

# ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 550.4

DOI:10.7242/echo.2023.2.1

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ( $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ ) В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ НА ТЕРРИТОРИИ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

А.С. Казанцева

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Приведены сводные данные изотопного состава ( $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ ) природных вод, в частности атмосферных осадков, поверхностных вод, естественных выходов подземных вод, воды из скважин гидрогеологической наблюдательной сети и рассолов Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВМКМС). Материал собран по результатам исследований в разные периоды, начиная с 2011 г. по 2022 г.

**Ключевые слова:** Соликамская впадина, Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей, изотопный состав, природные воды.

### Введение

Верхнекамское месторождение калийно-магниевых солей – одно из крупнейших месторождений калийных солей в России, территориально расположенное на севере Пермского края (Чердынский, Красновишерский, Соликамский, Усольский и Добрянский районы и территории, подчиненные городам Березники и Александровск), в структурном плане приуроченное к центральной части Соликамской впадины Предуральяского краевого прогиба. Мониторинг геологической среды в пределах ВМКМС, организованный в 1998 г., предусматривает усовершенствование научно-методического подхода в исследовании и определении генетических типов рассолов на рудниках ОАО «Уралкалий». Для этого с 2010-11 гг. различными предприятиями (ОАО «Галургия», ПГНИУ) выполнялись научно-исследовательские работы по апробации изотопных методов для определения генезиса рассолопроявлений. Информация об условиях формирования состава подземных вод на территории Верхнекамского месторождения необходима для повышения надежности заключений о степени опасности выявляемых рудничных рассолопроявлений.

### Материалы и методы

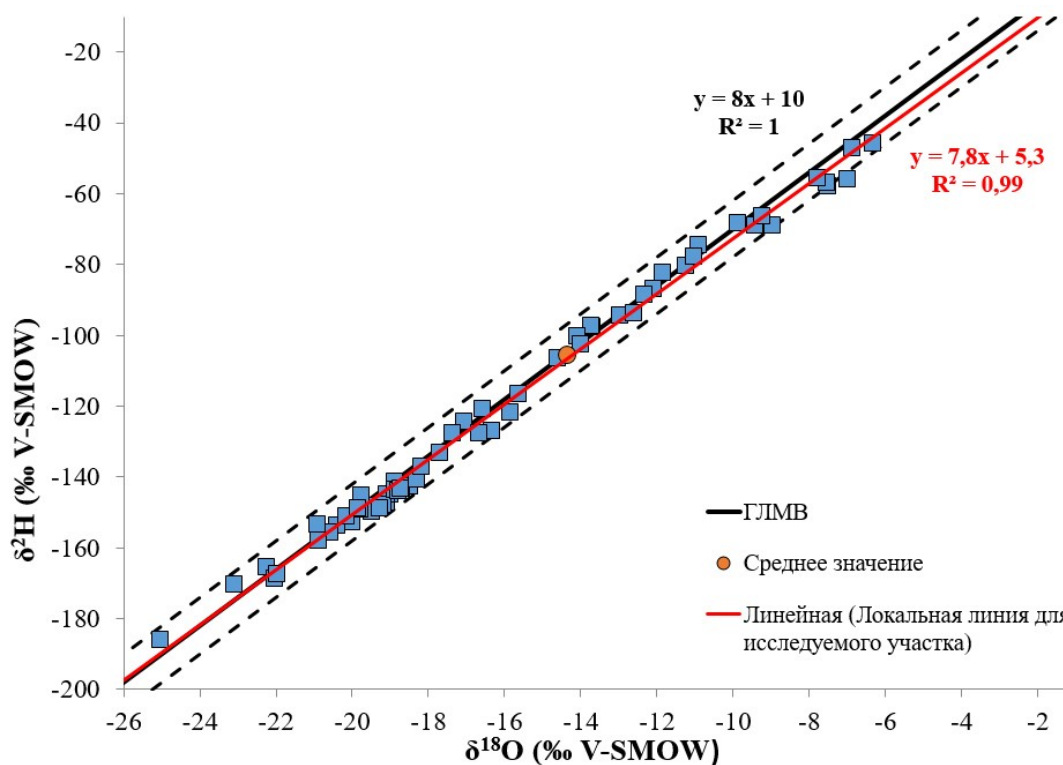
В качестве фактического материала для исследования послужили метеорные воды (атмосферные осадки), отобранные на территории гг. Березники, Соликамска и п. Искор, воды поверхностного руслового стока, естественных выходов подземных вод в виде родников, а также подземные воды надсолевой толщи и рассолов из горных выработок ВМКМС на рудниках ОАО «Уралкалий» БКПРУ-1-4 и СКРУ-1-3. Опробование вод поверхностного стока, родников, вод из скважин, надсолевой толщи и рассолов проводили сотрудники геологической службы ОАО «Уралкалий», атмосферных осадков – сотрудники Кунгурской лаборатории-стационара «ГИ УрО РАН» [1-3, 6].

Изотопный анализ природных вод, рассмотренных в работе, выполнен в гидрохимической лаборатории кафедры геологии и гидрогеологии Пермского государственного национального исследовательского университета, Института геологии

Инсбрукского университета (Австрия) и Санкт-Петербургского государственного университета. Результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно стандарта V-SMOW. Средняя точность измерений  $\delta^{18}\text{O}$  составила  $\pm 0,1\%$ ,  $\delta^2\text{H}$  –  $\pm 0,4\%$ .

