Д., Марков Ю.Г., Перепелкин В.В. Неравномерности вращения Земли // *Докл. Акад. наук*. – 2007. – Т. 417, № 4. – С. 483-488.
17. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора-атмосфера // *Физика Земли*. – 2012. – № 2 – С. 14-16.

УДК 550.8.052

DOI:10.7242/echo.2023.1.15

МНОГОЭТАПНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ

П.Н. Новикова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Обсуждаются стратегии многоэтапного прогнозирования при анализе магнитных вариаций на базе гибридной модели машинного обучения. Для реализации краткосрочных прогнозов применительно к циклической компоненте модели хорошо зарекомендовали себя прямая и рекурсивные стратегии. Оценена возможность множественного прогнозирования нерегулярной компоненты. Показаны результаты одношагового и многоэтапного прогнозирования на примере среднечасовых магнитных вариаций геомагнитной обсерватории г. Новосибирск.

Ключевые слова: многоэтапное прогнозирование, магнитные вариации, временные ряды, машинное обучение, гибридный алгоритм, одношаговый прогноз.

Анализ и прогнозирование магнитной активности в высоких широтах, а также в прибрежных зонах, где поведение магнитных вариаций показывает наиболее нерегулярный, изменчивый характер [1, 3, 5], является важной задачей как собственно всестороннего исследования природы магнитных вариаций и геомагнитных бурь, так и производственных задач, связанных с оценкой магнитного поля в краткосрочной и среднесрочной перспективах (например, бурение скважин по навигации по магнитному полю, работы железнодорожного транспорта и т.д. [5]).

В данной статье для построения краткосрочных прогнозных значений магнитных вариаций, представляющих собой временной ряд [2], используется базовая гибри-

ная модель машинного обучения, представленная в работе [4]. При использовании комбинации линейных и авторегрессионных методов происходит последовательное моделирование трендовой, сезонной, циклической и случайной компонент. Перед обучением данные о магнитных вариациях обрабатываются: заполняются отсутствующие значения, из данных убираются резкие «выскоки» (не более 5% от общего количества точек регистрации). По сравнению с предыдущей версией гибридной модели [4], были улучшены сезонные параметры, а также автокорреляционные и статистические признаки, используемые для вычисления циклической составляющей. Качество модели последовательно для каждой компоненты оценивается с помощью метода наименьших квадратов.

Стратегии многошагового прогнозирования. Обычно предсказание (экстраполяция) временных рядов дает возможность предсказать значение ряда только на следующем временном шаге. Рассмотрим несколько стратегий прогнозирования временных рядов, позволяющих получить оценку значений на несколько шагов вперед (рис. 1).

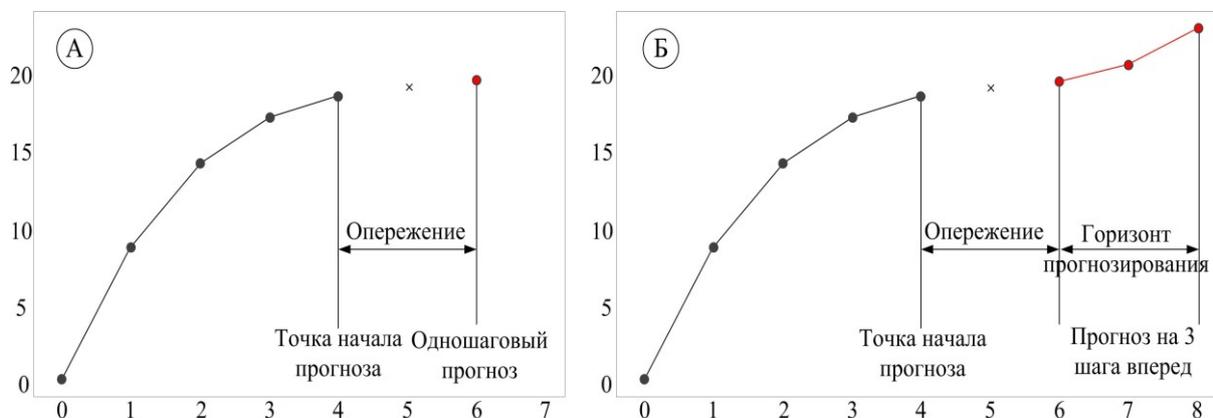


Рис. 1. Принцип одношаговой (А) и многошаговой (Б) стратегии прогнозирования временных рядов

1. **Рекурсивная стратегия** многократно использует одношаговую модель для построения единичных прогнозов, в которой прогноз для предыдущего временного шага используется в качестве входных данных для создания прогноза на следующем временном шаге. В такой стратегии горизонт событий (интервал времени, для которого необходимо получить данные или, по-другому, нужное количество шагов вперед (рис. 1Б) может быть «бесконечно» длительным, однако присутствует эффект накопления предыдущих ошибок в данных.

2. **Прямая стратегия** предполагает построение множества моделей, которые обучаются на каждую отдельную точку горизонта, т.е. первая модель обучается прогнозировать на 1 шаг вперед, вторая модель – на 2 шага вперед и т.д. Данная стратегия гораздо меньше подвержена накоплению ошибок, однако хуже применима для среднесрочных и долгосрочных прогнозов.

3. **Прямо-рекурсивные гибридные стратегии** объединяют два предыдущих метода: строится серия моделей для отдельных прогнозов, использующих прошлые предсказания базовой модели в качестве входных значений. При такой стратегии нет ограничений на выбор периода горизонта предсказания.

4. **Множественная (мульти) стратегия** включает в себя разработку одной модели, которая способна прогнозировать всю последовательность прогноза в один прием.

Каждая из этих стратегий реализуется при помощи библиотеки `scikit learn` [6]. Первые три стратегии для обучения используют метод градиентного бустинга. Мультистратегия основывается на применении методов нейронного обучения.

Если рассматривать базовую гибридную модель, то наиболее устойчивыми компонентами являются тренд и сезонная компонента, связанная с солнечно-суточными, 27-дневными и собственно сезонными вариациями [3]. Для данных компонент применялись методы, использующие линейную регрессию, их предсказание довольно устойчиво. Методы авторегрессии, использующие серию предыдущих значений исходного ряда магнитных вариаций – лаги, применялись для построения циклической и случайной характеристик. Циклическая компонента в магнитных вариациях является неустойчивой и нерегулярной, поэтому именно для нее имеет значение построение многоэтапного прогноза, т.к. наиболее сильна зависимость от ближайших значений, выявленная по частичной автокорреляции.

На данном этапе в алгоритм отдельно для циклической компоненты внедрены три стратегии многоэтапного прогнозирования: мультистратегия, прямая и рекурсивная. Такой подход поможет оценить возможности многоэтапного прогнозирования для моделирования различных вариантов поведения нерегулярной компоненты. Для новых моделей машинного обучения был сформирован вектор признаков для многоэтапной модели, состоящей из серии запаздываний статистик, соответствующей периоду горизонта предсказаний, который можно регулировать. Стоит отметить, что выбор горизонта прогнозирования влияет на количество и интервалы вычисляемых лагов.

Практический пример. Одношаговый и многошаговые прогнозы были выполнены для среднечасовых магнитных вариаций, измеренных обсерваторией г. Новосибирск в 2016-17 гг. (материалы сайта <http://www.wdcb.ru/> Мирового центра данных по солнечно-земной физике, г. Москва). В качестве обучающей и проверочных выборок использовались значения 2016 г., прогнозирование значений осуществлялось для первых двух суток 2017 г. Одношаговый прогноз довольно устойчиво показывает основные тенденции в данных (рис. 2). Средняя квадратическая ошибка для одношагового прогноза составила 3.25 нТл. Следует отметить, что прогнозирование ведется для неочищенных данных, тогда как модель обучается на подготовленном наборе данных. Поэтому особый интерес вызывает способность многоэтапных моделей предсказывать резкие отклонения.

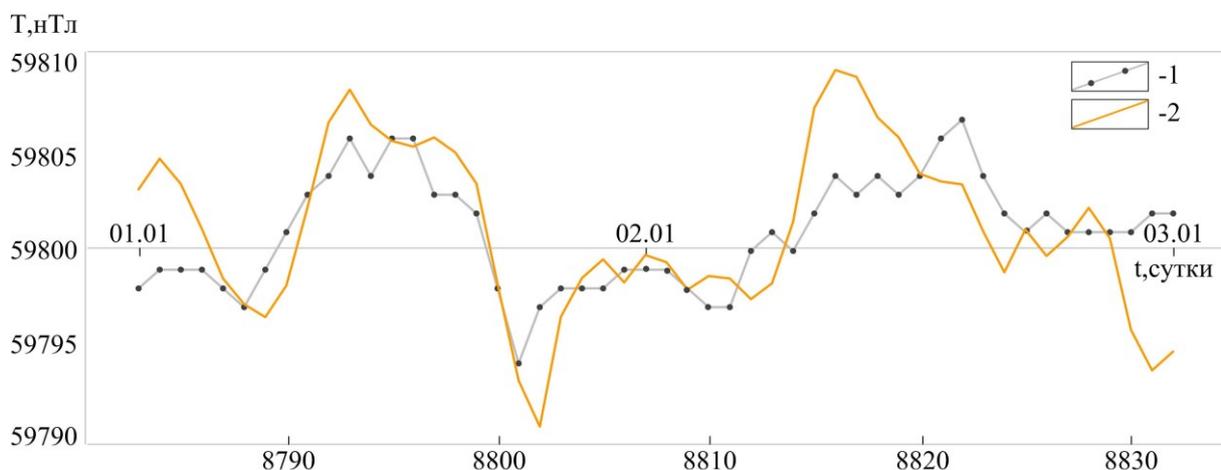


Рис. 2. Одношаговый прогноз магнитных вариаций на 2 суток вперед (48 шагов)

Многоэтапный прогноз был выполнен по трем стратегиям с горизонтом 6 шагов для циклической компоненты. Результаты моделирования циклической компоненты включались в прогноз базовой модели, т.е. суммировались результаты одношаговых прогнозов по трендовой, сезонной и случайной компонентам с включением многошагового прогноза циклической характеристики. Стоит отметить, что базовая модель на выбранных данных с выбранным количеством и интервалом лагов наиболее хорошо выполняет краткосрочные прогнозы. Среднеквадратическая ошибка на валидационной выборке для каждого метода не превышает 2 нТл, а на обучающей – 1 нТл. Общая многошаговая модель наследует накопление ошибок базовой модели, что можно наблюдать в резких несоответствиях морфологии магнитных вариаций на некоторых участках прогнозирования.

Для каждой стратегии предсказания значений на несколько шагов вперед оценивался размах между минимальным и максимальным значениями, полученными для каждой точки прогноза (рис. 3). Картина доверительного интервала по всем трем стратегиям оказалась довольно близка, средний размах составил порядка 6-7 нТл. Морфология доверительного интервала близка к одношаговому прогнозу и истинным значениям.

На рисунке 4 показаны результаты многоэтапного моделирования магнитных вариаций – каждая отдельная цветная линия показывает 6-шаговый прогноз. При прямой и рекурсивной стратегиях наблюдается довольно близкая к друг другу морфология прогнозов для каждой точки. Тогда как мультистратегия способна резко менять конфигурацию прогноза на последних точках.

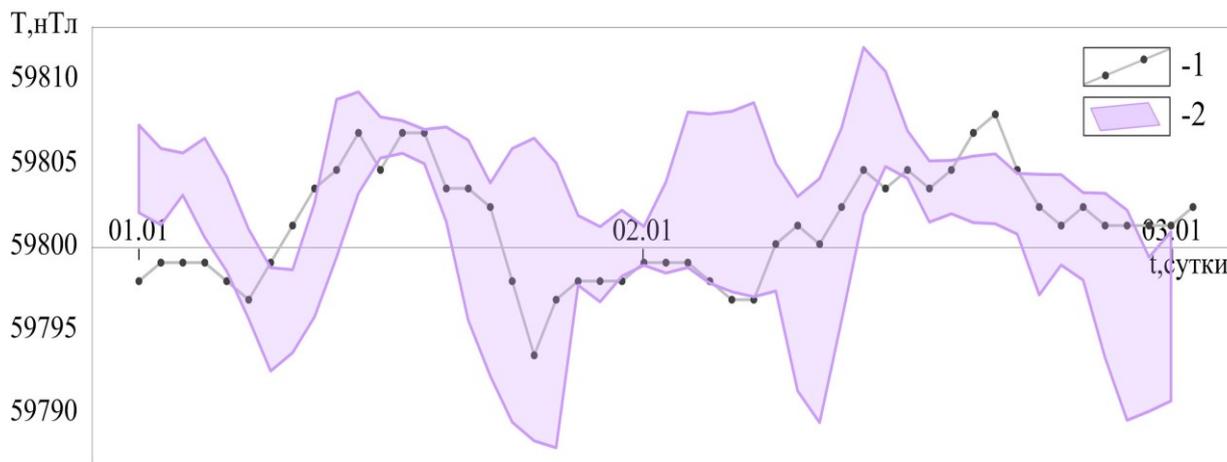


Рис. 3. Общий размах значений при многоэтапном прогнозировании магнитных вариаций на примере рекурсивной стратегии

Основные выводы. Многоэтапные стратегии прогнозирования для представленной гибридной модели позволяют получать краткосрочные прогнозы на несколько шагов вперед, основываясь на прошлых регистрациях магнитных вариаций. При этом такие стратегии позволяют получать некоторый доверительный интервал значений, моделирующий возможные отклонения вариаций от «базовой» линии – относительно спокойных периодических изменений данных. Мультистратегия дает большие ошибки в морфологии, чем прямая и рекурсивная, что еще раз показывает некоторую автокорреляционную зависимость магнитных вариаций, которую необходимо использовать при моделировании нерегулярных компонент вариаций.

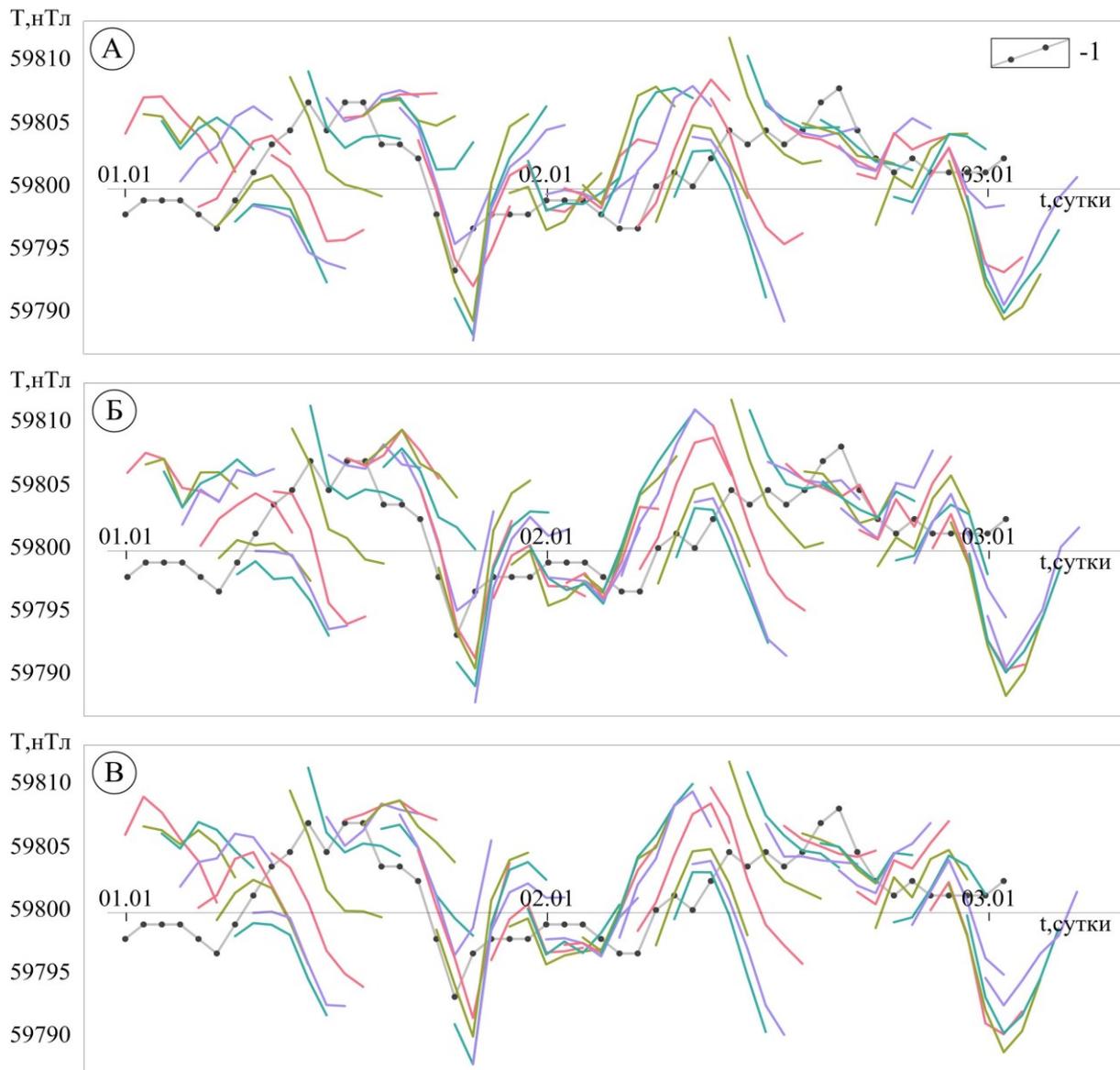


Рис. 4. Многоэтапный прогноз магнитных вариаций на горизонт 6 шагов вперед:
 А – рекурсивная стратегия; Б – прямая стратегия; В – мультистратегия
 (1 – тестовая выборка, цветными линиями обозначены прогнозы для каждой точки)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю., Соловьев А.А. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца. – М.: РАН, 2019. – 185 с.: ил.
2. Лоскутов А.Ю.. Анализ временных рядов. Курс лекций // Нелинейная динамика, теория динамического хаоса и синергетика: идеи и перспективы. – Текст электронный. – URL: https://chaos.phys.msu.ru/loskutov/PDF/Lectures_time_series_analysis.pdf (дата обращения: 30.03.2023).
3. Магниторазведка: справ. геофизика / под ред. В.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 469 с.
4. Новикова П.Н. Восстановление данных магнитных вариаций гибридным алгоритмом машинного обучения // Горное эхо. – 2022. – № 3 (88). – С. 25-33. – DOI: 10.7242/echo.2022.3.5.
5. Соловьев А.А. Некоторые задачи геомагнетизма, решаемые по данным магнитных обсерваторий и спутниковых наблюдений // Добрецовские чтения: наука из первых рук: Материалы 1 Всерос. науч. конф. – Новосибирск, 2022. – С. 306.
6. Python и машинное обучение: машинное и глубокое обучение с использованием Python, scikit-learn и TensorFlow 2: пер. с англ. – 3-е изд. – СПб.: ООО «Диалектика», 2020. – 848 с.

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2023.1.16

ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОДКЕ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ВО ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ В ПОДЗЕМНОМ РУДНИКЕ «УДАЧНЫЙ»

С.С. Андрейко

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Выполнен анализ геологических условий ведения горных работ в подземном руднике «Удачный». Дана характеристика тектонической структуры участка локализации трубки «Удачная», осложненной многочисленными субвертикальными, наклонными и субгоризонтальными разрывными нарушениями различной мощности и морфологии. В условиях подземного рудника «Удачный» разрывные нарушения представляют собой участки горного массива, которые в каждом конкретном случае могут быть выражены зонами повышенной трещиноватости, дробления, брекчирования, милонитизации, тектонического расщепления. Показано, что при залечивании зон трещиноватости вторичными минералами их газопроницаемость резко снижается, в массиве могут образовываться «экранированные» участки горных пород, в пределах которых будет происходить аккумуляция свободных газов и формирование локальных газонасыщенных зон, представляющих собой зоны газодинамической опасности при ведении горных работ в пределах таких локальных участков. Выполнен анализ результатов исследований газоносности горных пород по данным геологоразведочных работ с поверхности, который показал, что высоко газоносные интервалы пород приурочены, как правило, к нефтебитуминозным коллекторам. При этом величина газоносности массива пород может быть тесно увязана с его тектонической нарушенностью – возможностью миграции газов. Проведен анализ случаев разрушений приконтурной части массива горных пород при проходке подготовительных выработок буровзрывным способом во вмещающих породах. По визуальным признакам, механизму протекания и характеру разрушения известняков в рассмотренных случаях разрушения приконтурного массива данные инциденты следует относить к выбросам известняков и газа, инициированным буровзрывными работами.

Ключевые слова: подземный рудник, вмещающие породы, разрывные нарушения, известняки, газоносность, подготовительные выработки, буровзрывные работы, взрывной импульс, инициирование, газодинамические явления, полость разрушения, выбросы известняков и газа.

В настоящее время на подземном руднике «Удачный» АК «Алроса» (ПАО) при ведении подготовительных горных работ во вмещающих породах происходят газодинамические явления в виде инициированных буровзрывными работами выбросов известняков и газа, которые в силу внезапности и возможной большой интенсивности представляют серьезную угрозу жизни шахтеров, нарушают технологию ведения горных работ и параметры проходимых подготовительных выработок. На ликвидацию последствий выбросов известняков и газа на стадии проходки подготовительных выработок требуются существенные материальные затраты.

В мировой практике ведения горных работ проявление выбросов породы и газа в известняках является фактом уникальным и не имеет аналогов решения проблемы проведения выработок по напряженным и газонасыщенным породам. В этой связи появилась настоятельная необходимость в анализе известных в настоящее время сведений о газоносности пород удачинской свиты в условиях шахтного поля подземного рудника «Удачный», полученных по данным геологоразведочных работ с поверхности и по данным подземных геологоразведочных работ. Кроме этого, необходим анализ данных о газопроявлениях и газодинамической активности горных

пород в условиях шахтного поля подземного рудника «Удачный», на основании которого может быть дана обоснованная оценка вида разрушения приконтурной части массива горных пород при проходке подготовительных выработок ниже отм. –630 м буровзрывным способом.

Отработка месторождения трубки «Удачная» открытым способом завершена в 2015 году. Отработка подкарьерных запасов продолжена подземным способом. Вскрытие запасов месторождения произведено тремя вертикальными стволами, которые располагаются на единой промышленной площадке. Модель рудных тел кимберлитовой трубки Удачная по данным института «Якутнипроалмаз» представлена на рисунке 1.

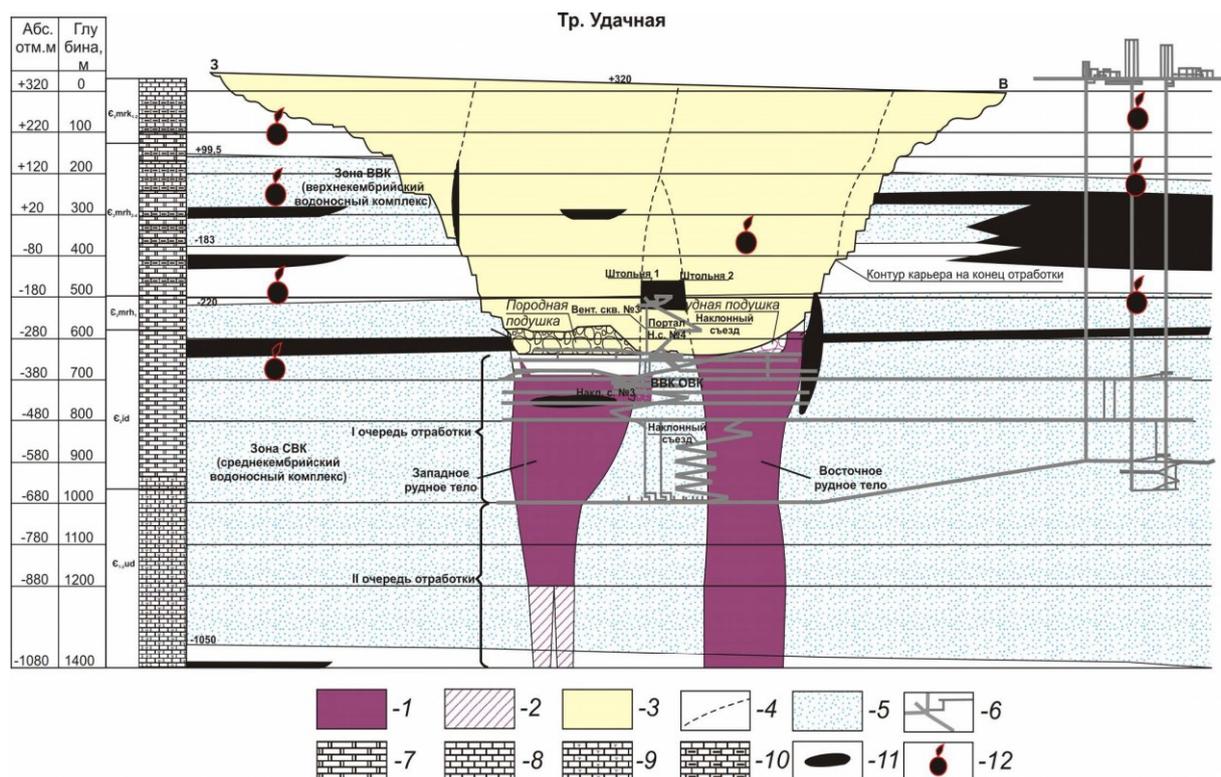


Рис. 1. Модель рудных тел кимберлитовой трубки Удачная:

- 1 – балансовые запасы, 2 – забалансовые запасы, 3 – отработанное пространство,
 4 – границы отработанных рудных тел, 5 – водоносные комплексы, 6 – горные выработки; состав пород:
 7 – доломиты, 8 – известняки, 9 – рифовые эпифитоновые известняки, 10 – глинистые известняки;
 11 – сплошь пропитанные нефтью участки пород, 12 – газопроявления

Кимберлитовая трубка «Удачная» приурочена к Вилуйско-Котуйской зоне разломов северо-западного простирания. Она состоит из двух рудных тел: Западного и Восточного. Разрез Удачинская свита ($\text{Є}_{1-2} \text{ud}$) вскрыт рядом гидрогеологических скважин. На участке проектируемых горных работ свита вскрыта в интервале 1008 м – 1479 м. Мощность удачинской свиты составляет 471 м. Сложена удачинская свита рифогенными эпифитоновыми известняками, обломочными известняками и доломитами фации «битая ракушка», реже – пористо-кавернозными доломитами, разнозернистыми известняковыми песчаниками, гравелитами, конгломератами. Разрез свиты настолько фациально изменчив (характерно для рифогенных образований), что корреляция отдельных пластов даже в близ расположенных скважинах невозможна. Нефтенасыщенность пород неравномерная, слабая. Породы слабо водонасыщены в виде увлажненности массива и редкого капеза насыщения, средне трещиноватые, трещины в основной

массе закрытые, субвертикальные. Отложения спорадически газонасыщены, количество нефти не значительно.

С отметки –640 м массив пород представлен кровельной частью удачинской свиты среднего кембрия (С_{1-2ид}), сложенным рифовыми эпифитоновыми известняками, чередующимися с карбонатной брекчией, мраморизованными известняками, глинистыми известняками, реже с глинистыми известковистыми доломитами, глинистыми пестроцветными известняками. Породы неравномерно пористо-кавернозные, на некоторых участках поры и каверны составляют до 10-15% объема породы и частично выполнены жидкой нефтью, кальцитом, реже ангидритом. В структурно-тектоническом отношении трубка «Удачная» приурочена к пересечению субширотной системы разломов с разломами северо-западного простирания. Месторождение состоит из двух кимберлитовых трубок, обособление которых происходит с глубины 250 м, в верхней части, на глубинах 0-250 м объединены в одно кимберлитовое тело. Расстояние между обособленными кимберлитовыми телами (западное и восточное) с глубиной возрастает: на отметке –480 м оно составляет 193 м, на отметке –680 м – 304 м. Разделяющий межтрубочный массив вмещающих карбонатных пород среднего и нижнего кембрия в пределах данного блока, в зоне сочленения диатрем сильно раздроблен и перемят. По степени трещиноватости породы сильно различаются. Вмещающие породы восточного рудного тела и межтрубья, как правило, относятся к сильнотрещиноватым (класс трещиноватости III-V), вмещающие породы западного рудного тела характеризуются, как правило, более низкой трещиноватостью (класс трещиноватости II-IV).

Тектоническая структура участка локализации трубки «Удачная» осложнена многочисленными субвертикальными (углы падения 60° и более), наклонными (углы падения 30-60°) и субгоризонтальными (углы падения менее 30°) разрывными нарушениями различной мощности и морфологии [1-5]. Разрывные нарушения представляют собой участки горного массива, которые в каждом конкретном случае могут быть выражены зонами повышенной трещиноватости, дробления, брекчирования, милонитизации, тектонического расщепления. Мощность таких зон колеблется от нескольких сантиметров до десяти и более метров. Разрывы первой группы создают блоковую делимость массива и служат вертикальными границами отдельных блоков, а разрывы последней группы являются их горизонтальными границами. Общая структура субвертикальных зон, развитых в пределах участка локализации трубки Удачная, следующая: в приконтактной части как в рудном теле, так и во вмещающих осадочных толщах развиты разрывы преимущественно северо-восточной ориентировки. Местами они образуют зоны сгущения и являются путями миграции газов и рассолов. По мере удаления от рудных тел определяющее значение в разрывной структуре приобретают разломы северо-западной ориентировки, которые в околоствольном пространстве сменяются разрывами север-северо-западного направления. Часть из них также насыщена газом, водой и нефтью. Наклонные разрывные нарушения менее развиты в массиве, нежели субвертикальные и субгоризонтальные. По внешнему виду они представляют собой зоны повышенной трещиноватости или расщепления мощностью от 0,7 м до 5-8 м, в редких случаях до 10 м. Большая часть зафиксированных наклонных зон располагается по периферии рудных тел (как в пределах кимберлитов, так и во вмещающих толщах), а углы падения направлены к их центральным частям трубок. Субгоризонтальные нарушения зафиксированы как во вмещающих отложениях, так и в рудных телах. Причем, в кимберлитах они представлены главным образом зонами повышенной трещиноватости мощностью 1-3 м, а во вмещающих – межслоевыми зонами повышенной трещиноватости или брекчирования мощностью до 5 м. В местах пересече-

ния пологих и субгоризонтальных зон нарушений (преимущественно в кровельных частях выработок) формируются вывалы и заколы.

Здесь следует отметить, что разрывные нарушения могут разнонаправленно влиять на фильтрационные свойства и, следовательно, газопроницаемость горных пород. Разнонаправленное действие разрывных нарушений на газопроницаемость горных пород может проявляться следующим образом. С ростом трещиноватости происходит увеличение фильтрационно-емкостных свойств и газопроницаемости в зонах разрывных нарушений и создаются условия для миграции свободных газов в породы вышележащей толщи с последующим возможным их рассеянием в массиве горных пород. Альтернативным вариантом является залечивание зон трещиноватости вторичными минералами: их газопроницаемость резко снижается, образуются «экранированные» участки массива горных пород, в пределах которых может происходить аккумуляция свободных газов и формирование локальных газонасыщенных зон, представляющих собой зоны газодинамической опасности при ведении горных работ в пределах таких локальных участков. Эти результаты исследований являются весьма важными с позиций возможного формирования в породах удачинской свиты в таких локальных зонах участков газонасыщенных вмещающих пород, которые будут представлять собой зоны, потенциально опасные по выбросам породы и газа при ведении подготовительных горных работ.

Проходка подготовительных выработок осуществляется буровзрывным способом с неэлектрической системой инициирования зарядов взрывчатого вещества. Бурение шпуров по забою производится двухстреловыми буровыми самоходными установками Sandvik DD-420, Sandvik DD-422i и пневмоперфораторами УТ-29-А и ПП-63.

Анализ результатов исследований газоносности по данным геологоразведочных работ с поверхности показал, что суммарное содержание сорбированных и свободных газов в породах месторождения трубки «Удачная» варьирует от долей единиц до $1,8-2,1 \text{ м}^3/\text{м}^3$ [6-13]. При этом установлено, что содержание сорбированных газов, как правило, выше, чем свободных. В составе как сорбированных, так и свободных газов основное место принадлежит азоту (30-60%) и углеводородам (24-45%), в подчиненных количествах представлены диоксид углерода (CO_2) и водород (H_2), генезис которого считается техногенным. Их содержания в свободных газах, как правило, не превышают первых процентов. Содержания углеводородных газов (УВГ) во вмещающих отложениях как по сорбированным, так и по свободным компонентам изменяются в широких пределах – от десятых долей до первых единиц $\text{м}^3/\text{м}^3$ породы. По данным геологоразведочных работ с поверхности установлено, что высокогазоносные интервалы пород приурочены, как правило, к нефтебитуминозным коллекторам. Средние значения газового фактора по свободным газам составляют $0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Величина газоносности массива пород может быть тесно увязана с его тектонической нарушенностью, т.е. возможностью миграции газов из смежного от точки опробования массива горных пород, что подтверждается спонтанными газопроявлениями при вскрытии приконтактных зон разных типов кимберлитов или рудных тел с вмещающими породами. Количество остаточных (связанных) газов в кимберлитах и осадочных породах месторождения варьирует в широких пределах: от тысячных долей до нескольких десятых $\text{м}^3/\text{т}$. На долю азота приходится, как правило, 70-85% от суммы газов. В подчиненных количествах находятся УВГ и CO_2 , которые составляют, соответственно, в среднем, 5-10% и 2-5% абс. Газоносность пород по углеводородным газам (УВГ) находится в широком диапазоне – от следов до $0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$. В составе УВГ фиксируется весь спектр гомологов метана, нередко до гексана включительно. На долю метана приходится от 20 до 100% от $\Sigma\text{УВГ}$. Одно-

возрастные отложений вмещающих пород характеризуются большими различиями в значениях газоносности пород по латерали. По данным опробования пород керногазоотборниками газоносность вмещающих пород и руд свободными и связанными (сорбированными и остаточными) газами до глубины –1080 м существенно различается как по вертикали, так и по латерали и может достигать $2,7 \text{ м}^3/\text{м}^3$. На основании анализа результатов исследований вмещающих пород удачинской свиты околотрубного и межтрубного массива месторождения трубки «Удачная» с помощью геологоразведочных скважин поземного бурения в отметках –750-820 м установлено, что породы характеризуются как породы слабой газообильности, которая достигает величины $0,54 \text{ м}^3/\text{час}$. Газоносность карбонатных пород удачинской свиты сильно зависит от структурно-тектонического и литолого-фациального факторов. Кимберлиты месторождения трубка «Удачная» в отметках исследований –750-820 м характеризуются как породы слабой газообильности. Газоносность кимберлитов месторождения сильно зависит от структурно-тектонического и петрографического факторов. По результатам исследований в скважинах дебиты пластовых газов в кимберлитах невелики – не превышали $0,1 \text{ м}^3/\text{час}$.

На подземном руднике «Удачный» 09.03.2022 года после проведения взрывных работ в подземной горной выработке сбойке № 3 с транспортным ортом горизонта – 630 м диспетчером рудника на мониторе регистратора аэрогазового состояния было зафиксировано повышение концентрации метана до 5,0% в забое сбойки № 3 после производства взрывных работ. К моменту прибытия в забой сбойки № 3 горного мастера концентрация метана снизилась до 3,5%. При осмотре после проведения взрывных работ забоя было обнаружено очень много отбитой горной породы. Было установлено, что после взрыва произошел вывал взорванной горной массы из забоя объемом около 280 м^3 (рисунок 2). Проходка сбойки № 3 и транспортного орта горизонта –630 м производилась буровзрывным способом. Сечение выработки арочной формы с проектной площадью сечения $28,3 \text{ м}^2$ (ширина $b = 5,56 \text{ м}$; высота $h = 5,48 \text{ м}$). Была произведена маркшейдерская съемка (сканирование) данного участка. В результате анализа съемки установлено: объем обнаженной полости в забое транспортного орта и сбойки № 3 после проведения БВР составил 340 м^3 (средняя длина 6,5 м; средняя ширина 8,0 м; средняя высота 6,5 м) при проектной уходке забоя выработки 2 м и объеме отбитой породы 59 м^3 . Породы в месте разрушения представлены отложениями удачинской свиты среднего кембрия (Є1-2 ud), в основной массе сложенным рифовыми эпифитоновыми известняками, чередующимися с карбонатной брекчией, мраморизованными известняками, глинистыми известняками, реже с глинистыми известковистыми доломитами, глинистыми пестроцветными известняками. Отложения с нарушенным залеганием, неравномерно окремненные. Диапазон изменения прочности пород при одноосном сжатии 55,8-108,2 МПа в среднем составляет $\sigma_{сж} = 86,7 \text{ МПа}$ с отнесением к средней прочности и прочным породам. В интервале развиты «сводовые» трещины, имеющие листрический профиль, степень трещиноватости средняя – 5-7 трещин на погонный метр. По интервалу развиты поры и каверны размерами от 5 см до 8 см, единичные достигают до 30,0-50,0 см по длинной оси. Пустоты частично заполнены природными рассолами, по стенкам обильные пленочные покрытия нефти, щетки, кристаллы кальцита и галита, друзы гипса и ангидрит-баритовой агрегации. Водо- рассолопроявление – в виде слабых струйно-капельных выделений с кровли и бортов выработки. Нефтепроявления – в виде редких натеков по бортам и кровле выработки. Забоем вскрыто тектоническое нарушение, выполненное кимберлитовой брекчией мощностью 0,4 м с азимутом простирания 65 градусов и углом падения 85-90 градусов. Видимая мощность кимберлитовой брекчии 0,40 м. Из рисунка 3 видно, что в полости разрушения развита сферически – радиальная трещиноватость,

характерная для полостей выбросов породы и газа [14-18]. На рисунке 4 приведена фотография полости разрушения забоя техсбойки № 3. Как видно из рисунка, 4 стенки полости разбиты характерной радиально-концентрической трещиноватостью. Характер разрушения известняков – наличие чешуеобразных пластин, оконтуривающих полость, свидетельствующих о разрушении приконтурного массива по механизму слоистого отрыва при распространении волны дробления. Кроме этого, в забое технологической сбойки № 3 наблюдается превышение величиной коэффициента использования шпуров (к.и.ш.) значения, равного единице. Как уже отмечалось выше, при разрушении пород в забое технологической сбойки № 3 было зафиксировано интенсивное газовыделение. Все эти факты позволяет сделать заключение о том, что в забое технологической сбойки № 3 произошло газодинамическое явление в виде выброса известняков и газа, инициированное буровзрывными работами (взрывным импульсом).

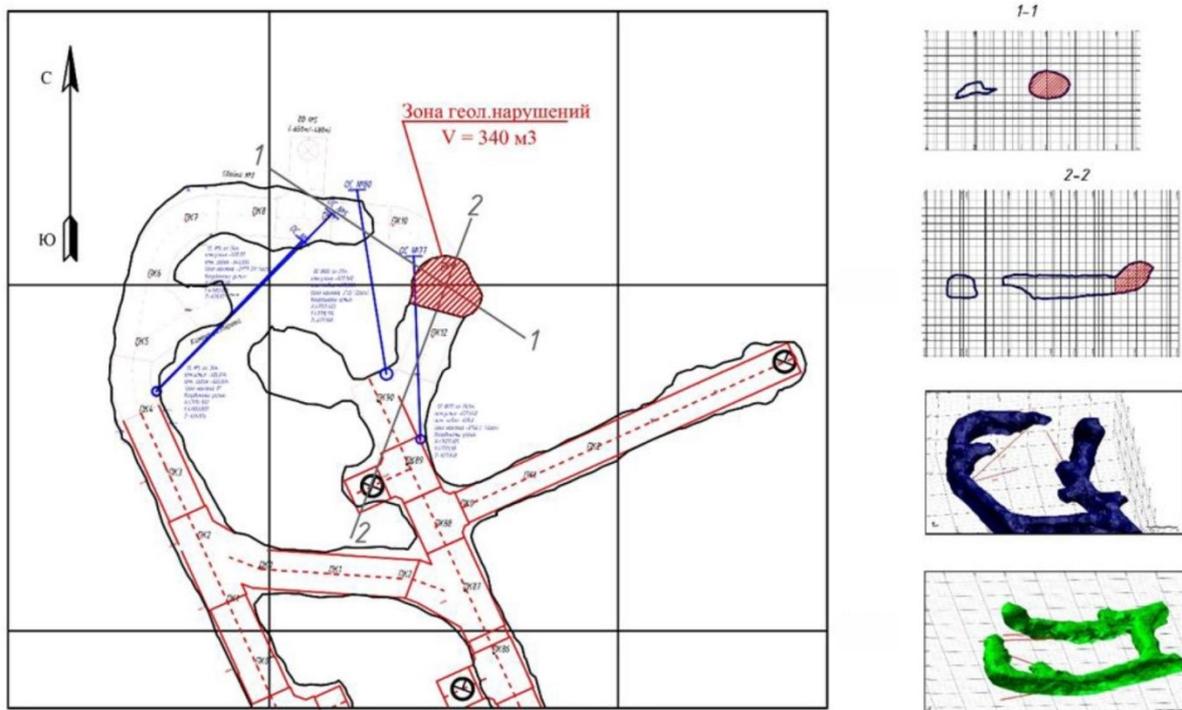


Рис. 2. Выкопировка из плана ведения горных работ на момент производства буровзрывных работ в сбойке № 3 с транспортным ортом горизонта –630 м (подземный рудник «Удачный»)

Второй случай разрушения приконтурного массива был зафиксирован при проходке выработки «Пункт отстоя самоходного оборудования (СО)» горизонта –630 м 08.04.2022 г. при производстве буровзрывных работ второй фазы, объем отбитой горной массы превысил предусмотренное расчетом в паспорте БВР. После выполнения работ по зачистке выработки от отбитой горной массы в верхней левой части забоя зафиксирован куполообразный вывал (рисунок 5).

Проходка выработки «Пункт отстоя самоходного оборудования (СО)» производилась на основании утвержденных паспортов БВР, предусматривающих разнесение во времени на 2 фазы (1-я фаза – создание дополнительной обнаженной поверхности в виде врубовой, 2-я фаза – доведение сечения выработки до проектных размеров). При обследовании забоя выработки на месте производства работ было установлено, что забоем выработки по направлению проходки вскрываются породы удачинской свиты (ϵ_{1-2ud}), сложенные мраморизованными известняками светло-серого до грязно-белого

окраса с редкими, неотчетливыми, невыдержанными, маломощными, субгоризонтальными прослоями темно-зеленых и коричневатато-серых известняков.