### Результаты и обсуждение

Атмосферные осадки. Изотопный облик подземных вод, так же, как и гидрохимический, подчиняется и формируется в зависимости от распределения изотопного состава атмосферных осадков. Атмосферные осадки являются основным источником питания подземных вод зоны активного водообмена, поверхностного стока, поэтому интерпретация данных об изотопном составе осадков является основой для понимания процессов формирования состава как подземных, так и поверхностных вод. На рисунке 1 приведены данные по распределению стабильных изотопов  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в атмосферных осадках на территории исследования.



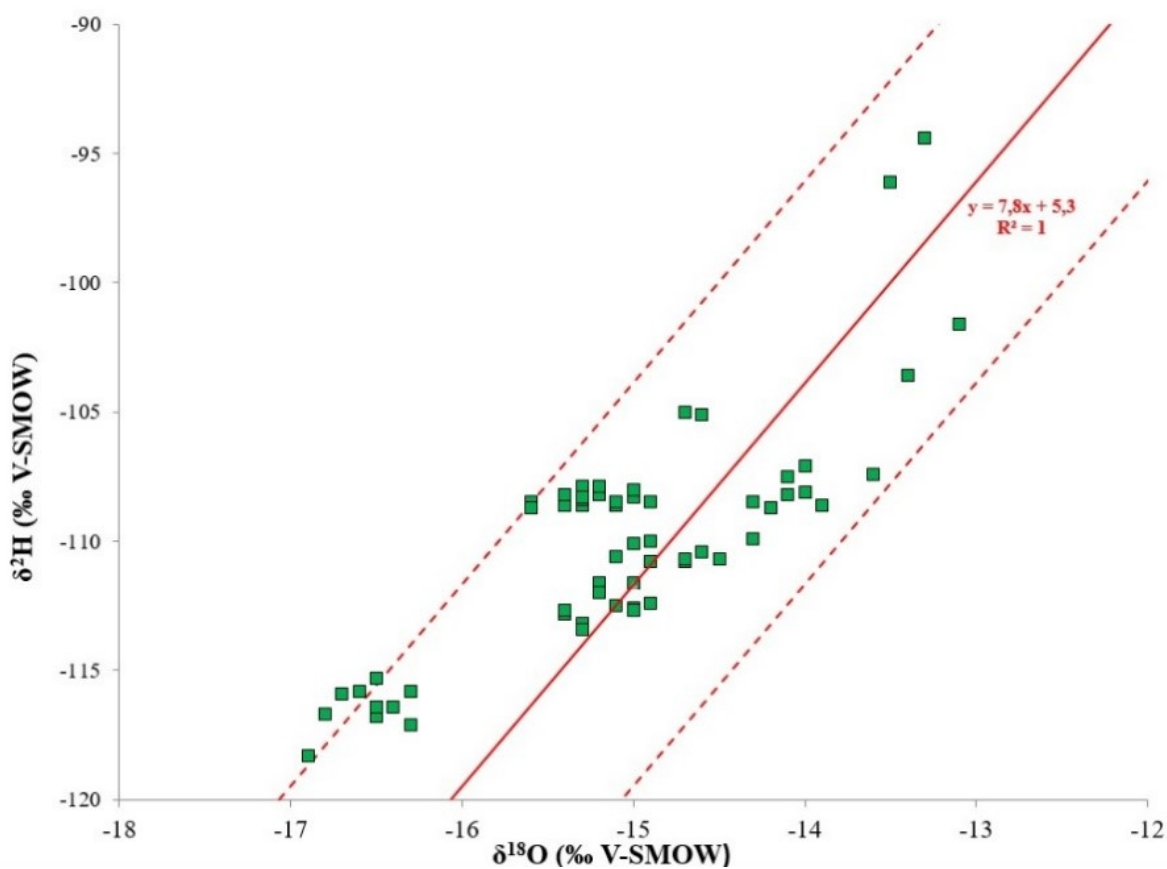
**Рис. 1.** Локальная линия метеорных вод для участка исследований.

Штриховые линии ограничивают «коридор»  $\pm 1\%$   $\delta^{18}\text{O}$ , отражающий обычную вариабельность изотопных параметров атмосферных осадков

На основании ряда наблюдений в 2013-22 гг. (51 проба) получена локальная линия метеорных вод (ЛЛМВ) для Соликамской впадины, имеющая вид  $\delta^2\text{H} = 7,8 \times \delta^{18}\text{O} + 5,3$ . По сравнению с глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ; линия Крейга;  $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$  [4]) ЛЛМВ характеризуется несколько меньшим угловым наклоном и водородным избытком. Изотопный состав атмосферных осадков изменяется в широких пределах  $\delta^{18}\text{O} = -6,3..-25,1\%$ ,  $\delta^2\text{H} = -45,7..-185,7\%$ . Вариации значений  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках в течение года закономерны [5]: наиболее «тяжелые» осадки выпадают в июле-августе (средние значения  $\delta^{18}\text{O} \sim -8\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -58\%$ ), наиболее «легкие» – в декабре-феврале (средние значения  $\delta^{18}\text{O} \sim -20\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -150\%$ ). С учетом имеющихся данных рассчитан

среднеарифметический изотопный состав атмосферных осадков  $\delta^{18}\text{O} = -14,3\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -105,5\text{‰}$ .