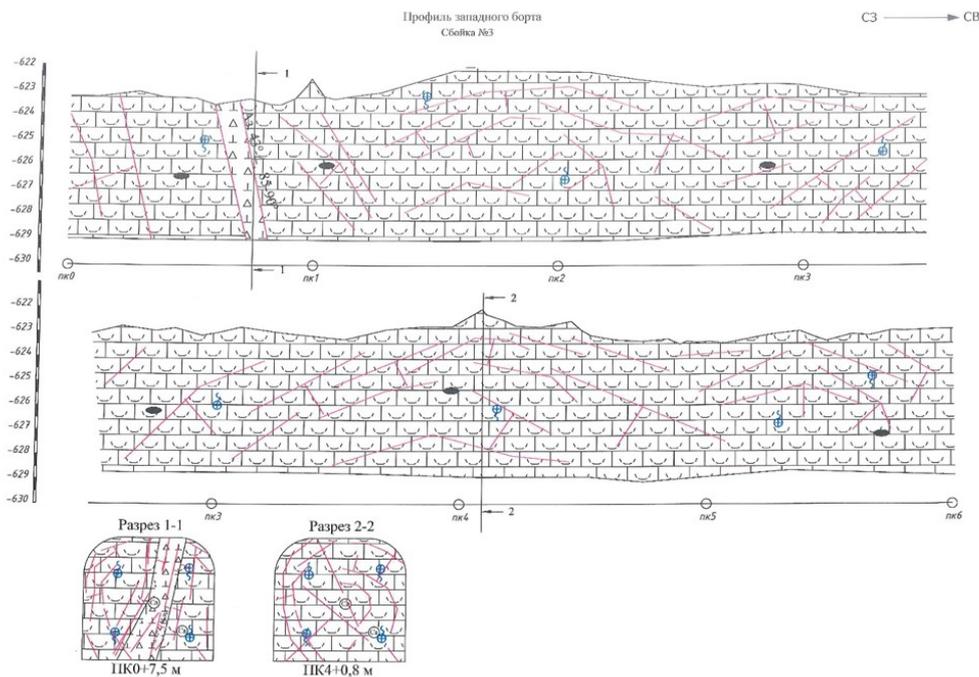


Рис. 3. Геологический разрез в месте разрушения известняков в технологической сбойке № 3 и транспортного орта горизонта –630 м (подземный рудник «Удачный»)



Рис. 4. Фотография стенок полости разрушения в забое технологической сбойки № 3 горизонта –630 м (подземный рудник «Удачный»)

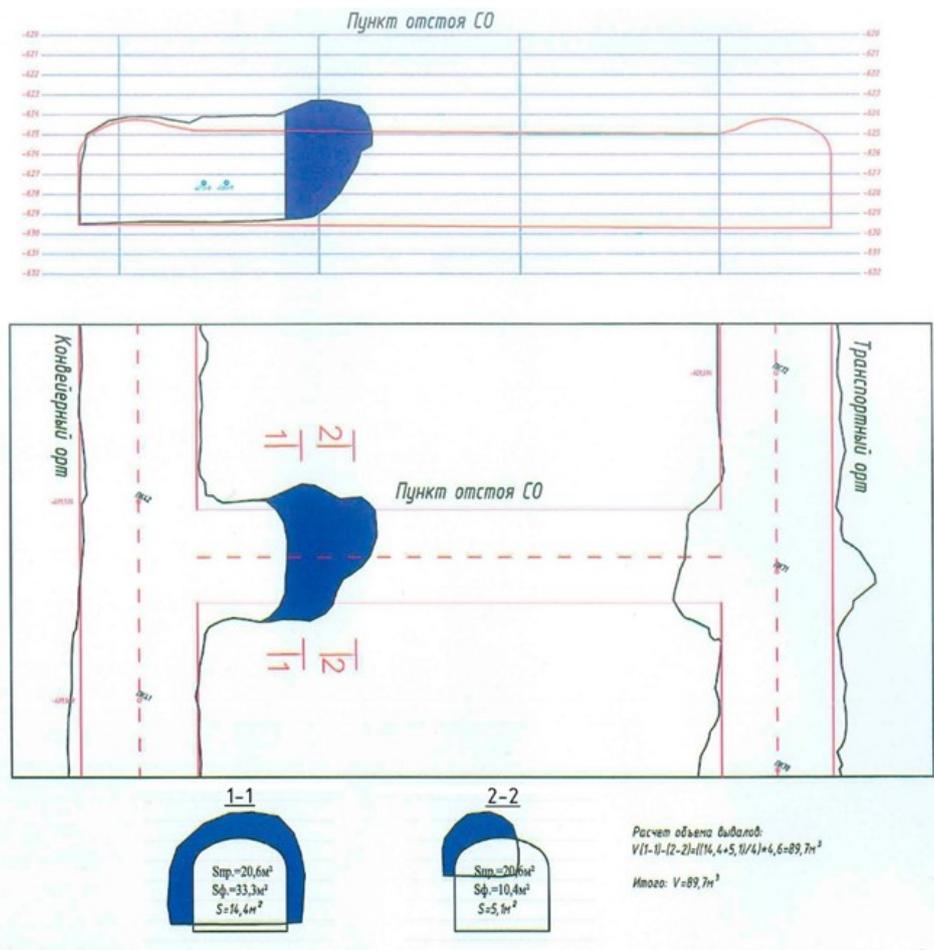


Рис. 5. Положение полости выброса породы и газа в забое пункта отстоя самоходного оборудования (СО) горизонта –630 м (подземный рудник «Удачный»)

Известняки пористо-кавернозные, каверны размером от 1-3 мм до 1,0 см по длинной оси, по стенкам которых развиты кристаллы кальцита. По порам распространены включения дисперсной нефти, образующие натеки на бортах и в кровле выработки. Как и в предыдущем случае, отмечается сферически-радиальная трещиноватость, образующая скорлуповато-плитчатые отдельные после проведения БВР (рисунок 6). Система трещин округлой формы, развитая в пласте известняков, разбивает породу на тонкую плитку (толщиной 3,0-10,0 см). Объем разрушенной породы ориентировочно составил 89,7 м³ или примерно 238 т. По визуальным признакам и характеру разрушения известняков в рассмотренных двух случаях разрушения приконтурного массива данные инциденты следует относить к выбросам известняков и газа, инициированных буровзрывными работами. Такими признаками являются следующие:

- наличие полости разрушения приконтурного массива овальной формы;
- характер разрушения известняков: наличие чешуеобразных пластин, ооконтуривающих полость, свидетельствующих о разрушении приконтурного массива по механизму послойного отрыва при распространении волны дробления;
- наличие характерной радиально-концентрической трещиноватости на стенках полости;
- локальность проявления подобных разрушений приконтурного массива горных выработок;
- превышение величиной коэффициента использования шпуров (к.и.ш.) значения, равного единице.

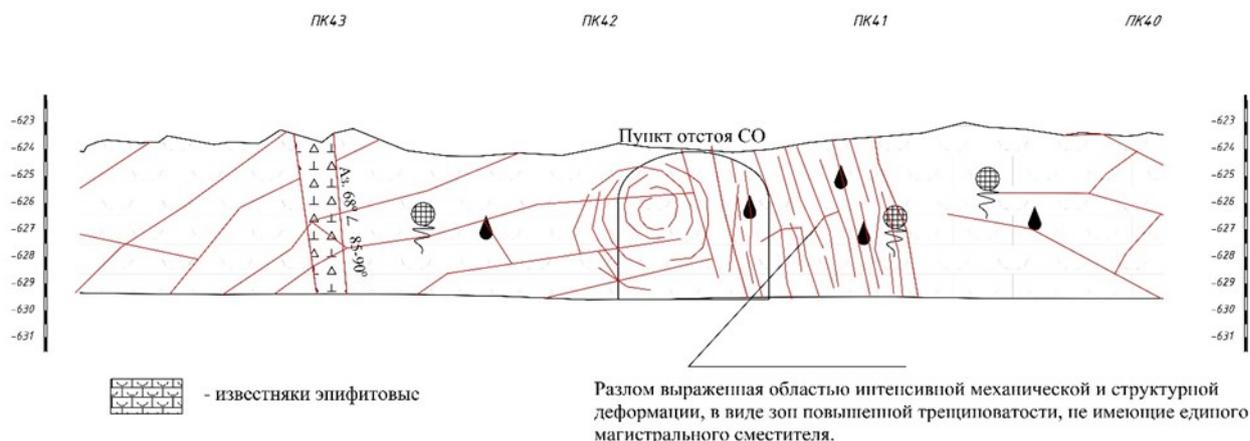


Рис. 6. Геологический разрез в месте разрушения известняков по конвейерному орту горизонта –630 м (подземный рудник «Удачный»)

Здесь следует отметить еще один важный момент. При анализе графических материалов по трассам проходки горных выработок во вмещающих породах на горизонте –630 м отмечались и другие случаи разрушения приконтурной части массива с глубиной полостей в боках выработок до 2,5 м.

На основании анализа случаев газодинамической активности вмещающих пород, механизма протекания и результатов процессов разрушения приконтурной части массива горных пород на горизонте –630 м при проходке подготовительных выработок в условиях подземного рудника «Удачный» можно сделать следующие выводы.

1. При проведении подготовительных выработок во вмещающих породах на горизонте –630 м техсбойки № 3 и пункта отстоя самоходного оборудования произошли газодинамические явления в виде выбросов известняка и газа, которые представляют собой процесс быстроразвивающегося разрушения приконтурного массива пород (известняков) с отбросом (смещением) горной массы, выделением газа в горную выработку и образованием в массиве полости. В силу внезапности, возможной большой мощности, наличие поражающих факторов в виде породно-газового потока, выделения большого объема горючих газов и ударной воздушной волны выбросы известняков и газа могут представлять серьезную угрозу жизни персонала, нарушать проектные контуры горных выработок и ритмичность работы рудника, приводить к дополнительным затратам на ликвидацию последствий выбросов известняка и газа.

2. Выбросы известняков и газа произошли при проходке подготовительных выработок буровзрывным способом. При проходке подготовительных выработок буровзрывным способом выброс известняков и газа при вскрытии выбросоопасных пород был инициирован взрывным импульсом, произошел без присутствия персонала и привел к нарушению проектных параметров выработок. Применяемая технология ведения буровзрывных работ при проходке пункта отстоя самоходного оборудования с разнесением во времени на 2 фазы (1-я фаза – создание дополнительной обнаженной поверхности в виде врубовой полости, 2-я фаза – доведение сечения выработки до проектных размеров) не исключает проявление выбросов известняков и газа.

3. Установлено, что выбросы известняков и газа локализованы в породах Удачинской свиты (ϵ_{1-2ud}), сложенных мраморизованными известняками светло-серого до грязно-белого окраса с редким, неотчетливыми, невыдержанными, маломощными, субгоризонтальными прослоями темно-зеленых и коричневато-серых известняков. Известняки пористо-кавернозные, каверны размером от 1-3 мм до 1,0 см и более по длинной оси, по стенкам которых развиты кристаллы кальцита. По порам распространены

включения дисперсной нефти, образующие натёки на бортах и в кровле выработки. На данной стадии исследований можно предполагать, что данные породы являются коллекторами связанного газа и являются потенциально опасными по выбросам известняков и газа.

4. Анализ геологических условий проявления выбросов известняков и газа не дал однозначного ответа о приуроченности очагов выбросов к зонам разрывных тектонических нарушений. В связи с недостаточной изученностью этот вопрос требует дальнейшего детального изучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-45-596017 «Геохимическая и геодинамическая эволюция газовой фазы месторождений калийных солей как основа безопасного недропользования»

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Егоров К.Н., Мельников А.И. Структурно-вещественная эволюция системы кимберлитовых тел трубки Удачная // Руды и металлы. – 2013. – № 1. – С. 53-59.
2. Дроздов А.В., Мельников А.И. Оценка структурно-тектонической обстановки – основа газогидродинамического районирования месторождения (на примере трубки Удачной) // Маркшейдерия и недропользование. – 2011. – № 4 (54). – С. 35-39.
3. Дроздов А.В., Мельников А.И. Мероприятия по борьбе с газодинамическими явлениями при строительстве подземного рудника «Удачный» // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 6 (89). – С. 87-95.
4. Дроздов А.В., Мельников А.И. Особенности строения многофазных кимберлитовых трубок (на примере трубки Удачной) // Маркшейдерия и недропользование. – 2009. – № 1. – С. 31-38.
5. Дроздов А.В., Мельников А.И. Роль разрывных дислокаций в обводнении алмазодобывающих рудников Якутии // Изв. Сибирского отд-ния РАЕН Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2014. – № 2 (45). – С. 71-81.
6. Дроздов А.В. Влияние природной газоносности трубки «Удачная» на ход строительства алмазного рудника // Горный журнал. – 2009. – № 6. – С. 44-48.
7. Шепелева Н.Н., Краевский В.И., Федоров В.И. Взаимосвязь битумо- и газонасыщенности осадочной толщи пород Далдыно-Алаakitского района // Геологические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: Экспресс-информация / ВИЭМС. – М., 1984. – Вып. 6. – С. 15-25.
8. Лобанов В.В., Сороченко М.К., Боланев А.В., Письменный А.В. Обоснование технологических мероприятий по обеспечению безопасности горных работ на руднике «Удачный» в условиях нефтегазопроявлений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 2. – С. 77-88.
9. Дроздов А.В., Мельников А.И. Прогноз нефтегазоопасных зон на руднике «Удачный» (Якутия) с использованием геосистемного подхода // Изв. Сибирского отд-ния РАЕН Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2015. – № 4 (53). – С. 37-49.
10. Матвиенко Н.Г. Газобезопасность освоения рудных месторождений / Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 7. – С. 31-34.
11. Матвиенко Н.Г., Зимаков Б.М. Основы безопасного освоения газоносных рудных месторождений // Горн. журн. – 2005. – № 4. – С. 78-80.
12. Матвиенко Н.Г. Проблемы газобезопасности алмазных рудников Якутии // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Мирный-2001» – М., 2002. – С. 169-174.
13. Матвиенко Н.Г., Шульруфер Л.М. Прогнозирование газопритоков при освоении газоводонефтеносных твердых полезных ископаемых. – М.: ИПКОН АН СССР, 1985. – 161 с.: ил.
14. Николин В.И., Беркович И.М., Решетняк Ю.В. Проведение выработок по выбросоопасным породам на шахте «Щегловка – Глубокая» // Шахтное строительство. – 1966. – № 9. – С. 20-23.
15. Николин В.И., Недвига С.Н. Выбросы породы и борьба с ними // Безопасность труда в промышленности. – 1968. – № 8. – С.35-36.
16. Степанович П.Я., Николин В.И. Опыт проведения выработок в выбросоопасных породах Центрального района Донбасса // Уголь. – 1966. – № 4. – С. 51-54.
17. Николин В.И., Меликсетов С.С., Беркович И.М. Выбросы породы и газа. – М.: Недра, 1967. – 80 с.
18. Прогноз и предотвращение выбросов пород и газа / В.Н. Потураев, А.Н. Зорин, В.Е. Забигаило [и др.]. – Киев: Наук. Думка. – 1986. – 158 с.: ил.

**ГАЗОНОСНОСТЬ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОРОД КРОВЛИ ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК,
ПРОЙДЕННЫХ В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ
КАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ НА ТРЕТЬЕМ КАЛИЙНОМ ПЛАСТЕ
РУДНИКА ЗРУ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»**

Н.А. Литвиновская

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. В статье представлены результаты исследования газоносности и газодинамических характеристик пород кровли горных выработок, пройденных в выработанном пространстве камерной системы разработки. Исследования проводились на Третьем калийном пласте ЗРУ ОАО «Беларуськалий». В результате исследования выявлена зависимость газоносности по свободным газам и газодинамических характеристик от условий подработки пород кровли горных выработок и установлено влияние подработки на формирование очагов возможных ГДЯ техногенного характера в породах кровли подготовительных горных выработок.

Ключевые слова: газоносность; начальная скорость газовыделения; давление газа в массиве; соляные породы; выработанное пространство; камерная система разработки.

Введение

Интенсивная эксплуатация ресурсов калийных месторождений приводит к истощению кондиционных запасов и необходимости вводить в эксплуатацию забалансовые руды. Так были введены в эксплуатацию I и IV калийные горизонты Старобинского месторождения. Помимо этого вводятся запасы оставленных целиков на тех участках, где применялась камерная система разработки.

В условиях рудника ЗРУ ОАО «Беларуськалий» на Третьем калийном пласте камерной системой разработки были отработаны запасы слоев 2, 2-3 и 3, а запасы 4 сильвинитового слоя законсервированы на более чем 25 лет. В настоящее время на горизонте –620 м ведется подготовка к очистной выемке запасов 4 сильвинитового слоя на 1а западном выемочном столбе. Данный участок был подработан камерной системой более сорока лет назад.

В настоящее время мировой опыт подземной разработки месторождений калийных солей, а также опыт разработки калийных пластов в условиях Старобинского месторождения калийных солей, свидетельствует о возможности формирования очагов газодинамических явлений при подработке и надработке газоносных пород кровли и почвы горных выработок [1-8]. В этой связи актуальной является задача оценки газоносности по свободным газам и газодинамических характеристик пород кровли горных выработок, проходка которых осуществляется в выработанном пространстве камерной системы разработки для последующей оценки возможности развития газодинамических явлений и разработки параметров профилактического дегазационного бурения.

Методика проведения исследований

Исследования газоносности и газодинамических характеристик пород кровли подготовительных горных выработок в условиях подработки проводились в транспортном и конвейерном штреках 1а западного выемочного столба (рис. 1).

Исследования проводились в различных горнотехнических ситуациях: подработка трехходовой камерой, подработка двухходовой камерой, междукамерный целик, места сопряжений штрек-сбойка, широкие целики, оставленные при проведении горных ра-

бот по слоям 2, 2-3, 3, подработка камерами около широких целиков. Всего пробурено 10 исследовательских скважин глубиной до 6,0 м.

Исследования проводились методом герметизации шпуров, замеров начальной скорости газовыделения и давления свободных газов в породах кровли горных выработок с отбором проб свободного газа [6]. Исследование проб свободного газа на компонентный состав проводились на газовом хроматографе 450-GC компании «Varian, Inc».

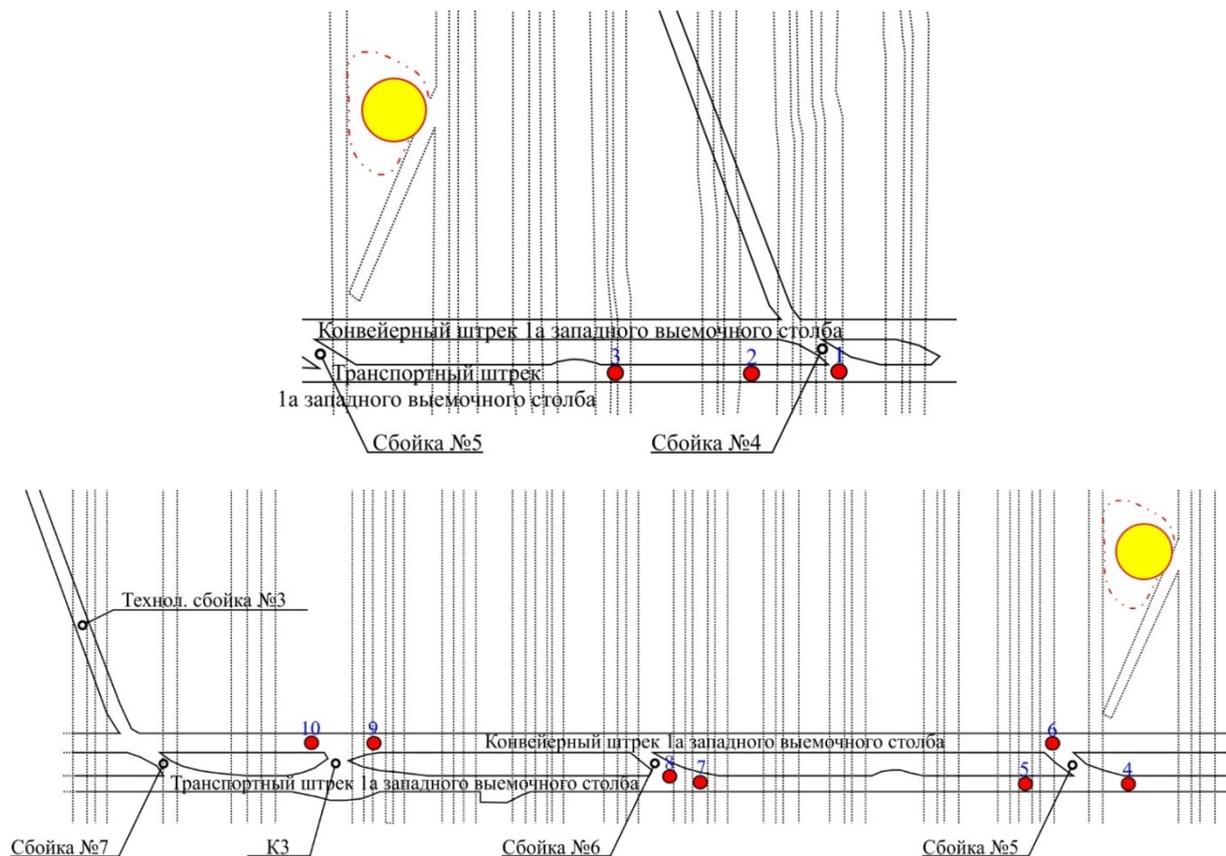


Рис. 1. Места проведения исследований газоносности и газодинамических характеристик пород кровли в условиях подработки 4 сильвинитового слоя горными работами по слоям 2, 2-3, 3 Третьего калийного пласта

Результаты исследований

Результаты исследования газоносности и газодинамических характеристик пород кровли по всем скважинам вне зависимости от условий представлены в таблице 1.

Анализ полученных данных для скважины №3, пробуренной в месте сопряжения выработки с двухходовой камерой показывает, что газоносность соляных пород здесь незначительна, а газодинамические характеристики говорят, что газодинамическое явление маловероятно.

Исследовательские скважины № 2, № 4 и № 10 пробурены в широких междукamerных целиках, в целом показатели газоносности и газодинамических характеристик для таких участков также говорят о маловероятном развитии газодинамических явлений. Вместе с тем наибольшие значения начальной скорости газовыделения из этих трех скважин зафиксированы в скважине № 2. Эта скважина пробурена в наименее широком из трех целиков.

Скважина № 5 пробурена в месте пересечения линейной выработки и трехходовой камеры. Показатели газоносности и газодинамических характеристик в этой скважине

оказались достаточно высокими, что говорит о возможном развитии газодинамических явлений. При этом с глубиной скважины растут и значения газоносности. Максимальные показатели зафиксированы на глубине 3,5-4,0 м от кровли транспортного штрека (рис. 2). Для этой же глубины зафиксированы максимальные значения начальной скорости газовыделения и давления свободного газа.

Таблица 1

Газоносность и газодинамические характеристики пород кровли выработок в условиях 1а западного выемочного столба

№ скв.	газоносность		начальная скорость газовыделения		давление газа в массиве	
	min	max	min	max	min	max
	среднее		среднее		среднее	
1	0,05	6,01	0,01	5,19	0,19	0,313
	1,37		1,18		0,213	
2	0,05	0,23	0,01	0,57	0,19	0,191
	0,12		0,17		0,191	
3	0,05	0,14	0,01	0,41	0,19	0,191
	0,09		0,1		0,19	
4	0,05	0,17	0,01	0,29	0,19	0,19
	0,1		0,11		0,19	
5	0,05	6,39	0,01	3,77	0,19	0,323
	1,17		0,6		0,209	
6	0,11	8,61	0,01	6,18	0,19	0,38
	1,77		1,02		0,22	
7	0,05	0,14	0,01	0,2	0,19	0,19
	0,06		0,06		0,19	
8	0,05	2,34	0,01	1,82	0,19	0,23
	0,68		0,52		0,2	
9	0,11	4,99	0,01	3,87	0,19	0,288
	1,39		0,95		0,208	
10	0,11	0,23	0,01	0,38	0,19	0,192
	0,12		0,05		0,19	

Скважины № 1, №№ 6-9 также пробурены на пересечении выработок и трехходовых камер, однако в отличие от скважины № 5, эти скважины пробурены в местах расширения, на сопряжении штреков и технологических сбоек. Здесь пролет выработок шире и создаются благоприятные условия для расслоения пород кровли и аккумуляции свободного газа. При этом во всех скважинах, кроме скважины № 7, зафиксированы повышенные значения газоносности и газодинамических характеристик, свидетельствующие о возможности развития газодинамического явления. В этих скважинах, так же как и в скважине № 5, повышенные значения газоносности и газодинамических характеристик начинались с расстояния 3,5 м от кровли горных выработок. Это необходимо учитывать при оценке возможности развития ГДЯ.

Что касается скважины № 7, незначительные показатели газоносности и газодинамических характеристик для нее связаны, по-видимому, с частичной дегазацией пород из-за образования секущих трещин в кровле выработки.

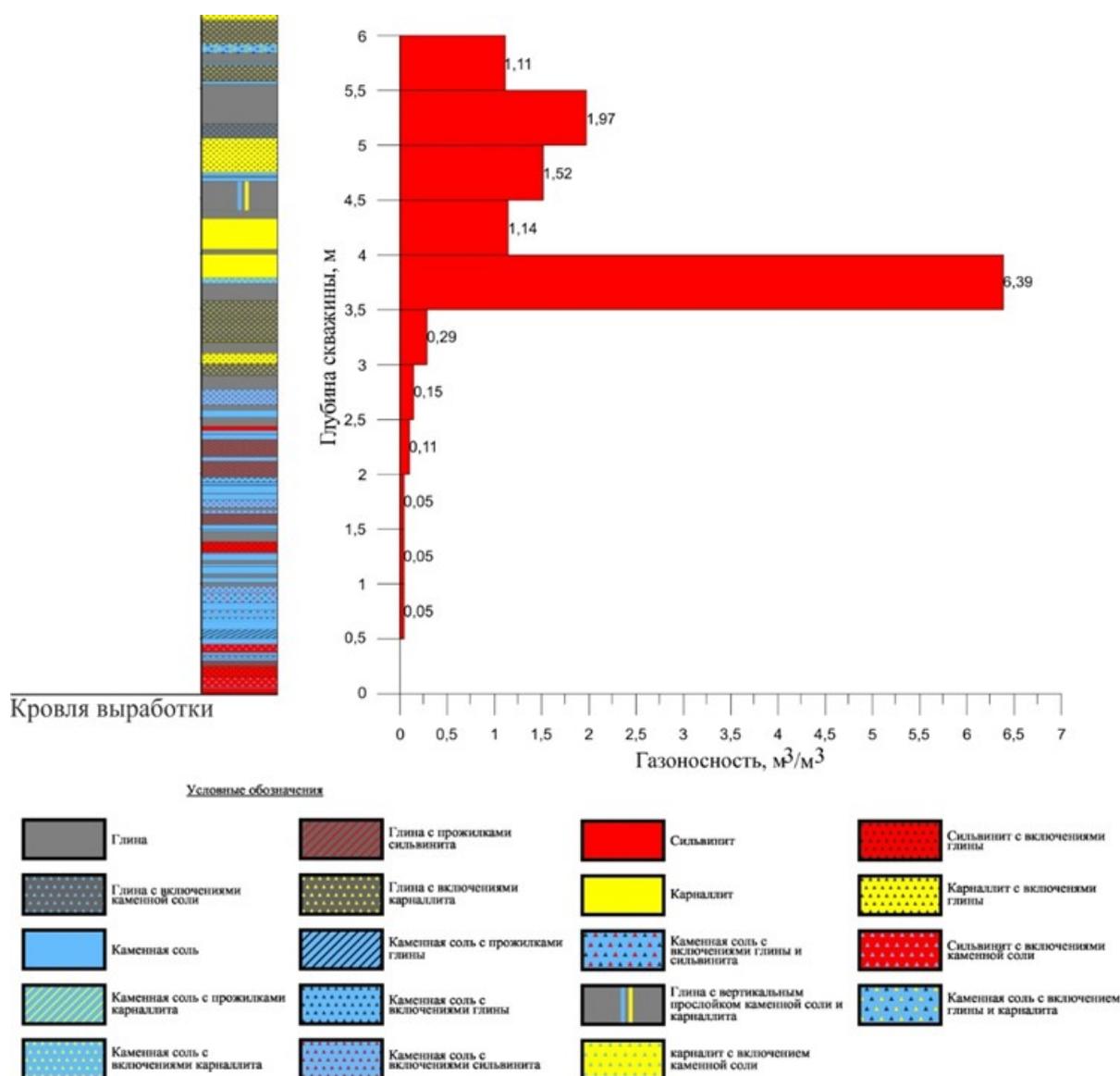


Рис. 2. Диаграмма распределения газоносности по свободным газам в породах кровли на линейном участке транспортного штрека 1а западного выемочного столба в месте пересечения центрального хода 3-ходовой очистной камеры (исследовательская скважина № 5)

Заключение

Результаты шахтных экспериментальных исследований газоносности и газодинамических характеристик пород кровли подготовительных выработок, пройденных в выработанном пространстве камерной системы разработки на Третьем калийном пласте рудника 3 РУ ОАО «Беларуськалий», позволяют сделать следующие выводы.

1. На линейных участках подготовительных выработок породы кровли в местах пересечения междукамерных целиков между 2-х и 3-х ходовыми очистными камерами характеризуются низкими показателями газоносности и газодинамических характеристик пород кровли.

2. В местах сопряжений с 2-х ходовыми очистными камерами характеризуются низкими показателями газоносности по свободным газам, давления свободных газов и начальной скорости газовыделения из пород кровли. Количественные характеристики газоносности пород кровли по свободным газам, давления свободных газов и начальной скорости газовыделения свидетельствуют о низкой газодинамической опасности пород кровли в местах сопряжений с 2-х ходовыми очистными камерами.

3. В местах сопряжений с 3-х ходовыми очистными камерами характеризуются высокими показателями газоносности по свободным газам, давления свободных газов и начальной скорости газовыделения из пород кровли. Количественные характеристики газоносности пород кровли по свободным газам, давления свободных газов и начальной скорости газовыделения свидетельствуют о возможной газодинамической опасности пород кровли в местах сопряжений с 3-х ходовыми очистными камерами.

4. В местах сопряжений штреков с технологическими сбойками, которые расположены на пересечении с 3-х ходовыми очистными камерами, породы кровли характеризуются наиболее высокими показателями газоносности по свободным газам, давления свободных газов и начальной скорости газовыделения из пород кровли.

5. В местах сопряжений с технологическими сбойками между штреками, расположенных в междукамерных целиках, породы кровли подготовительных выработок характеризуются высокими показателями газоносности по свободным газам, давления свободных газов и начальной скорости газовыделения из пород кровли.

6. При подготовке к отработке 4 сильвинитового слоя Третьего калийного пласта на ранее отработанных камерной системой разработки по слоям 1, 1-2, 2, 2-3 и 3 участках шахтного поля рудника 3 РУ для безопасной проходки подготовительных выработок по выработанному пространству камерной системы разработки в установленных местах возможной газодинамической опасности пород кровли целесообразно производить профилактическое дегазационное бурение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений солей // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 601-609. – DOI: 10.31897/PMI.2020.6.1.
2. Andreyko S.S., Lyalina T.A. Rockburst from floors // Soils and Rocks. – 2019. – V. 42, № 1. – P. 77-82. DOI: 10.28927/SR.421077.
3. Litvinovskaya N.A., Andreiko S.S. Modeling sudden failure of floor of underground excavations in undermined salt rock mass // Eurasian mining. – 2015. – № 2 (24). – P. 15-17.

4. Береснев С.П., Сенюк В.В., Гончар В.И., Андрейко С.С., Литвиновская Н.А. Исследование механизма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.31-33.
5. Андрейко С.С., Лукьянец Е.В., Литвиновская Н.А., Нестеров Е.А., Бобров Д.А., Поляков А.Л., Лутович Е.А. Параметры профилактической дегазации пород почвы горных выработок при слоевой отработке третьего калийного пласта на рудниках ОАО «Беларуськалий» // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3.– С. 280-290. – DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.9.
6. Андрейко С.С., Бобров Д.А., Нестеров Е.А., Лукьянец Е.В. Оценка газоносности и газодинамических характеристик пород соляных и глинисто-карбонатных пачек на шахтном поле рудника второго рудоуправления ОАО «Беларуськалий» // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 270-279. – DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.7.
7. Андрейко С.С., Иванов О.В., Бикмаева Т.А. Разработка математической модели метода прогнозирования внезапных разрушений пород почвы горных выработок при очистной выемке карналлитового пласта в условиях Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 4. – С. 191-196.
8. Андрейко С.С., Лукьянец Е.В., Литвиновская Н.А., Нестеров Е.А., Бобров Д.А., Поляков А.Л., Лутович Е.А. Параметры профилактической дегазации пород почвы горных выработок при слоевой отработке третьего калийного пласта на рудниках ОАО «Беларуськалий» // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3.– С. 280-290. – DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.9.

УДК 622.831.322

DOI:10.7242/echo.2023.1.18

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ СВОБОДНЫХ ГАЗОВ В ПОРОДАХ ПЛАСТА КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ГРЕМЯЧИНСКОГО ГОКА

В.О. Лядов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. В статье представлены подробные результаты исследования компонентного состава свободного газа, содержащегося в породах шахтного поля Гремячинского горно-обогатительного комбината. Отбор образцов для анализа компонентного состава проводился совмещенно с бурением геологоразведочных скважин из подземных горных выработок рудника. В результате исследования была выявлена зависимость содержания в свободных газах горючих компонентов и тяжелых углеводородов метанового ряда от типа пород, из которых отбирались пробы свободных газов. Данные исследования будут использованы при разработке и актуализации рекомендаций по безопасному ведению горных работ на рудниках Гремячинского горно-обогатительного комбината. Полученные характеристики компонентного состава свободных газов могут быть использованы для индикации типа пород в процессе бурения подземных геологоразведочных скважин.

Ключевые слова: компонентный состав, свободные газы, геологоразведочная скважина, Гремячинское месторождение, карналлит, сильвинит, каменная соль.

Введение

Мировой опыт разработки месторождений калийных солей показывает практически повсеместное наличие опасности возникновения газодинамических явлений в виде выбросов пород и газа на подавляющем большинстве рудников, в число которых также входит и подземный рудник Гремячинского горно-обогатительного комбината. С целью прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям, в условиях рудника бурение геологоразведочных скважин сопровождается мониторингом газоносности продуктивных пластов, а также отбором проб свободно-

го газа для дальнейшего исследования его компонентного состава. Анализ компонентного состава газа позволяет оценить опасность в случае интенсивного газоразделения в выработку при ведении горных работ, а также используется при изучении механизмов образования газодинамических явлений в условиях рассматриваемого рудника [1-5, 10-12].

В условиях Гремячинского месторождения калийных солей ведется его эксплуатационная разведка путем бурения подземных геологоразведочных скважин в горных выработках. В свою очередь, для оценки газоносности пород продуктивной толщи необходимо выполнить опытные исследования возможности определения компонентного состава выделяющихся при бурении скважин свободных газов из сильвинитовых и карналлитовых пород пласта калийно-магниевых солей для дальнейшей корректировки объемов и параметров профилактических мероприятий при ведении горных работ в условиях Гремячинского горно-обогатительного комбината.

Методика проведения исследований

Опытные исследования возможности определения компонентного состава свободных газов в породах пласта калийно-магниевых солей в условиях Гремячинского месторождения калийных солей заключались в отборе проб свободных газов, выделяющихся из бурового раствора при бурении подземных геологоразведочных скважин № 1 и № 2 в буровой нише главного северо-западного вентиляционного штрека (рис. 1) и № 3 в главном северо-восточном закладочном штреке рудника Гремячинского горно-обогатительного комбината по сильвинитовым и карналлитовым породам, и дальнейшем определении компонентного состава отобранных свободных газов с помощью газовых хроматографов [3, 6-9].

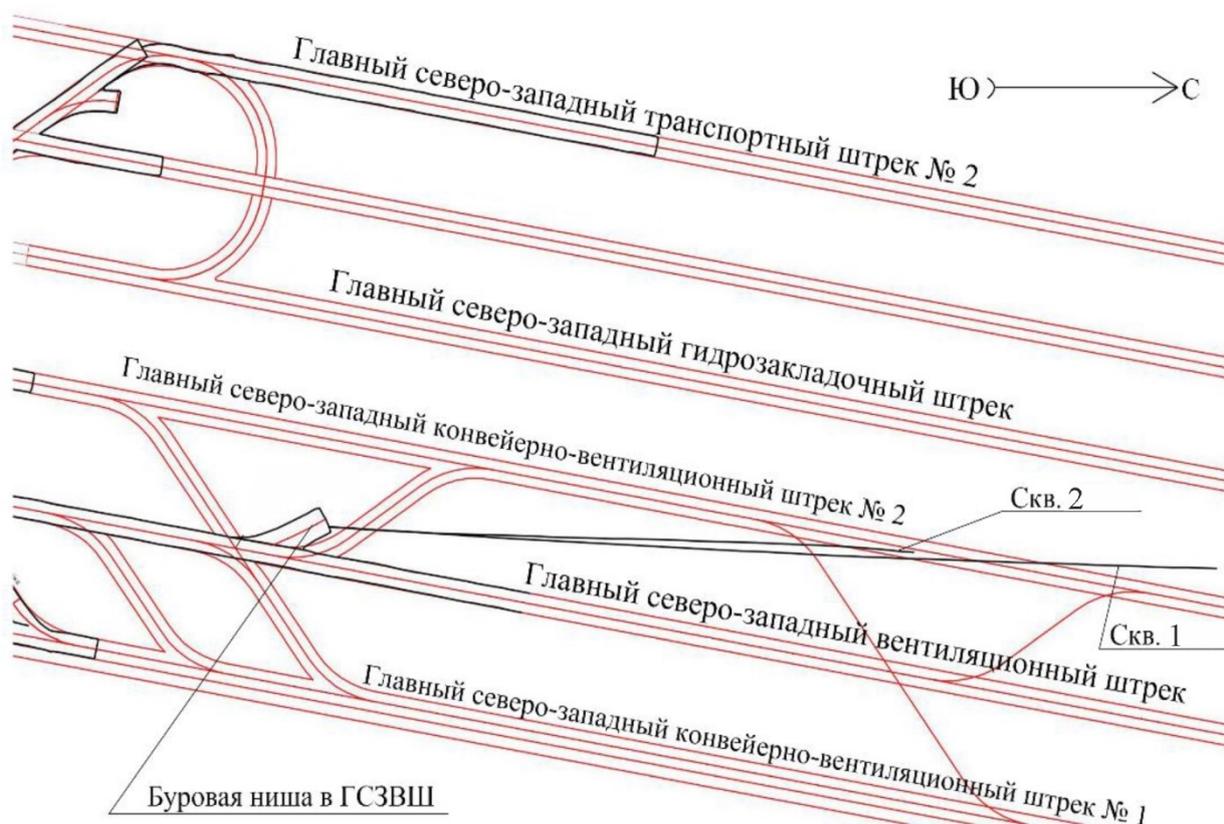


Рис. 1. План горных выработок с положением скважин № 1 и № 2

Всего было отобрано 15 проб свободных газов при их выделении из бурового раствора, 9 проб на двух интервалах при бурении скважины эксплуатационной разведки № 1 и 3 пробы при бурении скважины № 2 (рис. 2), а также 3 пробы при бурении подземной геологоразведочной скважины № 3. Из всего числа проб 9 образцов отобраны при бурении по карналлитовым породам и по 3 пробы – по сильвиниту и каменной соли. Пробы отбирались непосредственно у истечения выходящего бурового раствора из устья скважины.

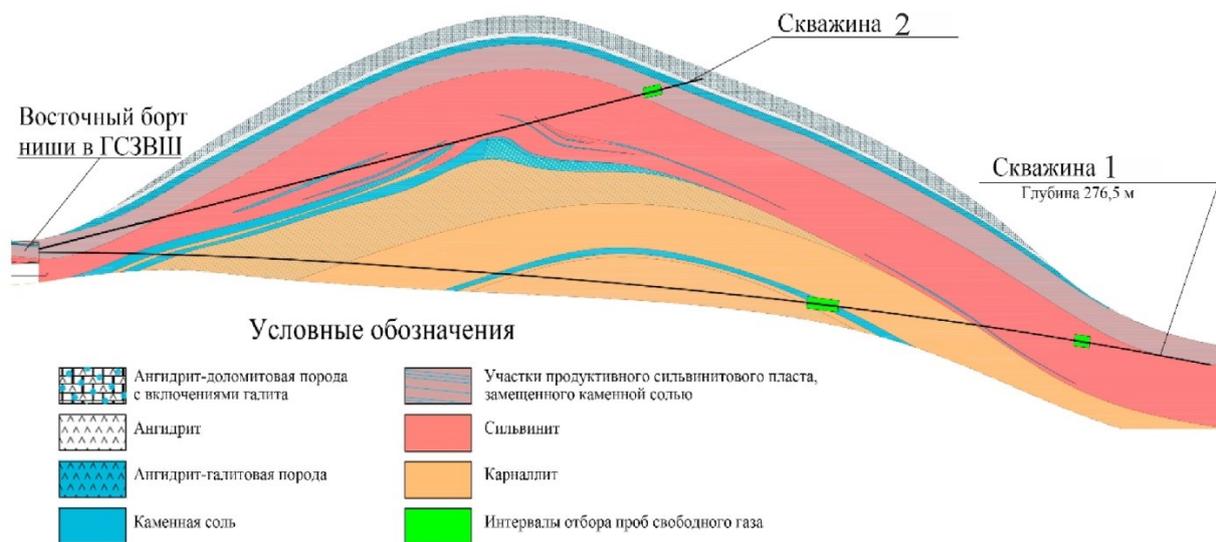


Рис. 2. Геологический профиль по осям бурения скважин № 1 и № 2

Результаты исследований

Как показывают полученные результаты исследований компонентного состава свободного газа в различных соляных породах, большее количество метана и водорода характерно для карналлитовых пород, в то время как тяжелые углеводороды метанового ряда чаще встречаются в сильвинитах. В связи с этим имеет смысл разделение проб, взятых из пород различного типа.

В таблице 1 представлен компонентный состав свободных газов, выделившихся из бурового раствора в рассматриваемых разведочных скважинах. Породы, из которых отобраны пробы выделившегося из бурового раствора свободного газа, в таблице обозначены следующими цветами: карналлит – светло-желтый, сильвинит – светло-розовый, каменная соль – светло-голубой.

Как видно из таблицы 1, по своему составу свободные газы в породах являются метаново-азотными. Содержание метана колеблется от 0,04% до 12,43% при среднем значении 3,54%. Содержание азота изменяется от 85,58% до 99,88% при среднем значении 95,86%.

В составе свободных газов, выделившихся при бурении скважин по карналлитам, присутствует водород, содержание которого колеблется от 0,12% до 1,72%, в среднем составляя 0,54%. Содержание метана в карналлите также на порядок выше, чем в сильвините и каменной соли, и изменяется от 2,47% до 12,43%, в среднем составляя 5,6%. Суммарное содержание горючих газов (метан + водород) изменяется от 2,6% до 14,16% при среднем значении 6,14%. Суммарное содержание тяжелых углеводородов метанового ряда ($C_2 - C_5$) изменяется от 0,072% до 0,293% при среднем значении 0,194%. Содержание азота колеблется от 85,58% до 97,16%, в среднем составляя 93,58%.

Таблица 1

Компонентный состав свободных газов в скважинах

Глубина, м	CH ₄	H ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂
Скважина № 1										
182,0	2,47	0,13	0,109	0,010	0,008	0,012	0,010	0,009	97,16	0,08
183,5	4,70	0,20	0,183	0,043	0,025	0,021	0,012	0,009	94,74	0,08
185,0	2,73	0,14	0,133	0,018	0,016	0,014	0,007	0,006	96,86	0,07
186,5	2,65	0,16	0,158	0,024	0,014	0,017	0,012	0,006	96,88	0,07
188,0	3,01	0,12	0,196	0,041	0,033	0,013	0,005	0,004	96,49	0,08
189,5	7,00	0,13	0,186	0,016	0,007	0,008	0,002	0,006	92,56	0,09
246,5	0,39	0,00	0,110	0,046	0,030	0,025	0,015	0,012	99,31	0,06
248,0	0,77	0,00	0,169	0,147	0,107	0,125	0,080	0,067	98,47	0,06
249,5	0,52	0,06	0,041	0,028	0,014	0,015	0,007	0,005	99,22	0,09
Скважина № 2										
146,5	0,04	0,00	0,006	0,005	0,002	0,001	0,001	0,002	99,88	0,06
148,0	0,29	0,00	0,039	0,047	0,021	0,029	0,010	0,008	99,49	0,06
149,5	0,65	0,00	0,030	0,005	0,004	0,009	0,002	0,002	99,22	0,08
Скважина № 3										
159,0	9,02	1,48	0,094	0,014	0,002	0,003	0,001	0,000	89,29	0,09
160,5	12,4 3	1,72	0,156	0,011	0,001	0,003	0,000	0,000	85,58	0,09
162,0	6,40	0,77	0,060	0,005	0,001	0,003	0,002	0,001	92,68	0,08

В составе свободных газов, выделившихся при бурении подземных разведочных скважин по сильвинитам, водород обнаружен лишь в одной пробе, отобранной в скважине № 1 на глубине 249,5 м и составляет всего 0,06% от объема пробы. Содержание метана в сильвините изменяется от 0,39% до 0,77%, в среднем составляя 0,56%. Суммарное содержание горючих газов (метан + водород) изменяется от 0,39% до 0,77% при среднем значении 0,58%. Суммарное содержание тяжелых углеводородов метанового ряда (C₂ – C₅) в сильвините практически в 2 раза выше, чем в карналлите, и почти в 5 раз выше, чем в каменной соли, и изменяется от 0,110% до 0,694% при среднем значении 0,347%. Содержание азота колеблется от 98,47% до 99,31%, в среднем составляя 99,0%.

В составе свободных газов, выделившихся при бурении скважин по каменной соли, водород не обнаружен. Содержание метана изменяется от 0,04% до 0,65%, в среднем составляя 0,33%. Суммарное содержание тяжелых углеводородов метанового ряда ($C_2 - C_5$) в каменной соли изменяется от 0,016% до 0,153% при среднем значении 0,074%. Содержание азота колеблется от 99,22% до 99,88%, в среднем составляя 99,53%.

В таблице 2 представлен качественный состав выделившихся свободных газов в исследованных породах.

Таблица 2

Качественный состав свободных газов в соляных породах

№	Порода	Сумма горючих газов, об. %	Сумма углеводородов, об. %	Содержание N_2 , об. %
1	Карналлит	6,14	0,194	93,58
2	Сильвинит	0,58	0,347	99,00
3	Каменная соль	0,33	0,074	99,53
Среднее значение:		3,87	0,201	95,86

Таким образом, по содержанию в полученных в ходе бурения подземных геологоразведочных скважин пробах, отобранных в устье скважин, суммарного содержания горючих газов (метан + водород) и тяжелых углеводородов метанового ряда ($C_2 - C_5$) в составе свободных газов можно спрогнозировать тип соляных пород, что может использоваться при бурении стандартных скважин без выемки керна, снижая трудозатраты и увеличивая скорость бурения.