Поверхностные воды. Поверхностные воды являются важным компонентом гидрологического цикла и одним из факторов формирования состава подземных вод. Существенное значение имеют состав речных вод, а также характер взаимоотношения речных вод с подземными. В пределах ВМКМС опробованы и проанализированы воды поверхностного руслового стока из рек Макродойка, Суходойка, Поповка, Усолка, Черная, Зырянка, Ленва, Волим, Сылва, Коновалиха, Бушкашер, Селянка и некоторых ручьев. Отбор проб производился в весенний, летний и осенний периоды. Распределение стабильных изотопов в поверхностных водах приведено на рисунке 2.

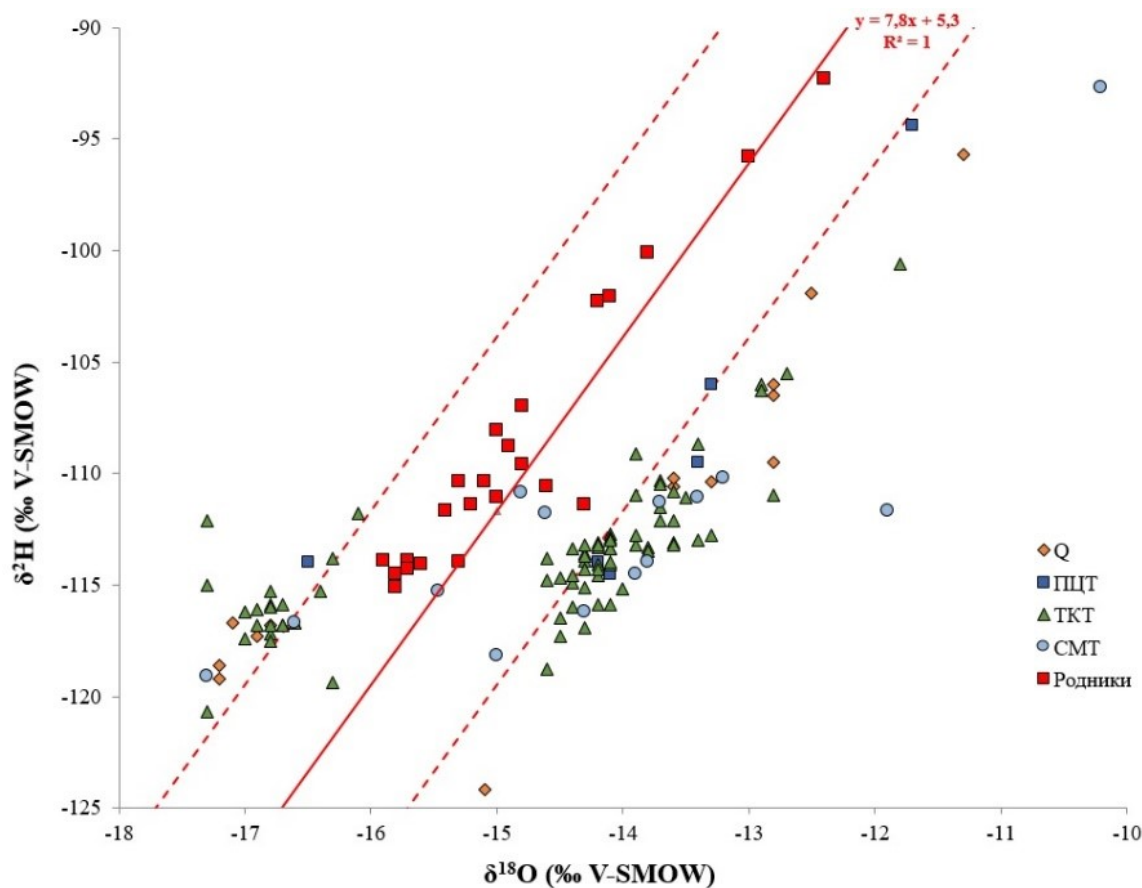


**Рис. 2.** Распределение стабильных изотопов в поверхностных водах в районе Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Сплошная красная линия – ЛЛМВ (см. рис. 1)

Изотопный состав поверхностных вод изменяется от  $-13,1\text{‰}$  до  $-16,9\text{‰}$  по  $\delta^{18}\text{O}$  и от  $-94,4\text{‰}$  до  $-118,3\text{‰}$  по  $\delta^2\text{H}$  и демонстрирует закономерное для этих вод сезонное утяжеление изотопного состава в летне-осенний период. Также рассчитаны средние значения изотопного состава поверхностных вод:  $\delta^{18}\text{O} \sim -15,1\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -110,1\text{‰}$ , что несколько легче средних значений атмосферных осадков. Такое распределение указывает на преобладающую роль талых относительно изотопно «легких» вод в питании вод поверхностного руслового стока. Среди изученных водотоков реки Усолка и Суходойка имеют наиболее облегченный состав ( $\delta^{18}\text{O} \sim -15,9\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} \sim -112,0\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O} \sim -15,8\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} \sim -112,2\text{‰}$ , средние значения со-