Выводы

Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

Способ оценки компонентного состава свободных газов с отбором проб из бурового раствора при бурении подземных геологоразведочных скважин показал эффективность в условиях рудника Гремячинского горно-обогатительного комбината. Данный метод позволяет проводить анализ компонентного состава свободных газов, выделившихся на определенных интервалах во время бурения геологоразведочных скважин из горных выработок.

Компонентный состав отобранных свободных газов существенно различается в зависимости от породы, из которой отбиралась проба. Маркерами в данном случае выступают горючие газы и суммарное количество тяжелых углеводородов. Так, для карналлитовых пород характерно большее, чем для остальных пород содержание горючих газов ($H_2 + CH_4$), а именно 6,14%. В свою очередь, для сильвинитовых пород характерно большее содержание углеводородов, в данных породах оно в среднем составляет 0,347%. Для каменной соли характерно низкое содержание горючих газов в целом.

Полученные в результате исследований данные могут быть использованы для определения состава пород, по которым осуществляется бурение подземных геологоразведочных скважин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрейко С.С. Механизм образования очагов газодинамических явлений в соляном породном массиве. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 196 с.
2. Нестеров Е.А. Результаты исследований газоносности соляных пород Половодовского участка // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 3. – С.140-144.
3. Андрейко С.С. Гипотезы и модели механизма возникновения газодинамических явлений в шахтах // Горная механика. 2002. – №2. – С. 3-8.
4. Чайковский И.И., Иванов О.В. Новые данные по геохимии газов калийных месторождений // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. – 2014. – № 4. – С. 56-65.
5. Земсков А.Н., Кондрашев П.И., Травникова Л.Г. Природные газы калийных месторождений и меры борьбы с ними. – Пермь: Тип. Купца Тарасова, 2008. – 412 с.: ил., табл.
6. Андрейко С.С., Иванов О.В., Лялина Т.А., Нестеров Е.А. Газоносность по свободным газам пород сильвинитовой и сильвинито-карналлитовой зон Верхнекамского месторождения // Горная промышленность. – 2021. – № 4. – С. 125-133. – DOI: 10.30686/1609-9192-2021-4-125-133.
7. Андрейко С.С., Иванов О.В., Саламатина Н.А. Береснев С.П. Результаты экспериментальных исследований газоносности пород I калийного горизонта в условиях рудника 1 РУ РУП «ПО «Беларуськалий» // Горная механика. – 2006. – № 2. – С. 23-27.
8. Андрейко С.С., Иванов О.В. Метод прогноза газодинамических явлений при разработке сильвинитовых пластов Верхнекамского месторождения калийных солей // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2009. – № 7. – С. 368-373.
9. Андрейко С.С., Бобров Д.А., Нестеров Е.А., Лукьянец Е.В. Оценка газоносности и газодинамических характеристик пород соляных и глинисто-карбонатных пачек на шахтном поле рудника второго рудоуправления ОАО «Беларуськалий» // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 270-279. – DOI: 10.15593/2712-8008/2020.3.7.
10. Андрейко С.С., Прушак В.Я., Щерба В.Я. Анализ геологических условий возникновения газодинамических явлений на Старобинском месторождении калийных солей // Горная механика. – 2002. – № 1. – С. 89-94.
11. Андрейко С.С., Иванов О.В., Щерба В.Я., Береснев С.П. Результаты исследования газоносности и компонентного состава газа в породах кровли // Горная механика. – 2004. – № 1-2. – С. 3-7.
12. Andreiko S.S. Statistical criteria and estimation results for regularities of gas-dynamic phenomenon distribution in potash deposits // Journal of Mining Science. – 2003. – V. 39, № 4. – P. 354-363.

УДК 622.831.322

DOI:10.7242/echo.2023.1.19

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
НА ГАЗОНОСНОСТЬ ПО СВОБОДНЫМ ГАЗАМ СОЛЯНЫХ ПОРОД
В УСЛОВИЯХ ШАХТНОГО ПОЛЯ РУДНИКА
ООО «ЕВРОХИМ-УСОЛЬСКИЙ КАЛИЙНЫЙ КОМБИНАТ»**

А.С. Папулов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования газоносности соляных пород кровли пласта КрII на руднике ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат». При проведении шахтных экспериментальных исследований определялись газоносность пород по свободным газам, газодинамические характеристики пород кровли горных выработок, а также проводился в лабораторных условиях хроматографический анализ компонентного состава свободных газов. Оценивалось распределение газоносности пород и компонентного состава газа на различных расстояниях от контуров нефтяных месторождений, залегающих в нижележащей толще пород. Определен средний компонентный состав свободных газов в пределах и за контуром нефтяных месторождений. Полученные результаты позволяют дать оценку возможного влияния рифогенных структур, залегающих под соляной толщей, на газоносность соляных пород.

Ключевые слова: газоносность, соляные пласты, нефтяное месторождение, компонентный состав, свободные газы, Верхнекамское месторождение.

Введение

На сегодняшний день на шахтном поле рудника ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» ведется отработка сильвинитового пласта КрII. Газодинамические явления являются неотъемлемым опасным фактором при разработке калийных месторождений подземным способом. Они представляют собой быстропротекающие процессы разрушения приконтурной части массива горных пород, сопровождающиеся газовыделением [1-9]. Эти явления вызваны многими факторами, основным из которых является давление свободных газов в массиве соляных пород, и в связи с этим газоносность является одной из ключевых составляющих при оценке возможности возникновения газодинамических явлений. Определение данного параметра позволяет оценить газовое давление и оценить возможность проявления газодинамических явлений при проходке горных выработок.

Одним из открытых вопросов в области рудничной газодинамики и геологии является вопрос о генезисе свободных газов в соляных пластах. В границах шахтного поля рудника отмечаются газогеохимические аномалии, характеризующиеся аномально высоким содержанием метана и его гомологов (в частности бутанов и пентанов) в почво-грунтах сорбированных газов [10]. Возможными путями миграции могут служить субвертикальные трещины, которые сформировались в подстилающей толще при наличии нефтеносных рифогенных структур [11, 12]. Исходя из этого, можно предположить на отдельных участках месторождения влияние нефтеносных рифогенных структур на восходящую миграцию газов в соляную толщу Верхнекамского месторождения калийных солей.

Методика проведения исследований

Исследование газоносности пород пласта КрII проводится путем бурения в кровлю выработки шпура глубиной до 3,0 м и последующей установки в шпур герметизирующего устройства со шлангами. Газ, выделяющийся из изолированной части шпура, поступает по шлангу к прецизионному манометру, где регистрируется его давление, и после чего происходит отбор проб в пластиковый шприц. Исследование пробы газа на компонентный состав проводится на газовом хроматографе. Проведено свыше 30 исследований в кровле пласта КрII в горных выработках рудника ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» (рис. 1).

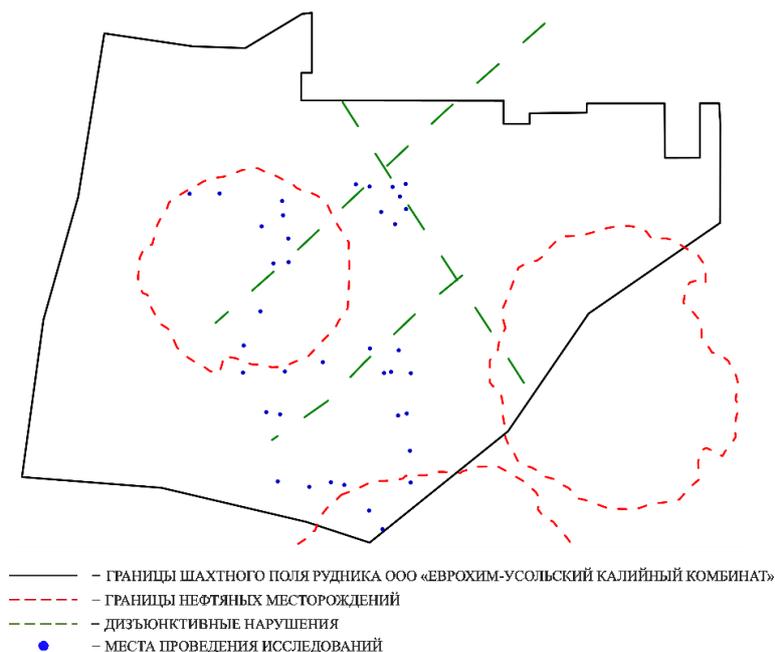


Рис. 1. Места проведения исследования газоносности соляных пород в условиях шахтного поля рудника ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат»

Результаты исследований

В результате проведенных исследований выявлено, что газоносность соляных пород кровли пласта КрII неравномерна по площади распространения и изменяется в пределах от 0,05 до 3,11 м³/м³ при среднем значении равным 0,65 м³/м³. Гистограмма распределения средних значений газоносности по свободным газам представлена на рисунке 2.

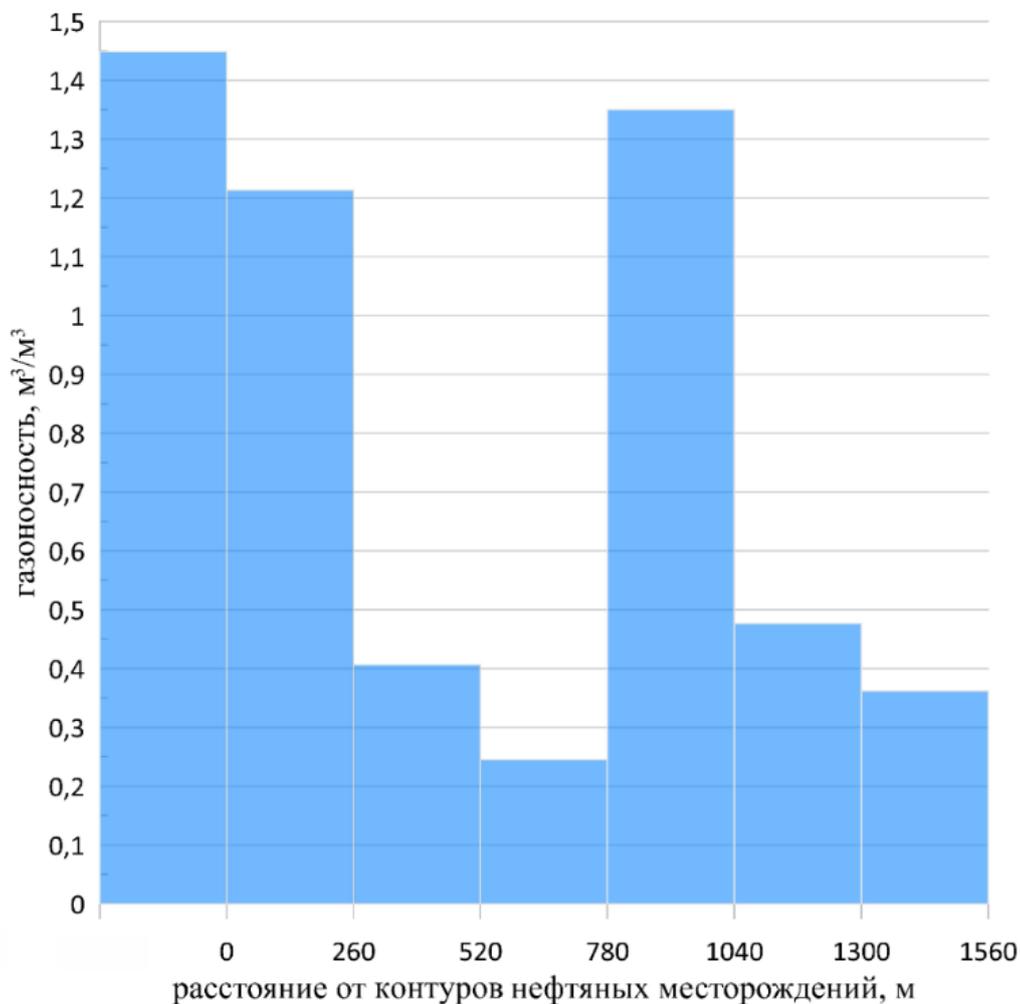


Рис. 2. Гистограмма распределения средних значений газоносности по свободным газам в зависимости от расстояний до контуров нефтяных месторождений на уровне пласта КрII

Как видно из рисунка 2, максимальные значения газоносности соляных пород зафиксированы внутри контура нефтяных месторождений месторождения им. Архангельского и Уньвинского. На расстоянии до 780 м от контуров нефтяных месторождений идет снижение среднего значения газоносности – с 1,45 м³/м³ до 0,25 м³/м³. Однако в зонах исследования – интервалы расстояний от 780 м до 1040 м – происходит увеличение значений газоносности до 1,35 м³/м³. В зоне исследования свыше 1040 м от контуров нефтяных месторождений газоносность снижается до среднего значения равного 0,36 м³/м³. Такое бимодальное распределение значений газоносности пород по свободным газам может быть обусловлено как формированием проницаемых зон над рифогенными постройками в нижележащей толще пород, так и в зонах дизъюнктивных нарушений, расположенных на некотором удалении от месторождений нефти (рис. 1) [10-12].

По компонентному составу свободный газ на исследованных участках шахтного поля рудника метаново-азотный. Содержание метана в породах кровли пласта КрII в районе контуров нефтяных месторождений изменяется от 25,09% до 36,48% при среднем значении 30,59%; содержание водорода изменяется от 0,001% до 3,97% при среднем значении 1,08%; суммарное содержание тяжелых углеводородных газов – от 3,046% до 21,378% при среднем значении 9,785%; содержание азота – от 45,99% до 71,66% при среднем значении 58,54%. Диаграмма среднего компонентного состава свободных газов в породах кровли пласта КрII в районе контуров нефтяных месторождений представлена на рисунке 3.

Содержание метана в породах кровли пласта КрII в зоне исследования на расстоянии до 780 м от контуров нефтяных месторождений изменяется от 21,77% до 40,73% при среднем содержании 31,47%; содержание водорода – от 0,02% до 0,64% при среднем содержании 0,29%; суммарное содержание тяжелых углеводородных газов – от 4,509% до 9,888% при среднем содержании 7,480%; содержание азота – от 54,67% до 71,53% при среднем содержании 60,70%.

Содержание метана в породах кровли пласта КрII в зоне исследования на расстоянии свыше 780 м от контуров нефтяных месторождений изменяется от 21,13% до 32,77% при среднем содержании 26,45%; содержание водорода – от 0,16% до 2,37% при среднем содержании 1,31%; суммарное содержание тяжелых углеводородных газов – от 5,793% до 23,737% при среднем содержании 15,015%; содержание азота – от 43,66% до 67,55% при среднем содержании 57,12%.

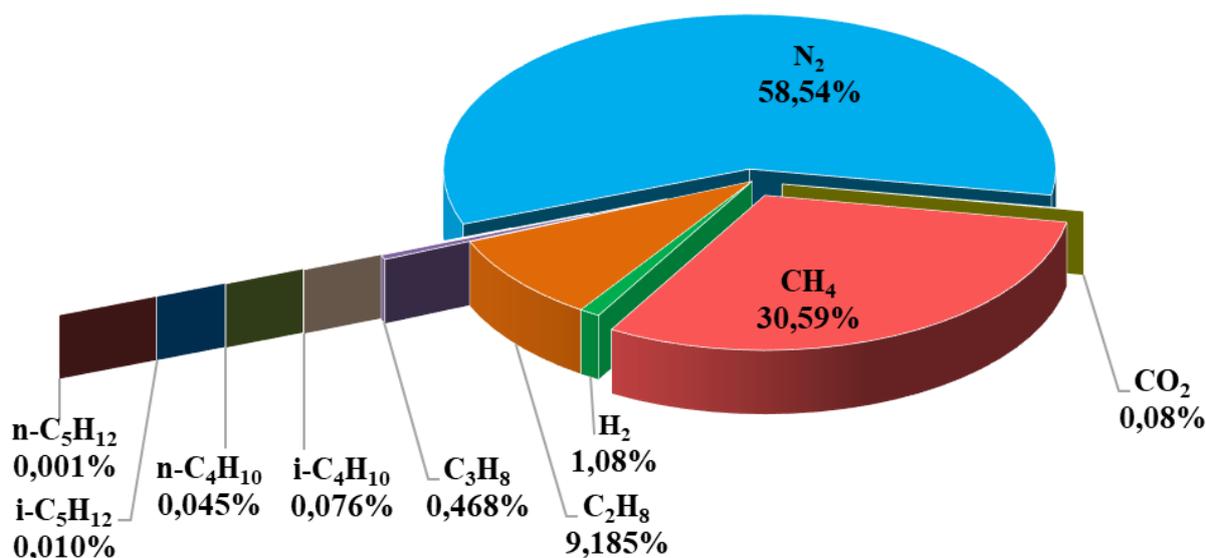


Рис. 3. Средний компонентный состав свободных газов в породах кровли пласта КрII в районе контуров нефтяных месторождений

Анализируя компоненты свободного газа по отдельности, можно выделить тенденцию, которая наблюдается при анализе распределения газоносности: с внутриконтурной зоны исследования до границы 780 м происходит снижение процентного содержания компонентов и резкое повышение процентного содержания компонентов в зоне исследования свыше 780 м от контуров нефтяных месторождений. Содержание компонентов в зависимости от расстояния от контуров нефтяных месторождений представлено в таблице 1. Гистограммы содержания горючих газов (CH₄ + H₂) и тяжелых углеводородных газов (C₂-C₅) представлены на рисунках 4 и 5, соответственно.

Таблица 1

Содержание компонентов в зависимости от расстояния от контуров
нефтяных месторождений

Расстояние от контуров нефтяных месторождений, м	Метан, %	Этан, %	Пропан, %	Изобутан, %
внутри контура	30,59	9,18	0,47	0,076
граница контура - 260	35,15	8,63	0,55	0,100
260 – 520	34,48	6,72	0,37	0,065
520 – 780	21,77	5,82	0,27	0,047
780 – 1040	27,58	13,69	1,38	0,374
1040 – 1300	25,66	14,88	0,68	0,105
1300 – 1560	24,07	19,72	0,79	0,098

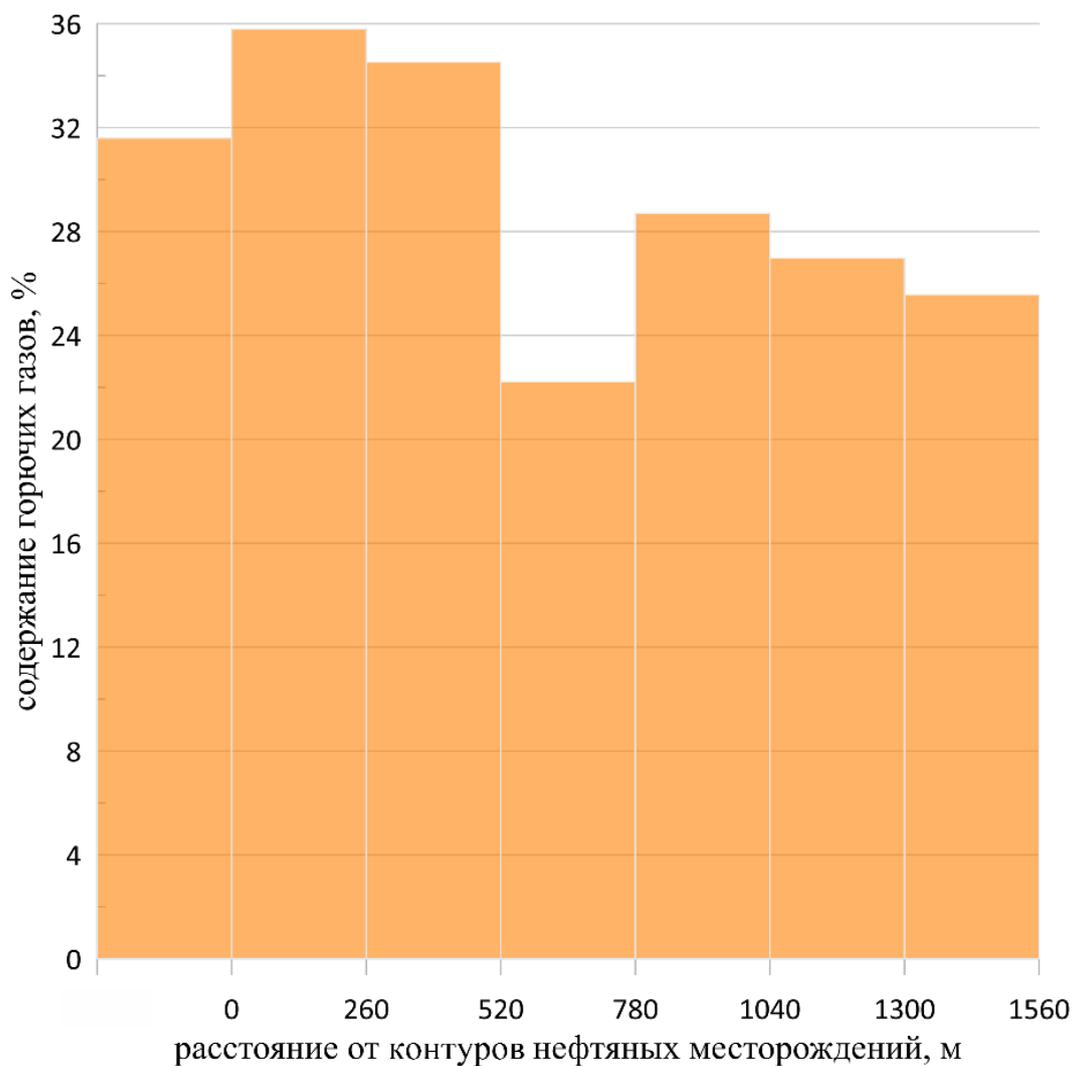


Рис. 4. Гистограмма содержания горючих газов в зависимости от расстояний до контуров нефтяных месторождений на уровне пласта КрII

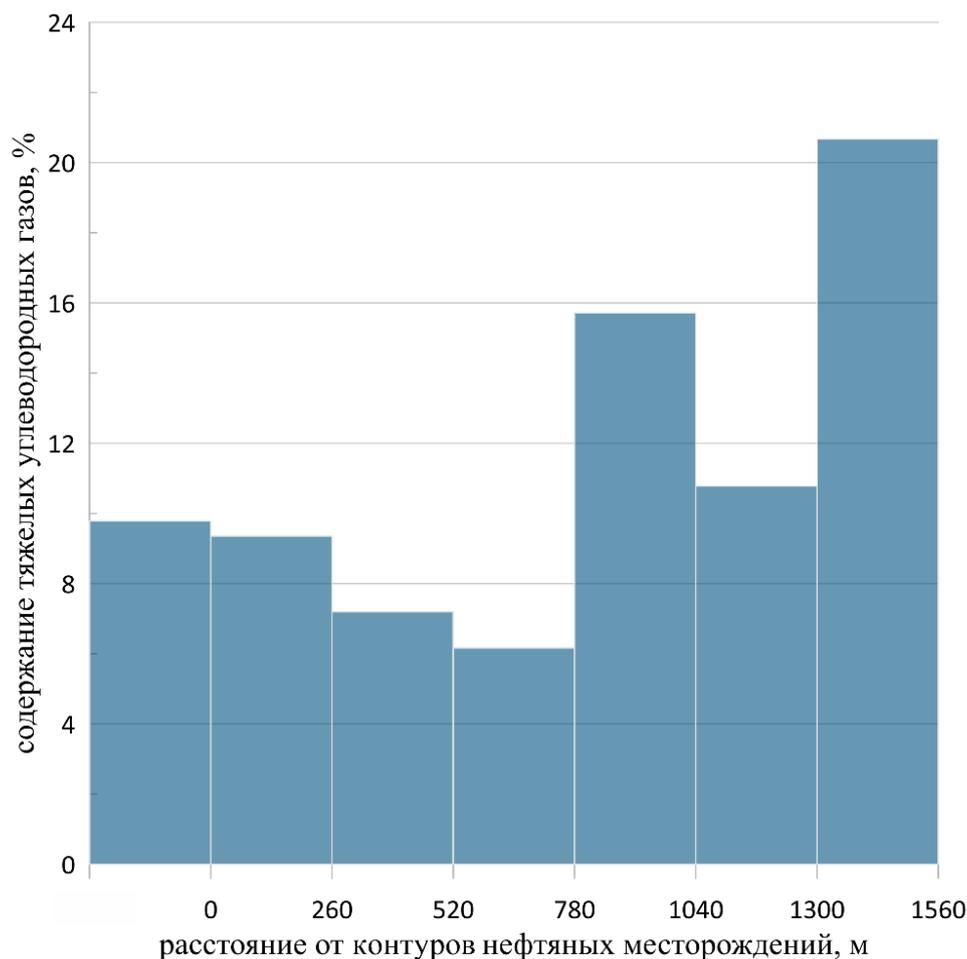


Рис. 5. Гистограмма содержания тяжелых углеводородных газов в зависимости от расстояний до контуров нефтяных месторождений на уровне пласта КрII

Заключение

В результате оценки влияния нефтяных месторождений на газоносность по свободным газам соляных пород в условиях шахтного поля рудника ООО «ЕвроХим-Усольский калийный комбинат» установлено, следующее.