ответственно), р. Ленва – наиболее утяжеленный состав ( $\delta^{18}\text{O} \sim -14,2\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} \sim -105,9\text{‰}$ ). Химический состав исследованных поверхностных вод разнообразен, основные макрокомпоненты, входящие в состав вод – Na, Mg, Ca,  $\text{HCO}_3$  и Cl, соответственно, минерализация вод изменяется в широком диапазоне (0,12-269 г/л). Повышенные значения минерализации свидетельствуют о разгрузке высокоминерализованных подземных вод в воды поверхностного стока. Отчетливой зависимости при изменении минерализации и изотопного состава в речных водах и ручьях не выявлено: несколько обеднены изотопами кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta^2\text{H}$ ) солончатые (минерализация 1-10 г/л) поверхностные воды ( $\delta^{18}\text{O} \sim -16,0\text{‰}$  и  $\delta^2\text{H} \sim -112,5\text{‰}$ ).

**Подземные воды.** В пределах месторождения в весенний, летний и осенний периоды опробованы воды родникового стока и из наблюдательных и инженерно-геологических скважин, которые приурочены к разным отложениям: четвертичным, пестроцветной, терригенно-карбонатной и соляно-мергельной толще. Подземные воды из скважин имеют следующие изотопные характеристики (рис. 3): воды четвертичных отложений –  $\delta^{18}\text{O} = -11,3\text{‰}..-17,2\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -95,7\text{‰}..-124,2\text{‰}$ , воды пестроцветной толщи –  $\delta^{18}\text{O} = -11,7\text{‰}..-16,5\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -94,4\text{‰}..-114,5\text{‰}$ , воды терригенно-карбонатной толщи –  $\delta^{18}\text{O} = -11,8\text{‰}..-17,3\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -100,6\text{‰}..-127,5\text{‰}$  и воды соляно-мергельной толщи –  $\delta^{18}\text{O} = -10,2\text{‰}..-17,3\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -92,7\text{‰}..-119,1\text{‰}$ . Для сравнения, изотопный состав вод родникового стока изменяется от  $-12,4\text{‰}$  до  $-17,5\text{‰}$  по  $\delta^{18}\text{O}$  и от  $-92,3\text{‰}$  до  $-118,1\text{‰}$  по  $\delta^2\text{H}$ .



**Рис. 3.** Распределение стабильных изотопов в подземных водах в районе Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Сплошная красная линия – ЛЛМВ, Q – воды четвертичных отложений, ПЦТ – воды пестроцветной толщи, ТКТ – воды терригенно-карбонатной толщи, СМТ – воды соляно-мергельной толщи



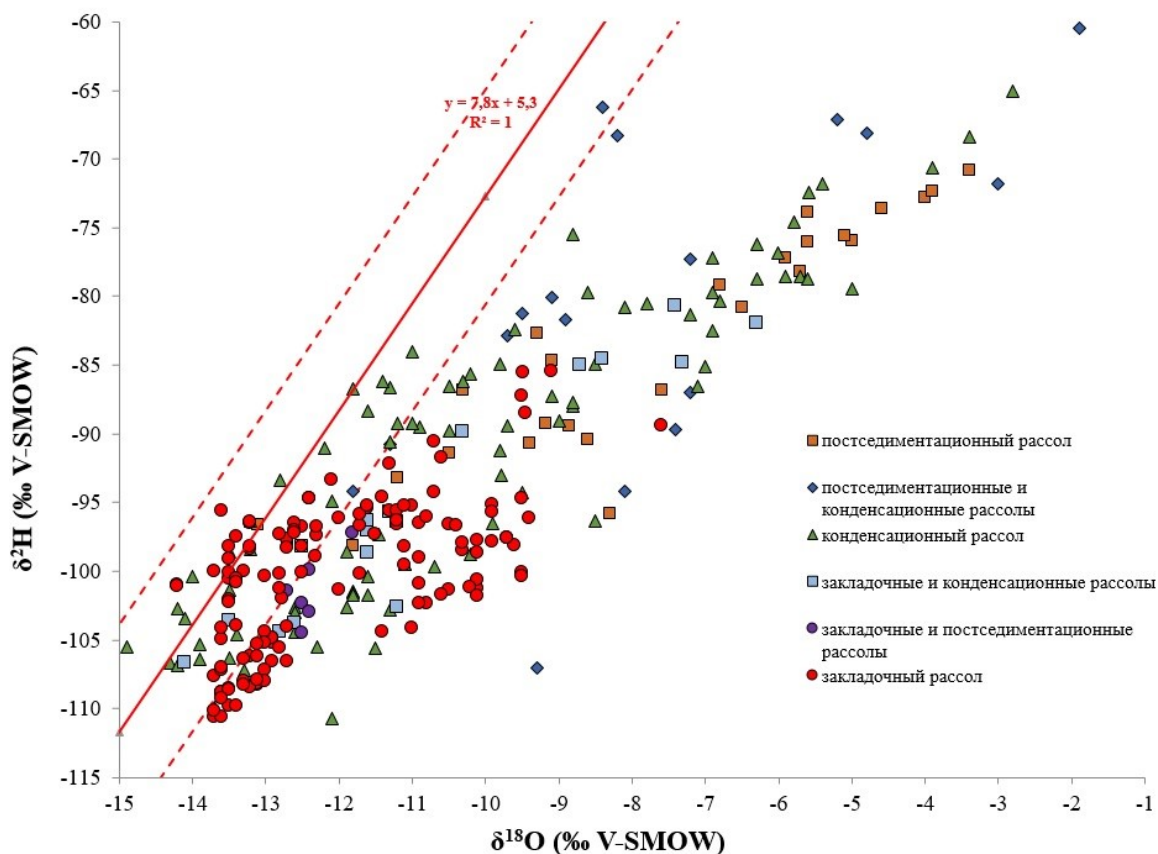
Данные по естественным выходам подземных вод в координатах  $\delta^{18}\text{O} \div \delta^2\text{H}$  хорошо согласуются с ЛЛМВ для района исследований. Уравнение, аппроксимирующее соотношение содержания  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в пробах воды, имеет вид:  $\delta^2\text{H} = 6,6 \times \delta^{18}\text{O} - 10,8$  при достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,90$ . То есть полученные значения изотопного состава родниковых вод указывают на их метеогенное происхождение. Что же касается подземных вод, отобранных из наблюдательных и инженерно-геологических скважин, то полученные значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  несколько смещены влево и вправо относительно локальной линии метеорных вод. Для каждой группы скважинных вод прослежено сезонное изменение состава с облегчением в весенний период и утяжелением в летний. Это свидетельствует о разбавлении подземных вод разных толщ метеогенными водами. Воды пестроцветной толщи несколько обогащены тяжелыми изотопами водорода и кислорода ( $\delta^{18}\text{O} \sim -13,9\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -108,7\%$ ), наиболее «легкий» состав имеют подземные воды терригенно-карбонатной толщи ( $\delta^{18}\text{O} \sim -14,7\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -114,0\%$ ). Отмечена широтная зональность изменения изотопного состава вод, так, подземные воды, отобранные на территории Соликамских рудников (СКРУ) несколько легче по изотопному составу, чем воды, отобранные на территории Березниковских рудников (БКПРУ).

Подземные воды исследуемых скважин относятся к разным гидрогеологическим подразделениям, и минерализация вод изменяется от пресных (менее 1 г/л) к рассолам (более 35 г/л). В зависимости от изменения минерализации проанализированы изотопные изменения. Отчетливо выделяются пресные воды, которые имеют несколько облегченный состав вод:  $\delta^{18}\text{O} \sim -15,2\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -114,8\%$ . Установлена статистически значимая взаимосвязь между минерализацией и изотопным составом пресных вод ( $r = 0,47-0,54$ , при  $r_{\text{crit}} = 0,31$  при  $\alpha = 0,05$ ,  $R^2 = 0,22-0,29$ ). Изотопные соотношения солоноватых (1-10 г/л), соленых (10-35 г/л) и рассольных (свыше 35 г/л) вод изменяются в узком диапазоне –  $\delta^{18}\text{O} = -14,2..-14,3\%$ ,  $\delta^2\text{H} = -111,9..-112,9\%$ , и взаимосвязь между параметрами незначительная ( $r = -0,04-0,08$ ).

Средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в пробах воды скважин и родниковом стоке ( $\delta^{18}\text{O} \sim -14,4\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -111,1\%$ ) соответствуют средним значениям стабильных изотопов атмосферных осадков ( $\delta^{18}\text{O} \sim -14,3\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -105,5\%$ ), что предполагает их метеогенное происхождение. На это же и указывает сезонность изменения состава подземных вод. Но точную информацию о генезисе вод по имеющимся изотопным данным предоставить сложно, поскольку отсутствуют данные за зимний период.

**Рассолы.** Согласно «Руководству по ликвидации возможных рассолопроявлений в калийных рудниках ОАО «Уралкалий» (технологический регламент, 2011 г.)» выделена генетическая классификация рудничных рассолов: постседиментационные, конденсационные, закладочные и надсолевые воды и рассолы. Также различают смешанный постседиментационный и конденсационный, смешанный закладочный и конденсационный, смешанный закладочный и конденсационный, и смешанный закладочный и постседиментационный рассолы. Генетические типы выделены на основе их химического состава, но в то же время отсутствуют четкие критерии выделения того или иного генетического типа рассола только по гидрохимическим данным. Поэтому для каждого генетического типа рассолов произведен изотопный анализ для попытки идентификации их по соотношению  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  в этих водах.

Рассолы опробованы на рудниках гг. Березники и Соликамск в разные периоды года. Изотопный состав рассолов контрастен по сравнению с изотопным составом подземных вод скважин:  $\delta^{18}\text{O} = -1,9..-16,9\%$ ,  $\delta^2\text{H} = -60,5..-115,7\%$  (рисунок 4), средние значения составляют для  $\delta^{18}\text{O} \sim -10,9\%$ , для  $\delta^2\text{H} \sim -95,1\%$ .