Средняя газоносность пород по свободным газам пород кровли пласта КрII составляет $0,65 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Максимальные значения газоносности зафиксированы внутри контура нефтяного месторождения и составляют в среднем $1,45 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Наблюдается тенденция уменьшения величины газоносности свободных газов в соляных породах с удалением от контуров нефтяных месторождений на расстоянии до 780 м. В интервале расстояний 780-1040 м наблюдается резкое увеличение значений газоносности пород по свободным газам до величины $1,35 \text{ м}^3/\text{м}^3$, что может быть обусловлено наличием проницаемых зон (дизъюнктивных нарушений) на данном участке месторождения. В интервалах расстояний от 1040 м до 1560 м наблюдается снижение величины газоносности пород по свободным газам от $0,48 \text{ м}^3/\text{м}^3$ до $0,36 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Компонентный состав свободных газов пород кровли пласта КрII метаново-азотный. Содержание компонентов свободного газа по зонам исследования имеет аналогичную тенденцию распределения, как и значения газоносности: наибольшие концентрации наблюдаются в зоне исследования внутри контуров нефтяных месторождений и в интервале расстояний 780-1040 м от контуров нефтяных месторождений.

Резкое повышение как газоносности соляных пород, так и содержания компонентов в исследуемом газе в интервале расстояний 780-1040 м от контуров нефтяных месторождений может говорить о возможной субвертикальной миграции газов по зонам повышенной проницаемости от нефтеносных структур в породы соленосной толщи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев О.В., Ливенский В.С., Былино Л.В. Особенности безопасной разработки калийных месторождений. – Минск: Польша, 1982. – 96 с.: ил.
2. Андрейко С.С., Прушак В.Я., Щерба В.Я. Анализ геологических условий возникновения газодинамических явлений на Старобинском месторождении калийных солей // Горная механика. – 2002. – № 1. – С. 89-94.
3. Андрейко С.С., Иванов О.В., Щерба В.Я., Береснев С.П. Результаты исследования газоносности и компонентного состава газа в породах кровли // Горная механика. – 2004. – № 1-2. – С.3-7.
4. Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений солей // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 601-609. – DOI: 10.31897/PMI.2020.6.1.
5. Andreyko S.S., Lyalina T.A. Rockburst from floors // Soils and Rocks. – 2019. – V. 42, 1. – P. 77-82. – DOI: 10.28927/SR.421077.
6. Litvinovskaya N.A., Andreiko S.S. Modeling sudden failure of floor of underground excavations in undermined salt rock mass // Eurasian mining. – 2015. – № 2 (24). – P. 15-17.
7. Andreiko S.S. Statistical criteria and estimation results for regularities of gas-dynamic phenomenon distribution in potash deposits // Journal of Mining Science. – 2003. – V. 39, № 4. – P. 354-363.
8. Андрейко С.С., Лялина Т.А. Исследования газовыделений из геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении калийных солей / Андрейко С.С., Лялина Т.А. // Изв. вузов. Горн. журн. – 2017. – № 2. – С. 33-38.
9. Галкин В.И., Мелкишев О.А., Варушкин С.В., Андрейко С.С., Лялина Т.А. Разработка статистической модели прогноза нефтегазоносности по газовыделениям в толще Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 4-13. – DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.1.
10. Бачурин Б. А., Борисов А. А. Газогеохимические методы контроля процессов техногенеза в геологической среде Верхнекамского месторождения / Б.А. Бачурин, А.А. Борисов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 144-151.
11. Федосеев А.К. О вкладе рифогенных образований в формирование природно-ослабленных зон в соляной толще // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 4. – С. 141-145.
12. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – 2-изд., перераб. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.1.20

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ТУПИКОВЫХ ЗАБОЯХ РУДНИКОВ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОЛЕДЯНОЙ СМЕСИ

М.О. Пересторонин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Согласно истории, охлаждение рудничного воздуха льдом применялось еще в 1860-х годах в шахтах США. Однако в 1902 году Уиллисом Кэррьером на основании открытий Майкла Фарадея в области сжатия и сжижения газов был разработан электрический способ кондиционирования воздуха. В результате, начиная с 1920-х годов, парокомпрессионные холодильные машины практически полностью вытеснили ледяное рудничное охлаждение. Тем

не менее, сегодня, в условиях мирового стремления к энергосбережению, важным является пересмотр имеющегося практического опыта с целью открытия новых возможностей некогда забытых технологий с учетом современных достижений в науке и технике. В настоящей статье представлены результаты оценки эффективности охлаждения воздуха льдом в тупиковых забоях рудников Норильского промышленного района. Рассмотрены две технологии водолеяного охлаждения: с размещением водолеяной смеси перед вентилятором местного проветривания и с размещением водолеяной смеси в проходческом забое. Выполнено сравнение водолеяного кондиционирования и кондиционирования с использованием холодильных машин. В результате исследования сделан вывод о том, что охлаждение воздуха на $20,5^{\circ}\text{C}$ (эквивалентная мощность электрического воздухоохлаждителя – 939 кВт) возможно при размещении водолеяной смеси перед вентилятором местного проветривания на участке выработки длиной 290 м. Внутрizaбойное охлаждение является неэффективным и позволяет снизить температуру воздуха не более, чем на $1,1^{\circ}\text{C}$. Для повышения рациональности водолеяного охлаждения необходимо использование технологий, увеличивающих площадь контакта воздуха со льдом, таких как мелкодисперсное водолеяное охлаждение или охлаждение закрепного пространства горной выработки.

Ключевые слова: рудник, тупиковый забой, микроклимат, теплообмен, возобновляемый источник энергии, охлаждение воздуха, водолеяная смесь.

Введение

На сегодняшний день интенсивность разработки месторождений полезных ископаемых продолжает возрастать. С учетом сокращения неглубоких запасов полезных ископаемых в отработку вводятся все более глубокие горизонты [1]. В связи с этим горнякам приходится иметь дело с увеличением температуры как пород, так и воздуха в подготовительных и очистных выработках [2, 3].

В целях борьбы с неблагоприятными последствиями высоких температур *Правила безопасности при ведении горных работ* [4] регламентируют допустимую температуру воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок, которая не должна превышать $+26^{\circ}\text{C}$. При более высоких температурах воздуха должно предусматриваться его охлаждение.

Традиционно нормализация температуры воздуха в сложных теплотехнических условиях осуществляется за счет использования систем кондиционирования. Однако применение холодильных установок отличается существенным энергопотреблением, что значительно повышает себестоимость добычи [5]. В связи с этим актуальным является исследование альтернативных источников холода, не требующих высоких энергозатрат [6]. Одним из таких источников холода является лед.

Лед – это вещество, которое при правильном технологическом подходе способно не только охладить воздух, но и нагреть его. Так, например, в рудниках Канады нагрев воздуха зимой осуществляется при разбрызгивании теплой воды на вентиляционную струю в специальных камерах [7, 8]. В результате происходит образование льда, и воздух нагревается за счет тепла, выделяемого при замерзании. В летнее же время при прохождении через камеры, наполненные льдом, воздух охлаждается. При этом важным преимуществом использования льда для шахтного охлаждения в сравнении с водой является то, что лед, обладая высокой скрытой теплотой плавления (теплотой фазового перехода), позволяет поддерживать температуру водолеяной смеси на отметке 0°C до полного его таяния, в то время как вода нагревается на $2,4^{\circ}\text{C}$ каждые 1 000 м [9]. Данные особенности льда обуславливают его широкое использование в шахтах Канады и ЮАР: в шахтах Канады ввиду арктического и субарктического климата, благоприятного для генерирования льда [9], а в шахтах ЮАР ввиду сверхглубокой добычи ценных полезных ископаемых, где другие методы охлаждения являются нецелесообразными [10]. Здесь важно отметить, что охлаждение льдом считается достаточно рациональным

к использованию при глубине от 1 760 м [11]. Однако смещение мировых взглядов в сторону энергосбережения порождает исследования по оценке целесообразности охлаждения льдом на меньших глубинах – в шахтах Австралии [9, 12], Индии [13], Китая [14] и др.

Вышеизложенные факты наводят на мысль о том, что охлаждение воздуха льдом может оказаться рациональным и в российских шахтах, а именно – в рудниках Норильского промышленного района, поскольку в пределах данных рудников, располагаемых в районе субарктического климата, осуществляется добыча ценных полезных ископаемых (медь, никель, платина) на больших глубинах (до 2 км) с температурой пород до 40-50°C.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка эффективности водолеяного охлаждения воздуха в тупиковых забоях рудников Норильского промышленного района в контексте сравнения с традиционным охлаждением холодильными машинами. Рассматриваемые технологии охлаждения льдом:

- 1) охлаждение общей струи воздуха перед вентилятором, проветривающим забой,
- 2) охлаждение воздуха непосредственно в призабойном пространстве.

Исследуемый тип охлаждения – прямой, характеризующийся непосредственным контактом воздуха с водолеяной насыпью.

Расчет вариантов охлаждения воздуха

Согласно результатам научно-технических расчетов, предшествующих настоящему исследованию, в одном из рудников Норильского промышленного района прогнозируется температура воздуха, поступающего на проветривание подготовительных выработок, равная 38,8°C. С учетом работы забойной техники (буровой установки, погрузочно-доставочной машины или кровлеоборочной машины) на рабочих местах ожидается температура от 42,1°C до 47,4°C.

Обеспечение нормативной температуры воздуха (26,0°C) в одной такой рабочей зоне возможно за счет использования системы кондиционирования с холодильной мощностью 626 кВт. При этом необходимо применение теплоизолированного воздуховода, а также использование вентиляции «по требованию», при которой количество подаваемого в выработку воздуха регулируется в зависимости от выполняемых работ. Электропотребление такой системы кондиционирования составляет 939 кВт.

Для оценки целесообразности использования в данных условиях системы водолеяного охлаждения определяются следующие технологические параметры:

- площадь поверхности контакта воздуха и водолеяной смеси, требуемая для охлаждения воздуха в тупиковой выработке до допустимых 26°C;
- количество водолеяной смеси, требуемое для охлаждения воздуха;
- минимальная периодичность обновления водолеяной смеси для поддержания допустимых микроклиматических условий;
- водоприток, возникающий при работе системы.

Схематичное изображение рабочей зоны с указанием рассматриваемых вариантов охлаждения представлено на рисунке 1. Важно отметить, что рассмотрение вариантов охлаждения воздуха с нанесением льда на почву выработки обусловлено отсутствием на сегодняшний день шахтных аппаратов других принципов действия.

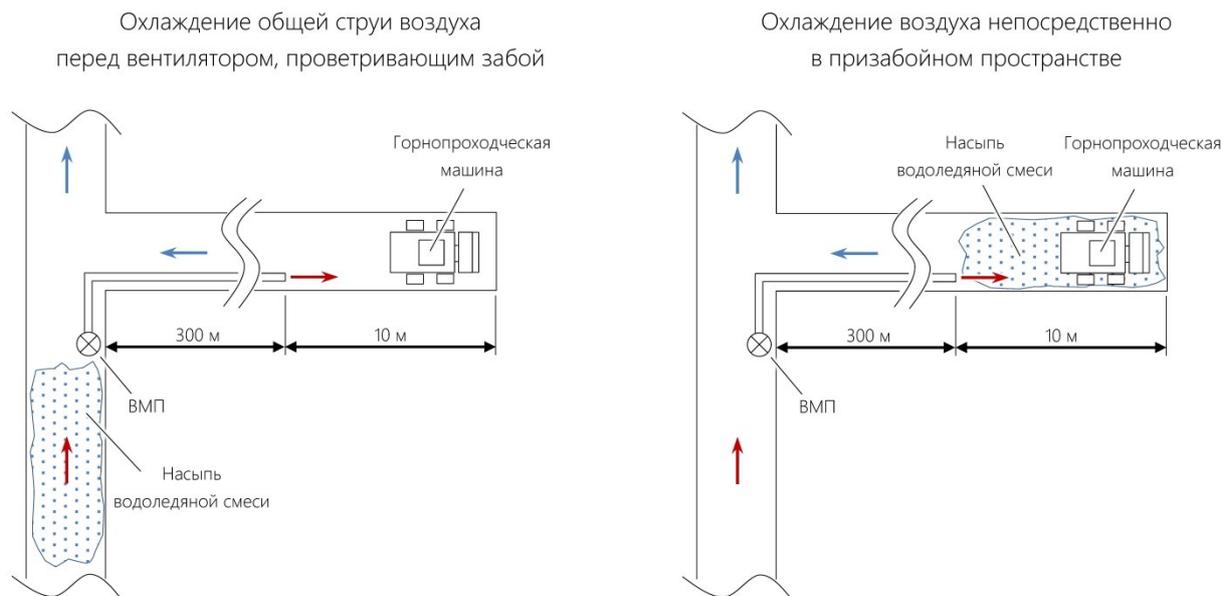


Рис. 1. Схематичное изображение рабочей зоны с указанием рассматриваемых вариантов охлаждения

Теплофизические параметры воздуха и водолеяной смеси, а также технологические параметры тупиковой выработки, используемые в расчетах, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные параметры для расчетов

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение
Теплофизические параметры			
1	Плотность воздуха	$\rho_{\text{в}}$	1,34 кг/м ³
2	Теплоемкость воздуха	$c_{\text{в}}$	1 005 Дж/(кг·°С)
3	Теплопроводность воздуха	$\lambda_{\text{в}}$	0,0276 Вт/(м·°С)
4	Кинематическая вязкость воздуха	$\nu_{\text{в}}$	16,96·10 ⁻⁶ м ² /с
5	Температура воздуха перед системой охлаждения	$t_{\text{в0}}$	38,8°С
6	Влажность воздуха перед системой охлаждения	$\varphi_{\text{в0}}$	50,9%
7	Требуемая температура воздуха после системы охлаждения (с учетом нагрева в трубопроводе длиной 300 м и нагрева от работы проходческой техники в забое)	$t_{\text{в1}}$	18,3°С
8	Давление воздуха	$P_{\text{в}}$	117 500 Па
9	Плотность водолеяной смеси	$\rho_{\text{л}}$	937 кг/м ³
10	Удельная теплота плавления льда	$\lambda_{\text{л}}$	333 000 Дж/кг

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение
11	Плотность воды	$\rho_{\text{вод}}$	1 000 кг/м ³
12	Соотношение воды ко льду в смеси		25/75
Технологические параметры			
13	Длина тупиковой выработки	L	300 м
14	Площадь выработки	S	16,7 м ²
15	Ширина выработки	B	4,2 м
16	Эквивалентный диаметр (характерный размер) выработки	d	4,6 м
17	Расход воздуха в выработке:		
	– объемный	$Q_{\text{в}}$	10,3 м ³ /с
	– массовый	$G_{\text{в}}$	49 687 кг/ч
18	Скорость движения воздуха в выработке	$V_{\text{в}}$	0,62 м/с
19	Объем ковша ПДМ ST-14	$V_{\text{ковш}}$	4,7 м ³

В расчетах принимается, что теплообмен с воздухом происходит на границе «воздух-вода», которая образуется на поверхности водолеяной смеси при контакте с теплым воздухом [15]. Теплообмен льда с породным массивом почвы горной выработки не учитывается.

Для уравнений тепловых балансов принято условие однозначности – постоянные температура и энтальпия насыщенного воздуха на границе с водяной пленкой, которая образуется на поверхности тающего льда. В таком случае дифференциальные уравнения тепло- и влагообмена воздуха со льдом имеют следующий вид по полной и явной теплоте соответственно [16]:

$$G_{\text{в}} \cdot dI_{\text{в}} = -0,278 \cdot 10^3 \cdot \beta_d \cdot (I_{\text{в}} - I_{\text{нас}}) \cdot dF, \quad (1.1)$$

$$G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot dt_{\text{в}} = -0,278 \cdot \alpha \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{нас}}) \cdot dF, \quad (1.2)$$

где β_d – коэффициент влагообмена, кг/(с·м²);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

F – площадь поверхности контакта воздуха и льда, м²;

I – энтальпия воздуха, кДж/кг: индекс «в» – основной воздушный поток, индекс «нас» – слой воздуха на границе со льдом (температура 0°С, влажность 100%).

С учетом ранее описанного условия однозначности имеем:

$$I_{\text{нас}}, t_{\text{нас}} = \text{const}. \quad (1.3)$$

При этом в начальный момент соприкосновения воздушного потока с поверхностью льда справедливо условие:

$$\begin{aligned} I_{\text{в}} &= I_{\text{в}0}, \\ t_{\text{в}} &= t_{\text{в}0}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Решение уравнения (1.1), определяющее энтальпию воздуха после контакта со льдом (кДж/кг), будет иметь вид:

$$I_B = I_{\text{нас}} + (I_{\text{в0}} - I_{\text{нас}}) e^{\frac{-0,278 \cdot 10^3 \cdot F \cdot \beta_d}{G_B}} \quad (1.5)$$

Из уравнения (1.5) возможно определение площади поверхности контакта воздуха и водолеяной смеси, требуемой для охлаждения воздуха до определенной температуры $t_B = f(I_B)$:

$$F = \frac{-G_B \cdot \ln\left(\frac{I_B - I_{\text{нас}}}{I_{\text{в0}} - I_{\text{нас}}}\right)}{0,278 \cdot 10^3 \cdot \beta_d} \quad (1.6)$$

В свою очередь, решение уравнения (1.2) позволяет определить температуру воздуха после контакта со льдом (°C) при заданной площади поверхности их контакта:

$$t_B = t_{\text{нас}} + (t_{\text{в0}} - t_{\text{нас}}) e^{\frac{-0,278 \cdot F \cdot \alpha}{G_B \cdot c_B}} \quad (1.7)$$

Удельная энтальпия влажного воздуха (кДж/кг) определяется по формуле:

$$I = 1,006 \cdot T + (2501 + 1,805 \cdot T) \cdot \frac{d}{1000}, \quad (1.8)$$

где d – влагосодержание воздуха (г/кг), которое определяется следующим образом:

$$d = 621,98 \cdot \xi \cdot \frac{P_H}{P - P_H}, \quad (1.9)$$

где P_H – парциальное давление водяного пара (Па), зависящее от температуры среды:

$$P_H = 611,2 \cdot e^{\frac{\alpha \cdot T}{\beta + T}}, \quad (1.10)$$

где α и β – константы для воды: $\alpha = 17,504$, $\beta = 241,2$ °C.