**Рис. 4.** Распределение стабильных изотопов в пробах рассолов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей. Сплошная красная линия – ЛЛМВ

Для каждого типа рассолов также определены средние содержания  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ : закладочные –  $\delta^{18}\text{O} \sim -13,2\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -105,7\%$ , постседиментационные –  $\delta^{18}\text{O} \sim -7,8\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -83,8\%$ , конденсационные –  $\delta^{18}\text{O} \sim -10,2\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -91,5\%$ , смешанный постседиментационный и конденсационный –  $\delta^{18}\text{O} \sim -7,7\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -80,5\%$ , смешанный закладочный и конденсационный –  $\delta^{18}\text{O} \sim -12,3\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -99,7\%$ , смешанный закладочный и конденсационный –  $\delta^{18}\text{O} \sim -14,3\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -105,5\%$  и смешанный закладочный и постседиментационный –  $\delta^{18}\text{O} \sim -12,4\%$ ,  $\delta^2\text{H} \sim -101,4\%$ . Как следует из рисунка 4 и полученных данных, основные генетические типы рассолов отличаются по содержанию кислорода-18 и дейтерия от промежуточных смешанных рассолов. Так, постседиментационные рассолы значительно отличаются и несколько «утяжелены» по составу, что связано с их морским происхождением. Отклонение точек от ЛЛМВ вправо и обогащение вод тяжелыми изотопами  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  указывает на морской генезис рассолов, а скопление точек вблизи ЛЛМВ – на формирование их местными атмосферными осадками. Промежуточное положение занимают рассольные воды, изотопный состав которых сформирован в результате смешения вод различных генетических типов. Минерализация изученных рассолов изменяется от 267,6 до 419,0 г/л.

### Заключение

На основе исследований в период 2011-22 гг. получены новые данные по распределению стабильных изотопов в водах на территории Соликамской впадины. Получены вариации изменения изотопного состава в местных атмосферных осадках и установле-

на локальная линия метеорных вод для региона исследований, имеющая уравнение  $\delta^2\text{H}=7,8\times\delta^{18}\text{O}+5,3$ .

На основе изучения вод поверхностного руслового стока получены изотопные характеристики для некоторых рек, протекающих на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Поверхностные и подземные воды наблюдательных и инженерно-геологических скважин, а также естественные выходы вод Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей облегчены по изотопному составу и близки к локальным атмосферным осадкам. Несомненно, влияние обменных процессов, связанных с растворением пород, а также разгрузка подземных вод в поверхностные откладывает свой отпечаток на состав вод, на это указывает разнообразный химический состав и изменяющаяся минерализация вод от пресных до рассолов. Для исследуемых подземных вод характерно разбавление местными осадками, на это указывает и сезонность изменения изотопного состава вод. Если бы вода обогащалась тяжелым изотопом кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  только за счет изотопно-обменных процессов с растворенными и окружающими породами, которые богаты  $\delta^{18}\text{O}$ , то значения на диаграмме  $\delta^{18}\text{O} \div \delta^2\text{H}$  были бы значительно смещены вправо.

Изотопный анализ рассольных вод позволил определить содержания  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  для основных генетических типов (постседиментационные, закладочные и конденсационные). Эти содержания отличны и контрастны по сравнению с надсолевой толщей. Некоторое «утяжеление» изотопного состава рассолов и отклонение от локальной линии метеорных вод указывает на их морской генезис и смешение вод различных генетических типов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000400-0).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казанцева А.С. Изотопно-геохимические особенности формирования состава подземных вод в нижнепермских отложениях карстовых районов Среднего Предуралья: дис. ... к. г.-м. н. 1.6.6. / Казанцева Алена Сергеевна. – Москва, 2022. – 151 с.: ил.
2. Казанцева А.С. Изотопный состав атмосферных осадков Северного Урала на территории Пермского края // Инициатива в образовании: проблема интерпретации знания в современной науке: сб. науч. тр. – Казань, 2019. – С. 278-280.
3. Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. Результаты мониторинга изотопного состава атмосферных осадков на территории Северного и Среднего Урала // Метеорология и гидрология. – 2020. – №. 3 – С. 87-94.
4. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702-1703.
5. Gat J.R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle // Annual Review of Earth and Planetetary Science. – 1996. – V. 24. P. 225-262.
6. Kazantseva A. S., Kadebskaya O. I., Dublyansky Yu. V. Isotopic Composition of Atmospheric Precipitation in the Cis-Ural Region. Journal of Earth Science, 2022, 33(3): 831-838. doi: 10.1007/s12583-021-1429-8.

УДК 549.761.22:552.53:552.14

DOI:10.7242/echo.2023.2.2

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЛАУБЕРИТЕ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛЕЙ

О.В. Коротченкова

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В геологическом разрезе калийной залежи в пределах Изверского участка Верхнекамского месторождения солей были выявлены глинистые прослои с многочисленными ромбовидными включениями, сложенными полиминеральным (ангидрит, доломит, галит, сильвин) агрегатом. По нашему мнению, они представляют собой псевдоморфозы выполнения по глаубериту, сформировавшиеся на стадии позднего диагенеза. Их наличие в разрезе позволяет говорить о существовании локальных участков вдоль восточной окраины Соликамской впадины, в которых активную роль при минералообразовании играли континентальные воды, обогащенные кальцием.