Для определения коэффициента теплоотдачи (Вт/м²·°C) на границе водолеяной смеси с воздушным потоком используется формула:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{d}, \quad (1.11)$$

где число Нуссельта определяется на основании экспериментальных исследований [16] по формуле:

$$Nu = 0,0046 Re^{1,27} = 0,0046 \cdot \left(\frac{V_B \cdot d}{\nu_B}\right)^{1,27} \quad (1.12)$$

Коэффициент влагообмена (кг/с·м²) в условиях турбулентного режима движения воздуха определяется по формуле:

$$\beta_d = \frac{\alpha}{c_B}. \quad (1.13)$$

Для определения времени таяния (плавления) льда (ч) можно воспользоваться формулой:

$$t = \frac{\lambda_l \cdot m_l}{W \cdot 3600} = \frac{\lambda_l \cdot \rho_l \cdot V_l}{W \cdot 3600} = \frac{\lambda_l \cdot \rho_l \cdot F \cdot h_l}{W \cdot 3600}, \quad (1.14)$$

где m_l – масса водолеяной смеси, кг;

V_l – объем водолеяной смеси, м³;

h_l – высотой насыпи водолеяной смеси, м (принимается равной 0,15 м);

W – теплота, подводимая к смеси для снижения температуры воздуха с 38,8°C до допустимых 26,0°C с учетом нагрева от забойной техники (6,3°C – для буровой установки, как машины, приводящей к наибольшему нагреву воздуха) и нагрева по длине воздуховода (1,4°C), Вт:

$$W = \rho_B \cdot Q_B \cdot (I_B - I_{B0}), \quad (1.15)$$

Дополнительный водоприток, возникающий при таянии льда (м³/ч), рассчитывается по формуле:

$$q_{\text{вод}} = \frac{V_l}{t} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_{\text{вод}}}. \quad (1.16)$$

Сводные результаты расчетов требуемых параметров работы системы водолеяного охлаждения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Требуемые параметры работы системы водолеяного охлаждения

№ п/п	Параметр	Значение
1	Площадь поверхности контакта воздуха и водолеяной смеси, требуемая для охлаждения воздуха до 26°C	1 219 м ²
2	Эквивалентная длина участка выработки, покрытой водолеяной смесью (при ширине выработки $B = 4,2$ м)	290 м
3	Требуемый объем водолеяной смеси	244 м ³
4	Требуемая масса водолеяной смеси	228 т
5	Требуемые технические мощности для поддержания допустимых микроклиматических условий в пересчете на ПДМ ST-14*	1,5 ед./ч
6	Требуемая периодичность обновления водолеяной смеси для поддержания допустимых микроклиматических условий (полное время таяния льда)	33,8 ч

№ п/п	Параметр	Значение
7	Удельное потребление водоледающей смеси	7,2 м ³ /ч 6,8 т/ч
8	Водоприток при таянии льда	6,76 м ³ /ч
9	Холодильная мощность	626 кВт

* – параметр подразумевает под собой количество заходов ПДМ ST-14 в час для обновления водоледающей смеси и поддержания допустимой температуры воздуха в тупиковом забое

Аналогичным образом на основании зависимости (1.7) выполнен расчет охлаждения воздуха непосредственно в забое подготовительной выработки, когда длина участка зоны охлаждения составляет 10 м (исходя из максимального удаления конца воздуха от груди забоя [4]). Согласно расчету, при использовании такой технологии охлаждения снижение температуры воздуха за счет применения водоледающей смеси составит 1,1°С – с 38,8°С до 37,7°С.

Заключение

На основании выполненных расчетов можно сделать вывод о том, что охлаждение воздуха водоледающей смесью непосредственно в призабойном пространстве выработки длиной 10 м является неэффективным: снижение температуры воздуха составляет не более 1,1°С.

В свою очередь, централизованное охлаждение общей вентиляционной струи, при котором отсутствуют технические ограничения по длине зоны охлаждения, может обеспечить допустимую температуру воздуха в тупиковой выработке при покрытии водоледающей смесью участка выработки длиной 290 м. При этом требуемая периодичность обновления водоледающей смеси для поддержания допустимых микроклиматических условий (полное время таяния льда) составляет 33,8 ч, требуемый объем водоледающей смеси – 244 м³/т, а требуемые технические мощности для поддержания допустимых микроклиматических условий – 1,5 ед./ч (в пересчете на ПДМ ST-14). Дополнительный водоприток при этом составит 6,76 м³/ч.

Анализ полученных данных говорит о том, что охлаждение воздуха водоледающей смесью (при прямом воздействии водоледающей насыпи на воздух) возможно, однако реализация такого способа охлаждения требует покрытия значительного участка выработки льдом. Кроме этого, использование данной технологии приведет к усложнению горнопроходческого цикла и потребует выделения дополнительных технических мощностей для транспортировки водоледающей смеси в охлаждаемую зону.

С учетом того, что эффективность охлаждения в большей степени зависит от площади контакта воздуха со льдом, повышение рациональности водоледающего охлаждения возможно с использованием технологий, увеличивающих данную площадь. Такими технологиями являются мелкодисперсное водоледающее охлаждение, охлаждение закрепного пространства горной выработки и т. п. Для наиболее комплексной и справедливой оценки целесообразности использования водоледающего охлаждения в условиях Норильского промышленного района требуется исследование данных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ... д.т.н.; 25.00.20: защищена 23.05.19 / Зайцев Артем Вячеславович. – Пермь, 2019. – 247 с.
2. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.: ил.
3. Воропаев А.Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах: – М.: Госгортехиздат, 1961. – 247 с.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
5. Pokhrel S., Kuyuk A.F., Kalantari H., Choreishi-Madiseh S.A. Techno-economic trade-off between battery storage and ice thermal energy storage for application in renewable mine cooling system // Applied Sciences. – 2020. – V. 10, №. 17. – номер статьи 6022.
6. Шувалов Ю.В., Бобровников В.Н., Согрин Б.А., Ганшевский С.П. Тепло-хладоснабжение шахт и рудников с использованием низкопотенциальных источников тепла (холода) и фазовых переходов воды // Горн. информ.-аналит. бюл. – 1999. – № 4. – С. 224-225.
7. Лискова М.Ю., Воронкова Ю.А., Голик В.И. Основные способы нормализации теплового режима рудника // Изв. ТулГУ. Науки и Земле. – 2018. – №. 4. – С. 85-94.
8. Trapani K., Chen Z. Computational fluid dynamic modelling of the Froot-Stobie ice stope thermal storage for mine ventilation heating // Deep Mining 2017: Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining. – Australian Centre for Geomechanics, 2017. – С. 289-298.
9. Kamyar A., Aminossadati, Leonardi C., Sasmito A. Current developments and challenges of underground mine ventilation and cooling methods // Coal Operators' Conference. –Wollongon. – 2016. – С. 277-287.
10. Mackay L., Bluhm S., Van Rensburg J. Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining // The 4th International Platinum Conference, Platinum in transition «Boom or Bust», The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2010. – P. 285-292.
11. De Wet J., Mackay L., Bluhm S., Walter K. Refrigeration and ventilation systems for ultra-deep platinum mining in the bushveld igneous complex // Proceedings of the 10th international mine ventilation congress. – Sun City, South Africa. – 2014. – С. 2-8.
12. Belle B., Biffi M. Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – V. 28, №. 6. – С. 865-875.
13. Srivatsan J.S., Pandey A., Current developments in mine air cooling systems: case study of an Indian coal mine using different cooling strategies // Recent advances in mining technology (RAMT). – 2019. – С. 23-24.
14. Wang M., Liu L., Chen L., Zhang X., Zhang B., Ji C. Cold load and storage functional backfill for cooling deep mine // Advances in Civil Engineering. – 2018. – V. 2018. – Номер статьи 5435214.
15. Тарасова Е.В. Системы кондиционирования воздуха с сезонными аккумуляторами естественного холода: дис. ... к.т.н.: 05.23.03: / Тарасова Елена Владимировна. – Владивосток, 2013. – 151 с.: ил.
16. Тарасова Е.В., Штым А.С. Изменение термодинамических параметров охлажденного воздуха при прямом контакте с естественным источником холода // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6 (35). – С. 107-112.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2023.1.21

**ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕГО РУДНИКА**

А.В. Пугин, А.В. Богомягков, А.А. Оглоблина, К.М. Агеева
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В условиях действующего рудника поддержание ледопородного ограждения (ЛПО) представляет собой нетривиальную задачу, в корне отличающуюся от аналогичной при проходке шахтного ствола. Изменяются факторы, оказывающие ключевое воздействие на характер теплопритоков в замороженный массив, особенно со стороны ствола. В статье источники

(процессы) тепловыделений ранжируются по степени их теплового воздействия и показано, что основным фактором, определяющим режим работы замораживающего комплекса в условиях действующего рудника является проветривание. Существенное влияние на состояние ЛПО и, соответственно, режим работы замораживающей станции воздухоподающего ствола оказывают сезонные климатические изменения температуры внешней среды, а выдающего – глубина ведения горных работ. Показано, что в воздухоподающем стволе процессы теплообмена воздуха с охлажденной крепью и гидростатического сжатия являются компенсирующими по отношению друг к другу, тогда как в выдающем – имеют сонаправленное действие.

Ключевые слова: ледопородное ограждение, термометрический контроль, теплофизическое моделирование, распределение температур.

Ледопородное ограждение, возводимое в интервале неустойчивых водонасыщенных пород перед и поддерживаемое в период проходки шахтного ствола обычно не представляет интереса для наблюдений после завершения работ при условии успешной гидроизоляции горной выработки.

В редких случаях нормальная последовательность ведения горных работ по какой-либо причине нарушается и потребность в поддержании рабочих характеристик ЛПО сохраняется даже на этапе функционирования рудника.

В этом случае поддержание ЛПО шахтного ствола в большей степени ассоциировано с процессами горного производства нежели в период проходки. Влияние естественных и техногенных источников теплоты значительно возрастает, интенсифицируются процессы теплообмена в системе «ствол-массив», становятся более динамичными и требуют повышенного внимания к управлению состоянием ледопородного ограждения.

Предположим, что каждый источник за малую единицу времени dt выделяет количество теплоты $W = W(t)$ (назовем это мгновенной интенсивностью источника). Тогда полная тепловая мощность источника в течение времени его действия τ будет выражаться интегралом $W_{\Sigma} = \int_{\tau} W dt$ и характеризовать степень его теплового влияния на окружающую среду.

Следовательно, основные факторы (процессы), воздействующие на термодинамическое состояние массива помимо замораживающих колонок, по тепловому влиянию W_{Σ} можно ранжировать в виде матрицы альтернатив «интенсивность (W) – длительность (τ)». Данная классификация условна и не подразумевает численных критериев перехода из одного класса в другой. Например, интенсивным можно считать воздействие, обеспечивающее тепловое возмущение в среде, которое удовлетворяет одновременно трем качественным критериям: (а) по интенсивности выше предела чувствительности измерительных средств, применяемых для его фиксации, (б) способно в короткое время существенно изменить тепловое состояние массива в некоторой области (область воздействия) и (в) требует компенсационного изменения режима работы замораживающей станции.

При проходке ствола матричное ранжирование будет выглядеть соответственно таблице 1, и если интенсивность теплового воздействия буровзрывных (БВР) работ невелика (процесс взрыва является квазиadiaбатическим), то при использовании стволопроходческого комбайнового комплекса типа SBR тепловыделения составляют в среднем 600-1000 кВт и длятся большую часть суток. В обоих случаях тепловыделения передаются в атмосферу выработки и отводятся из нее путем проветривания.

Величина земных теплопритоков к внешней границе ЛПО выходит на стационарное значение спустя несколько месяцев активного замораживания и впоследствии существенно не меняется, а значит, оказывает влияние на режим работы замораживающей станции только в период активного формирования ЛПО [1].

Остальные технологические процессы не оказывают существенного теплового воздействия на массив. Так, в работе [2] показано, что тепловыделения твердеющего бетона при креплении стенок выработки способны повысить температуры внутренней, приконтурной части ЛПО на несколько градусов, но недостаточны для оттаивания породы. Тепловое влияние этого фактора полностью компенсируется замораживающей станцией без изменения режима ее работы.

Таблица 1

Ранжирование тепловых факторов при строительстве ствола

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ	Длительное	Кратковременное
Интенсивное	¹ проходка (комбайн)	крепление стенок бетоном тампонажные работы
Слабое	проветривание	² проходка (БВР) перемещение сосудов и материалов

^{1/2} — способ проходки «или/или»

Натурными измерениями не зафиксировано сколько-нибудь значимое тепловое влияние перемещаемых по стволу сосудов (бадей) и материалов, например, спускаемых чугунных тубингов или бадьи с бетонным раствором, имеющими положительную температуру.

На этапе проходки ствола ЛПО помогает решить равно две задачи: 1) геомеханическую – придание устойчивости стенкам выработки до момента полноценного крепления, и 2) фильтрационную – предотвращение просачивания подземных вод в строящуюся выработку.

Тампонаж закрепного пространства, выполняемый с целью гидроизоляции ствола и консолидации массива вблизи границы «бетон-порода», требует от ЛПО лишь решения фильтрационной задачи, поскольку механическую защиту обеспечивает установленная постоянная крепь. С одной стороны, необходимо наличие оттаявшей породы за крепью, способной принять инъекцию тампонажного раствора взамен вытесненной воды. С другой – сохранение целостного ЛПО, окружающего ствол, крайне желательно, поскольку оно играет роль барьера, препятствующего утечке значительных объемов тампонажного раствора в массив, вызывая тем самым перерасход материала.

Тепловыделения от твердеющего тампонажного раствора интенсифицируют размораживание массива, однако ЛПО уже не требуется, поскольку финальная стадия гидроизоляции ствола завершена. Разумеется, за исключением контрольного тампонажа отдельных участков по необходимости.

Таким образом, при проходке ствола отсутствуют интенсивные тепловые факторы, способные оказать существенное воздействие на некоторую область ЛПО. Исключение составляет применение стволопроходческих комбайновых комплексов, однако их тепловыделения должны быть учтены в проекте на замораживание горных пород и скомпенсированы корректным выбором режима работы замораживающего комплекса.

В условиях эксплуатации рудника матрица ранжирования тепловых факторов меняется к виду, представленному в таблице 2. Основным фактором тепловыделений становится проветривание.

В процессе строительства ствол проветривается как тупиковая выработка с малым расходом воздуха и его естественной температурой (внешней атмосферы), либо с минимальным подогревом в холодное время года. Скорость воздуха, поднимающегося от забоя к устью ствола, составляет десятые или даже сотые доли метра в секунду, что обеспечивает незначительный теплообмен с крепью.

Таблица 2

Ранжирование тепловых факторов в условиях действующего рудника

ТЕПЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ	Длительное	Кратковременное
Интенсивное	проветривание	тампонаж
Слабое	перемещение сосудов	—

Из опыта авторов статьи, в стволах с небольшой глубиной замораживания (300-400 м) разница максимальной и минимальной температур воздуха в стволе составляет не более 5°C, что при расходе 10 м³/с дает суммарно порядка 60 кВт тепловыделений в массив. В стволах с большой глубиной замораживания эта разница может достигать 15°C и более, что при аналогичном расходе воздуха дает около 200 кВт тепловой мощности.

В условиях действующего рудника подача воздуха в ствол осуществляется в объемах, необходимых для проветривания всего шахтного поля. Скорость воздуха в стволе возрастает до нескольких метров в секунду (до 15 м/с в стволах, по которым производятся спуск и подъем людей и грузов, согласно п. 152 ФНИП [3]), а его температура – до +20°C и более, что создает условия для интенсивного теплообмена с крепью и далее – с примыкающим к ней замороженным массивом.

Исследуем два возможных варианта развития ситуации:

– ствол является воздухоподающим, т. е. воздух поступает с поверхности с температурой окружающей среды в теплый период либо нагретый до +2°C в холодное время года (минимальная температура согласно п. 151 Федеральных норм и правил (ФНИП) [3]), за исключением шахт, обрабатывающих месторождения полезных ископаемых (МПИ) в зоне многолетней мерзлоты;

– ствол является выдающим, т. е. воздух в него поступает из рудника и имеет квазипостоянную температуру, величина которой, в отсутствие интенсивных источников тепловыделений в околоствольном дворе, определяется температурой окружающего массива.

Рассмотрим первый вариант в ситуации, близкой к реальности. Пусть воздух нагнетается в ствол, его температура на устье составляет +26°C в летний период, а вблизи дна ЛПО на глубине 850 м – +31°C, и распределение температуры по стволу линейно. Тогда разница температур составит +5°C, при оценке разогрева воздуха за счет гидростатического сжатия на +6,5°C [4]. Недостающие 6,5 – 5 = 1,5°C возникают за счет теплообмена воздуха с ЛПО через крепь. В таком случае при расходе воздуха 500 м³/с интегральная мощность тепловыделений составит уже порядка 1000 кВт.

В зимний период перепад температур воздуха на устье и вблизи дна ЛПО не так значителен и составляет около 6,0°C, что при той же величине нагрева за счет гидростатического сжатия дает недостающие 6,5 – 6,0 = 0,5°C и около 300 кВт тепловыделений в массив. Заметим, что ситуация идеализирована, т.к. учитываются только процессы теплообмена, а изменение температуры за счет массообмена (например, конденсации влаги) исключается из рассмотрения.

В условиях значительных расходов воздуха на контакте ЛПО с передовым бетоном может образовываться зона талой породы. Сезонные изменения температуры поступающего в ствол воздуха определяют динамику увеличения или уменьшения размеров этой зоны. При постоянном режиме работы замораживающей станции столь существенные колебания теплопритоков к замороженному массиву со стороны ствола могут вызвать значительные перемещения внутренней границы мерзлой породы: от полного промерзания крепи до отхода от нее на несколько метров, как показано на рисунке 1 (результаты теплофизического моделирования в программном обеспечении (ПО) «FrozenWall»[5, 6]).

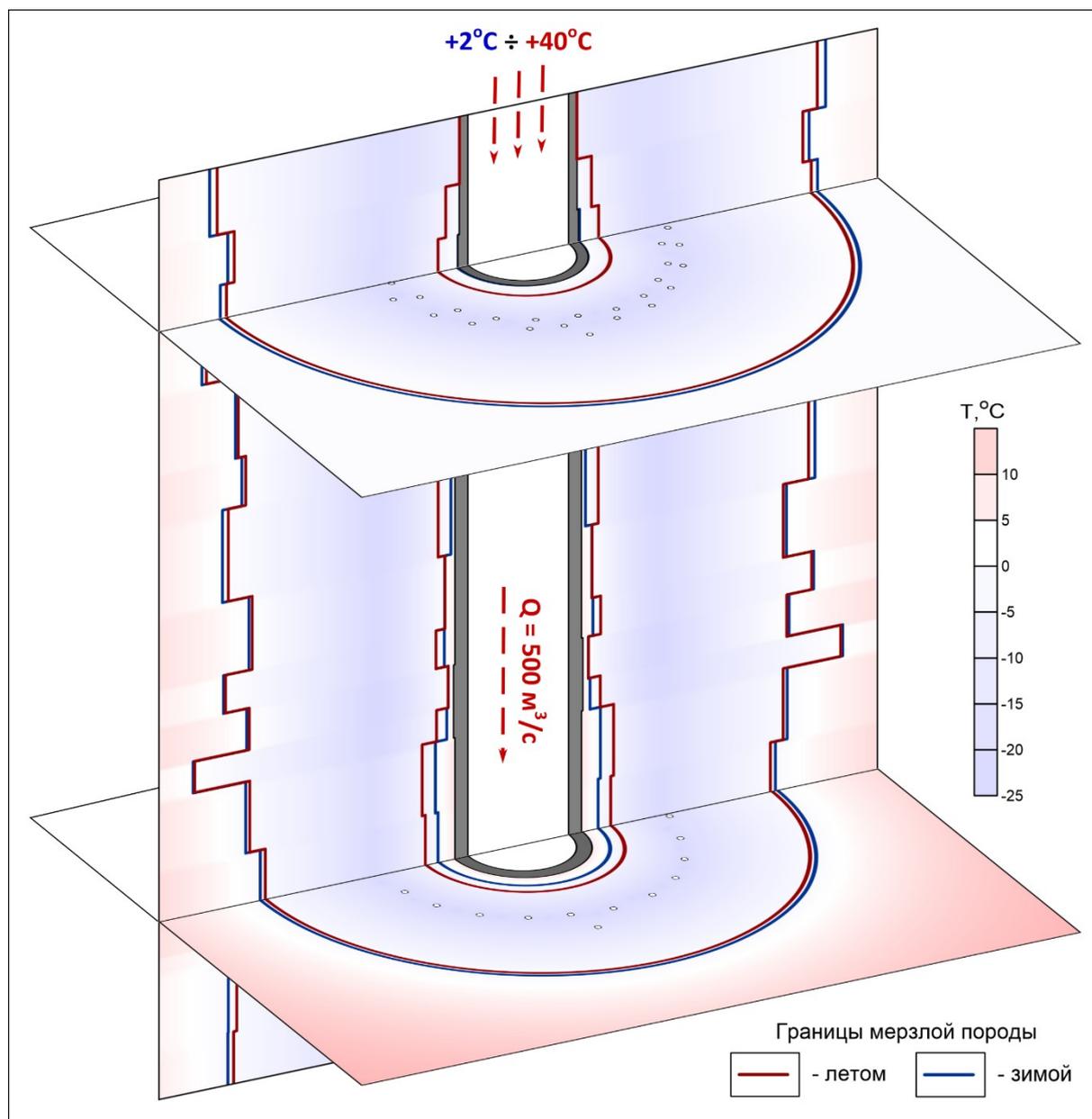


Рис. 1. Положение границ ЛПО на псевдоразрезе и в горизонтальных сечениях в наиболее теплое и холодное время года

Циклические температурные изменения и фазовые переходы (замерзания воды/плавление льда) меняют напряженно-деформированное состояние (НДС) массива и оказывают неблагоприятное влияние на крепь ствола. Поэтому рекомендуется коррек-

тировать режим работы замораживающего комплекса таким образом, чтобы перемещения внутренней границы ЛПО в течение года были минимальными (в допустимых пределах), например, как показано на рисунке 2.

В случае выдающего ствола температура поступающего в него воздуха является квазипостоянной в течение года и определяется температурой массива на сопряжении с горными выработками. В условиях глубоких рудников ее значение может достигать, $+30^{\circ}\text{C}$ и более. При тех же геометрических параметрах обратное гидростатическое расширение охладит воздух на $6,5^{\circ}\text{C}$, что снизит суммарное тепловыделение в массив и, соответственно, нагрузку на замораживающую станцию. Поскольку температуры в стволе не подвержены климатическим изменениям, режим работы замораживающего комплекса также является квазипостоянным и может быть определен из условия малого перемещения внутренней границы ЛПО.



Рис. 2. Относительное изменение температуры хладоносителя в рассольной сети для компенсации влияния климатического фактора в теплое и холодное время года

Предположим, что режим проветривания рудника в процессе эксплуатации меняется, воздухоподающий ствол становится выдающим и наоборот. В этом случае меняется характер теплопритоков к ЛПО со стороны крепи и требуется корректировка режима замораживания на основе математического моделирования.

В воздухоподающем стволе процессы теплообмена воздуха с крепью и гидростатического сжатия являются компенсирующими по отношению друг к другу, тогда как в выдающем – имеют сонаправленное действие. Следует отметить, что при сопряженном теплообмене в системе «воздух-крепь-массив» интенсивность процессов нелинейно меняется с глубиной [7, 8]. Данный вопрос требует отдельного изучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000396-6)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семин М.А., Левин Л.Ю., Пугин А.В. Расчет земных теплопритоков при искусственном замораживании породного массива. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – №1. – С. 162-171. – DOI: 10.15372/FTPRPI20200118.
2. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2021. – V. 107. – № статьи 103685. – DOI 10.1016/j.tust.2020.103685.