**Ключевые слова:** глауберит, Верхнекамское месторождение солей, фациальное замещение, диагенез солей.

### Введение

Глауберит ( $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ ) формируется в соляных отложениях, связанных с испарением как морской воды, так и озерных вод, и характерен преимущественно для месторождений солей сульфатного типа. Одним из немаловажных условий его образования является активная роль при галогенезе континентальных вод, в которых чаще всего превалирует кальций. Поэтому наличие его в месторождениях хлоридного типа позволяет предполагать более сложный сценарий их формирования. Следует также отметить, что диапазон условий, при которых глауберит устойчив, достаточно узкий, и в ископаемых солях он часто не сохраняется, а замещается другими минералами, в связи с чем его диагностика обычно затруднена.

Первые упоминания о глауберите на Верхнекамском месторождении солей относятся ко второй половине XX века [2, 3], когда проводились масштабные работы по изучению структурно-вещественного состава руд, в том числе для технологических целей. Однако в большинстве этих публикаций упоминается только о местонахождениях и отсутствует детальная вещественная характеристика, поэтому сложно провести сравнения с нашими исследованиями. До 2020 года нами также обнаруживался глауберит, но это были разрозненные единичные находки [4, 5]. В работе [4] приводится историческая сводка находок, среди которых, по мнению авторов, не все следует относить к глаубериту.

В 2020-21 гг. ПАО «Уралкалий» были пройдены скважины на Изверском участке (восточная окраина ВКМС), которые вскрыли разрез от пестроцветной толщи до подстилающей каменной соли. Во многих глинистых прослоях в пределах калийной залежи были выявлены многочисленные субидiomорфные включения, в настоящее время замещенные полиминеральным (доломит, ангидрит, галит/сильвин) агрегатом. По нашему мнению они являются псевдоморфозами по глаубериту.

### Фактический материал и методы исследования

В качестве фактического материала послужил керн скважин №№ 1120, 1121, и 1122, пробуренных в пределах Изверского участка. Образцы пород и отпрепарированные кристаллографические образования были исследованы с помощью стереомикроскопа Stemi 508 (Carl Zeiss, Germany) с универсальной цветной цифровой камерой Zeiss AxioCam 208 с разрешением 8,3 мегапикселей и сканирующего электронного микро-



скопа VEGA 3 LMN с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 250/X-max 20 (Tescan, Чехия).

### Структурно-вещественная характеристика полиминеральных образований

В исследованных образцах (более 20 шт.) псевдоморфозы всегда приурочены к глинистым прослоям – они или «погружены» в галопелитовый матрикс, или локализованы, как бусины на нити, в случае, если глинистый прослой имеет малую мощность (рис. 1). От слоя к слою их количество варьирует от единичных и редких индивидов до ~30% и не коррелирует с мощностью прослоя.



Рис. 1. Общий вид глинистых прослоев, содержащих псевдоморфозы

Окраска (от белой до желтой и красной) зависит от слагающих их главным образом хлоридных минералов – бесцветного или желтого галита и красного сильвина, при большом количестве ангидрита образования приобретают белый цвет. Кристаллографически псевдоморфозы имеют ромбопризматический габитус, размеры по длинной оси изменяются от первых миллиметров до 1 см (рис. 2), единичные до первых сантиметров.