3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТИЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
4. Зайцев А.В., Семин М.А., Паршаков О.С. Особенности формирования теплового режима в воздухоподающих стволах в холодный период года // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250, № 4. – С. 562-568. – DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9.
5. «Frozen Wall»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2018666337 / Богомягков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А.; заявитель и правообладатель ПФИЦ УрО РАН. – 2018663501; заявл. 28.11.2018; зарегистрировано 17.12.2018; опубл. 17.12.2018. – 1 с.
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Паршаков О.С. Совершенствование методов прогнозирования состояния ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов с использованием распределенных измерений температуры в контрольных скважинах // Записки Горного института. – 2019. – Т. 237, № 3. – С. 268-274. – DOI: 10.31897/PMI.2019.3.268.
7. Семин М.А., Князев Н.А., Кормщиков Д.С. Тепловые процессы в вентиляционном стволе глубокого рудника при реверсировании воздушной струи в холодное время года // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 1. – С. 112-123. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230111.
8. Olkhovskiy D.V., Kuzminykh E.G., Zaitsev A.V., Semin M.A. Study of Heat and Mass Transfer in Ventilation Shafts of Deep Mines in the Case of Airflow Reverse // Journal of physics: Conference Series. – 2021. – V. 1945, № 1 – № статьи 012044. – DOI: 10.1088/1742-6596/1945/1/012044.

УДК: 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.1.22

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗООБИЛЬНОСТИ РАБОЧИХ ЗОН НА РУДНИКАХ ВМКМС

А.Н. Стариков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Работа посвящена оценке влияния фактора неравномерности газовыделения из призабойного пространства тупиковых выработок рудников ВМКМС при работе добычного оборудования на расчет относительной газообильности рабочих зон. Рассмотрено несколько способов определения коэффициента неравномерности газовыделения. Выполнены замеры концентрации горючих и токсичных газов для определения неравномерности газовыделения. Основной идеей разработки коэффициента является повышение точности показаний при определении относительной газообильности в условиях цикличности работы добычного оборудования. Применение коэффициента неравномерности в формуле по определению относительной газообильности приведет к повышению точности при определении необходимого количества воздуха для проветривания рабочих зон комбайновых комплексов.

Ключевые слова: рудничный воздух, рудничная вентиляция, относительная газообильность, газовая съемка, рабочая зона, коэффициент неравномерности, мокрый способ.

Очистные работы на Верхнекамском месторождении калийных и магниевых солей (ВМКМС) ведутся при помощи коротких очистных забоев комбайновым способом. Известно, что разработка промышленных пластов на данном месторождении почти всегда сопровождается процессом выделения газов из массива. Такие условия, в соответствии с п. 164 действующих правил безопасности [1], требуют разработки специальных мероприятий [2] по безопасному ведению горных работ на месторождении. К наиболее важным мероприятиям для сохранения безопасных усло-

вий на рудниках относятся: регулярный контроль рудничной атмосферы, отнесение рабочих зон, где ведется добыча полезного ископаемого, к группам опасности по газу, а также внимательный подход к определению требуемого количества воздуха для проветривания рабочих зон по «газовому фактору». Все эти запросы объединяет одна задача: проведение регулярных газовых съемок. Газовая съемка – это комплекс работ по определению относительной газообильности рабочих зон рудника. Относительная газообильность рабочей зоны, как результат проведенной газовой съемки, является ключевым критерием при расчете требуемого количества воздуха для проветривания рабочих зон по «газовому» фактору. Под рабочей зоной тупиковой камеры понимается одиночная тупиковая выработка, в которой ведутся очистные, подготовительные или разведочные работы, связанные с отбойкой руды или пустой породы. Рабочая зона тупиковой выработки ограничивается длиной выработки от устья до забоя.

Согласно методике, газовая съемка на рудниках ВМКМС включает в себя следующие задачи:

- отбор не менее 3-х проб (для определения среднего значения) за время проведения замеров на исходящей струе воздуха из рабочей зоны, а также отбор пробы свежего воздуха подходящего к рабочей зоне;
- лабораторный анализ состава отобранных проб хроматографическим методом для определения состава и концентрации газов;
- расчет относительной газообильности для каждой из исследуемых рабочих зон.

Для отбора проб рудничного воздуха на рудниках ВМКМС используют «мокрый способ» (метод вытеснения), а также другие способы отбора проб, обеспечивающие надежность хранения, выборки и транспортировки пробы [3]. Анализ состава рудничного воздуха производится в лабораторных условиях посредством газовой хроматографии. Расчет относительной газообильности, согласно «Специальным мероприятиям», производится по формуле:

$$Q_3 = 180 \times (I_{\text{сриск}} - I_{\text{св}}) / \sum A, \text{ м}^3/\text{т} \quad (1)$$

где $\sum A$ – суммарное количество руды, отбитое комбайновым комплексом в течение 3 часов, когда производились замеры, тонн; $I_{\text{сриск}}$ – среднее количество газа, проходящего по выработке на исходящей струе, $\text{м}^3/\text{мин}$; $I_{\text{св}}$ – количество газа, проходящего по выработке на свежей струе, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Проблематика

В действующей формуле по определению относительной газообильности используются средняя (по времени) концентрация соответствующего газа. Однако при усреднении измеренной концентрации газа существует риск занижения значений, так как известно, что в пределах одного шахтного поля газ в массиве распределен неравномерно [3]. Кроме того, комбайновый комплекс имеет возможность регулировки производительности с помощью скорости подачи на забой, а также допускаются простои во время доставки руды самоходным вагоном до рудоспускной скважины. Учитывая факторы цикличности работы добычного оборудования (рис. 1) и неравномерности распределения газа в массиве, отбор проб может производиться не в максимальной (пиковой) производительности комбайна, а значит не учитывать максимальную концентрацию, которая может выделяться из массива. При этом расчет количества воздуха по «газовому фактору» выполняется с целью разбавления выделяющихся газов в рабочей зоне.

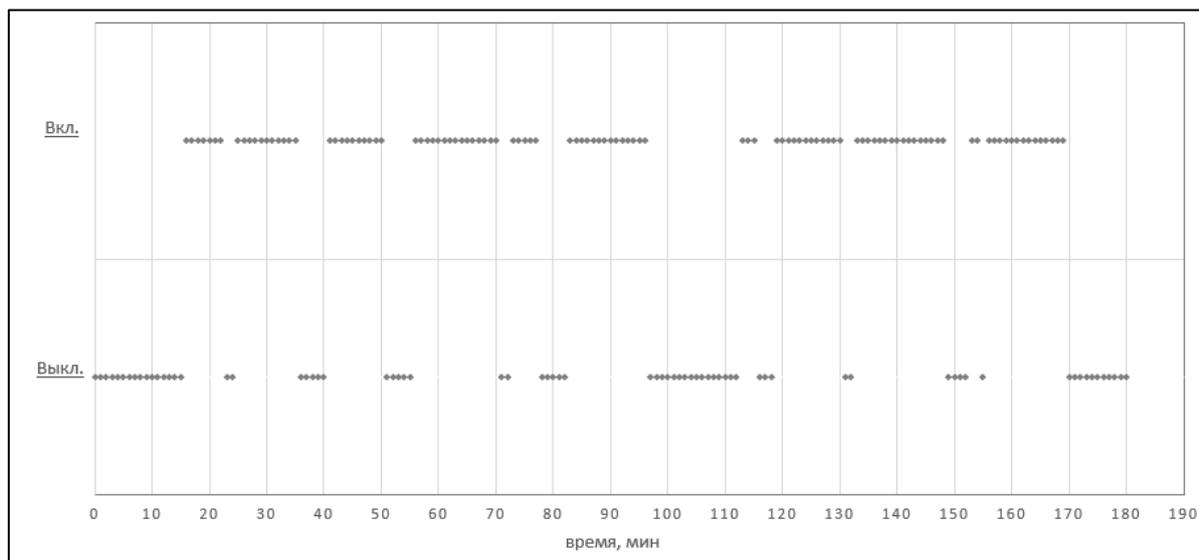


Рис. 1. Режим работы комбайнового комплекса в течение 3 часов

Задача

Описанные факторы позволяют предположить, что в условиях цикличности работы комбайнового комплекса [4] процесс газовыделения из массива протекает неравномерно, что может значительно занижать значения относительной газообильности при расчете по средним значениям концентрации. Занижение значений относительной газообильности могут негативно сказаться на проветривании рабочей зоны ввиду некорректного расчета количества воздуха, что недопустимо в вопросах проветривания. Важной задачей работы является исследование возможности учета неравномерности газовыделения при расчете относительной газообильности рабочих зон.

Для этого предлагается рассмотреть:

- равномерный отбор проб в течение 3-х часов, который описан в действующей методике, заменить на единоразовый отбор проб непосредственно во время работы комбайна при максимальной нагрузке;
- для достоверности результата отбирать не менее 3-х проб в разных точках поперечного сечения выработки для определения среднего значения концентрации по сечению выработки (Рис. 2);
- использовать техническую производительность комбайна при расчете относительной газообильности (т/мин);
- определить степень неравномерности газовыделения из массива и внести соответствующий коэффициент в формулу.

Согласно предлагаемым изменениям, формула относительной газообильности изменится до следующего вида:

$$Q_3 = (I_{\text{сриск}} - I_{\text{св}}) \times K_n / A, \text{ м}^3/\text{т} \quad (2)$$

где A – техническая производительность комбайнового комплекса, т/мин; $I_{\text{сриск}}$ – среднее по сечению количество газа, проходящего по выработке на исходящей струе, $\text{м}^3/\text{мин}$; $I_{\text{св}}$ – количество газа, проходящего по выработке на свежей струе, $\text{м}^3/\text{мин}$; K_n – коэффициент неравномерности газовыделения.

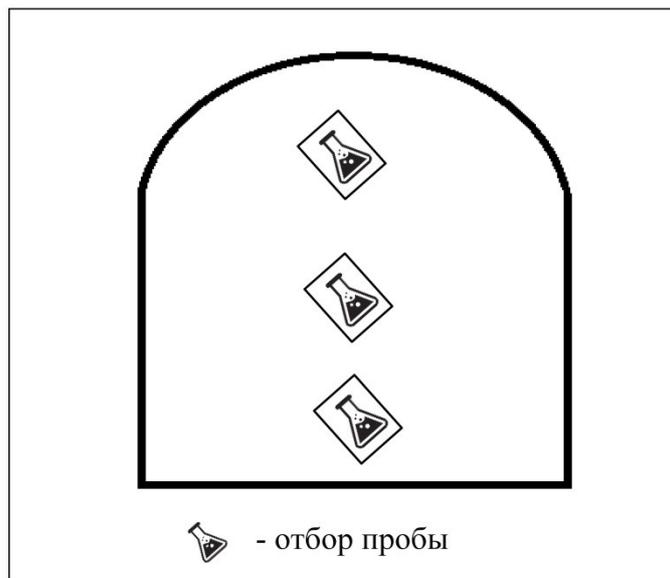


Рис. 2. Отбор проб в разных точках сечения выработки

Метод

Коэффициент неравномерности газовыделения определяет степень неравномерности распределения газа в массиве. Следующей задачей данной работы является разработка метода определения коэффициента неравномерности газовыделения.

В рамках поставленной задачи рассмотрены существующие методы оценки показателя распределения газа в массиве. Разумеется, самым очевидным способом оценки такого показателя являются прогнозные карты газоносности рудников [5], которые показывают распределение газа в пределах шахтного поля. Стоит сказать, что такие карты представляют собой прогнозный инструмент количественной оценки распределения газа в массиве. Нам же необходима качественная оценка показателя разброса между максимальным и минимальным значением концентрации, фиксируемой при работе добычного оборудования на исследуемом участке. Таким образом, коэффициент неравномерности газовыделения есть диапазон отклонения значений концентрации в пределах участка. Для определения этого диапазона необходимо произвести замеры концентрации выделяющегося газа на некотором отрезке продвижения комбайна в массиве.

Наблюдения

Для определения величины неравномерности проведены исследования на одном из рудников ВМКМС. Исследования включали в себя серию прямых измерений и отбор проб на определение концентрации метана и сероводорода в пределах одного рабочего блока в очистной камере на пласте «АБ» во время работы добычного оборудования.

Эксперимент проводился в течение 2-х рабочих смен в рабочей зоне комбайнового комплекса Урал-20Р. Проветривание рабочей зоны во время проведения эксперимента осуществлялось в стабильном режиме. Проведение измерений и отбор проб осуществлялся на исходящей струе из тупикового забоя, в 10 метрах от комбайнового комплекса (Рис. 3).

Отбор проб осуществлялся «мокрым» способом. Измерения проводились каждые 5 метров по мере продвижения комбайна. После проведения эксперимента отобранные пробы доставлялись в лабораторию для анализа на газовом хроматографе Хромос-1000.

За время проведения наблюдений было произведено 14 серий измерений, при этом комбайновый комплекс продвинулся на 65 метров (Рис. 3).

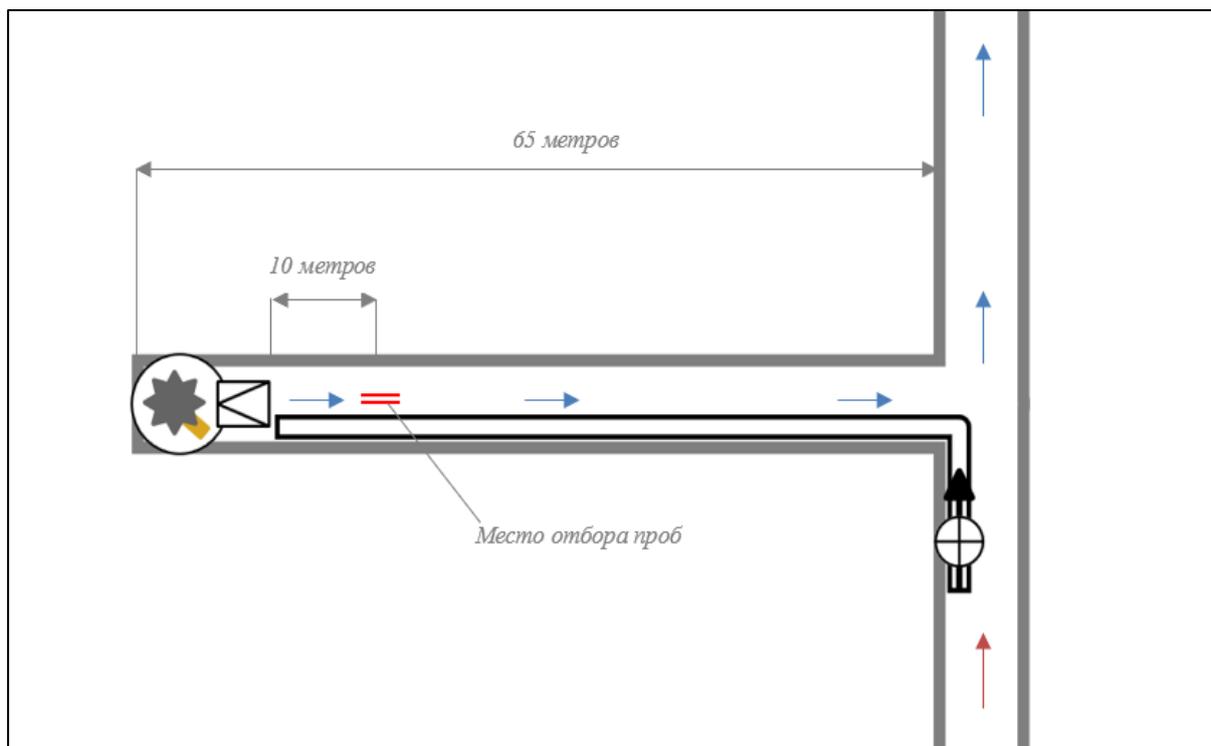


Рис. 3. Место проведения эксперимента

Результат

Выборка измеренных концентраций метана в очистной камере (Рис. 4) подчинилась статистической обработке, и были рассмотрены два варианта определения коэффициента неравномерности. Среднее значение концентрации метана по представленной выборке равно 0,185%.

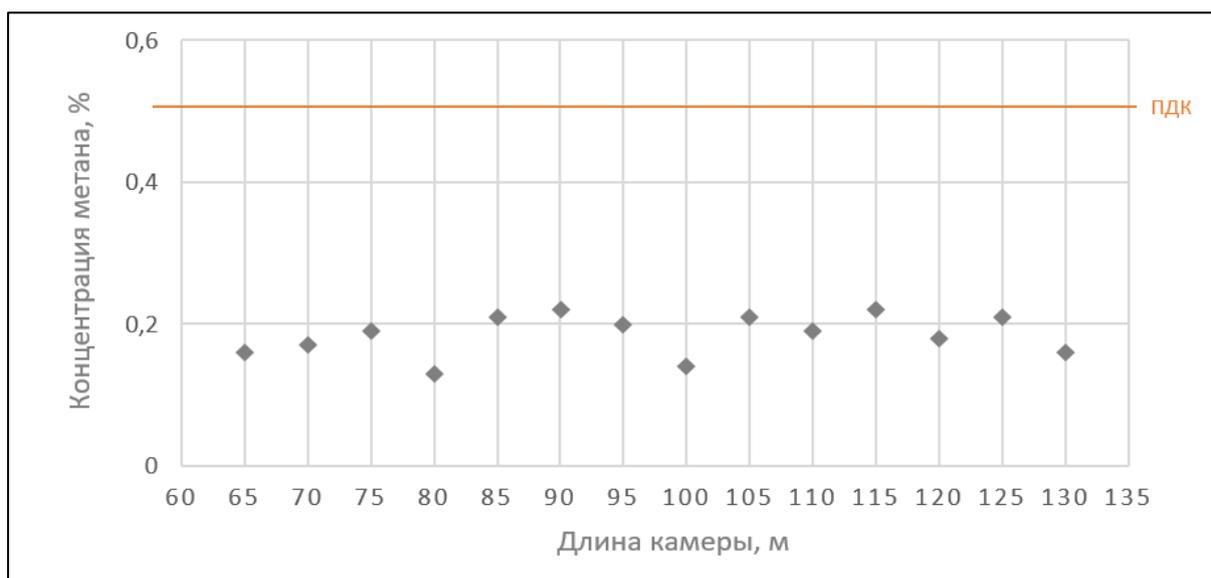


Рис. 4. Замеры концентрации по длине камеры

Простой вариант определений коэффициента неравномерности с помощью собранных данных – это отношение максимальной и минимальной концентрации метана.

$$K = C_{\text{макс}} / C_{\text{мин}} = 1,69 \quad (3)$$

Такая оценка не может восприниматься всерьез, так как мы имеем сравнительно малую выборку значений. Замеренные концентрации метана в другой промежуток времени или концентрация может не попасть в интервал замеренных значений. Поэтому вторым способом рассмотрена статистическая обработка полученных значений, а именно интервальная оценка (доверительный интервал). Коэффициент неравномерности (K), определенный с помощью статистической обработки, равен $K = 1,66$.

Разница в полученных значениях с применением простого варианта обработки полученных значений и варианта с помощью статистической обработки составляет менее 2%. Таким образом, коэффициент неравномерности газовыделения при определении газообильности рабочих зон в экспериментальном варианте равен $K = 1,66$. Коэффициент использован с применением выборки по метану; такая выборка может производиться, если необходимо, и по токсичным газам; наибольший коэффициент принимается к расчету.

Заключение

В работе выявлены возможные факторы, влияющие на определение относительной газообильности рабочих зон на рудниках ВМКМС, с помощью настоящей формулы. Рассмотрены варианты учета производственных факторов и неравномерности газовыделения из массива при определении значений относительной газообильности. Предложен новый способ отбора проб при работе добычного оборудования. Рассмотрен способ определения коэффициента неравномерности газовыделения из массива при работе добычного оборудования. Проведены замеры концентрации выделяемого газа на отрезке массива (65 метров) для определения коэффициента неравномерности газовыделения.

Проанализированы средние показатели концентрации горючего газа, фиксируемые в рабочей зоне, и определен коэффициент неравномерности с помощью статистической обработки полученных значений.

При сравнении действующей формулы и формулы с использованием экспериментального коэффициента неравномерности в условиях одной рабочей зоны значение относительной газообильности при применении коэффициента неравномерности газовыделения выросло на 50%, что вследствие даст рост требуемого количества воздуха для проветривания рабочей зоны. Как и предполагалось, средние значения концентрации при расчете занижают значения относительной газообильности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
2. Специальные мероприятия по безопасному ведению горных работ в условиях «газового режима». Пермь; Березники, 2016.
3. Исаевич А.Г., Стариков А.Н., Мальцев С.В. Совершенствование метода отбора проб воздуха для определения относительной газообильности горючих газов в рудничной атмосфере // Горный ин-

- формационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 4. – С. 143-153. – DOI: 10.25018/0236-1493-2021-4-0-143.
4. Щерба В.Я., Башура А.Н., Андрейко С.С. Управление газодинамическими процессами на Старобинском месторождении калийных солей / под ред. В.Я. Прушака. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 194 с.: ил.
 5. Земсков А.Н., Лискова М.Ю., Заалишвили В.Б., Шамрин М.Ю. Современные технологические и технические решения при ведении горных работ на калийных рудниках // Изв. ТулГУ. Науки и Земле. – 2022. – №. 2. – С. 284-296.
 6. Бобров Д.А. Информационно-справочная система газодинамических явлений и газоносности для условий шахтных полей рудников ПАО «Уралкалий» // Проблемы недропользования. – 2016. – № 2(9). – С. 12-18. – DOI:10.18454/2313-1586.2016.02.012.
 7. Гришин Е.Л. Газовый режим в современной концепции рудничной вентиляции // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 101-104. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.20.

Журнал
ГОРНОЕ ЭХО
Научно-техническое издание

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук – ПФИЦ УрО РАН
614990, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а, тел. (342) 212-60-08

Издатель
Горный институт УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А; тел. (342) 216-75-02

Техническое редактирование В.В. Трескова
Верстка А.Б. Баталин
Подписано в печать 05.06.2023. Формат 60*84/8. Бумага ВХИ. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 15,11. Тираж 100 экз. Бесплатно. Дата выхода в свет 20.06.2023.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР)
(Свидетельство ПИ № ФС77-75332 от 25.03.2019 г.)

Адрес редакции:
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А; тел. (342) 216-75-02;
e-mail: arc@mi-perm.ru; www.mi-perm.ru