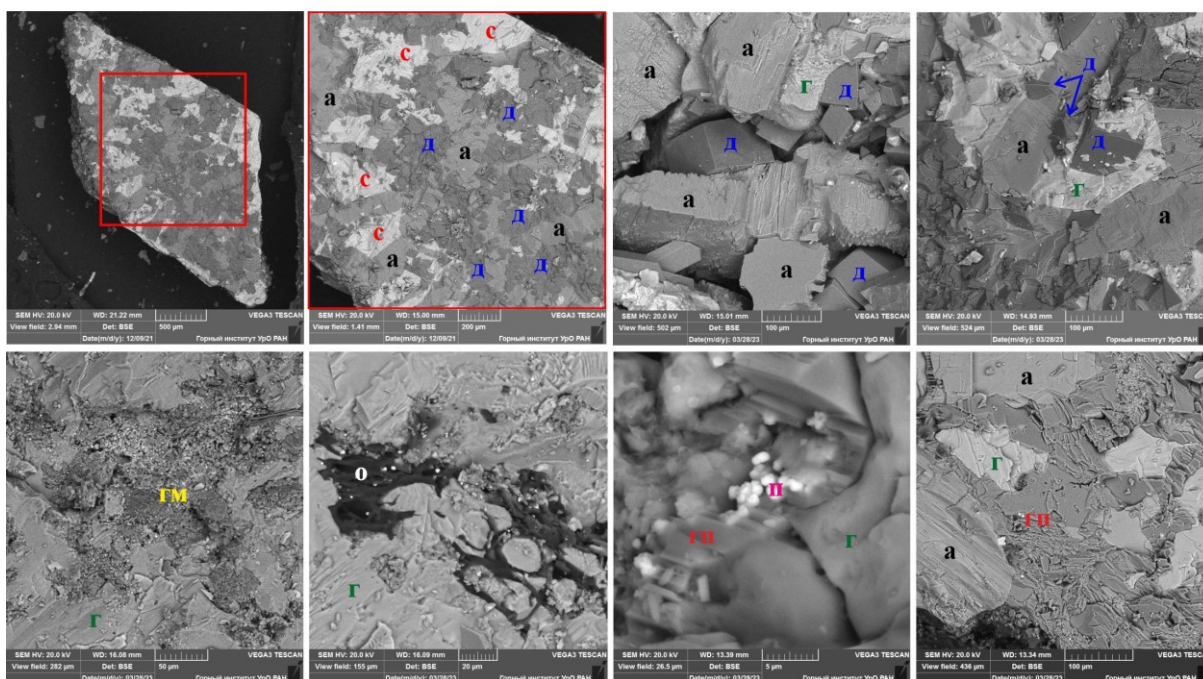


Рис. 2. Морфология и цвет псевдоморфоз



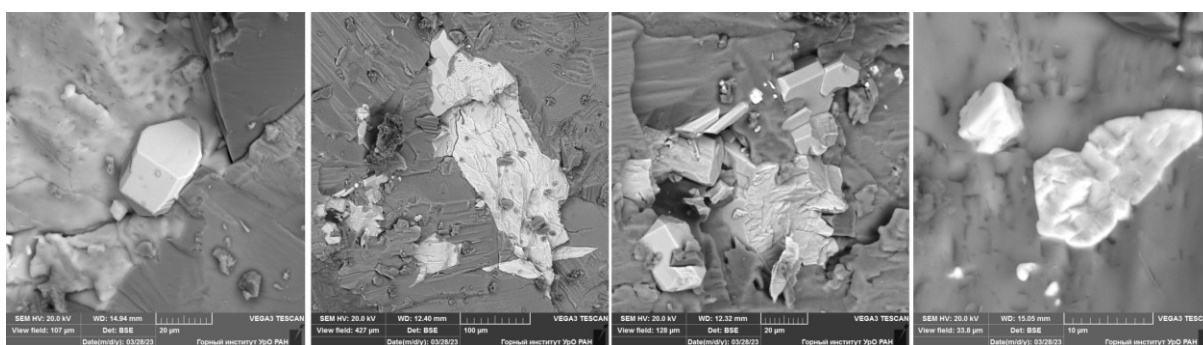
При микроскопических исследованиях псевдоморфоз был выявлен их полиминеральный состав. Они состоят главным образом из ромбоэдрических кристаллов доломита, призматического ангидрита и ксеноморфных (заполняющих интерстиции) галита или/и сильвина. В последних присутствуют механически привнесенные фрагменты галопелитового материала и углефицированный растительный детрит (рис. 3).

Исходя из степени идиоморфизма кристаллов, можно установить следующую последовательность их формирования: доломит→ангидрит→галит→(сильвин). То есть в псевдоморфозах мы наблюдаем нормальную эвапоритовую последовательность формирования минералов – от карбонатов к хлоридам, отмеченную М.Г. Валяшко [1].



**Рис. 3.** Полиминеральный состав псевдоморфоз и примеси в них:  
 д – доломит, а – ангидрит, с – сильвин, г – галит, гп – гипс, гм – галопелитовый материал,  
 о – углефицированная органика, п – пирит

В качестве аксессуарных фаз в псевдоморфозах выявлены включения аутигенных целестина, барита, пирита (рис. 4), изредка встречаются пойкилокристаллы гипса, возникшие за счет локальной гидратации ангидрита, вероятно на стадии гипергенеза.



**Рис. 4.** Аутигенные включения пирита (фото 1), целестина (2, 3) и барита (4)

Источником металлов для образования целестина и барита (сульфата стронция и сульфата бария) могли служить перекристаллизовывающиеся сульфатные минералы, в которые они входят изоморфно.

Для пирита в изученных образованиях характерны две генерации. Пирит первой генерации формирует кристаллы микронной размерности и часто приурочен к фрагментам галопелитового материала, редко фиксируется в гипсе (пойкилитовые включения) (рис. 3). Его образование связано с биогенной сульфатредукцией, происходившей в глинистом осадке на стадии его накопления и раннего диагенеза за счет рассеянного в нем органического материала. Вторая генерация, представленная субидiomорфными кристаллами размером в среднем около 10-20 мкм, вероятно, формировалась синхронно с основными минералами псевдоморфоз за счет абиогенной сульфатредукции (но в присутствии рассеянного органического вещества).

Все вышеизложенное позволяет говорить об исследованных образованиях, как о псевдоморфозах выполнения, и предполагать следующий сценарий их формирования (рис. 5).

Стадия седиментогенеза характеризовалась накоплением глинистого осадка, насыщенного минерализованными водами, обогащенными, кроме всего прочего, натрием (из морской воды) и кальцием (континентальные воды). На стадии раннего диагенеза в уплотняющемся глинистом материале кристаллизовались метакристаллы глауберита. На позднем диагенезе активную роль играли мигрирующие по латерали и вертикально рассолы/растворы, и в том числе с запада, со стороны калийной залежи. Глауберит, как неустойчивый во вновь возникающих условиях минерал, полностью растворился, а получившиеся полости постепенно заполнились агрегатом равновесных (соляной залежи) минералов нормальной эвапоритовой последовательности хлоридного типа.

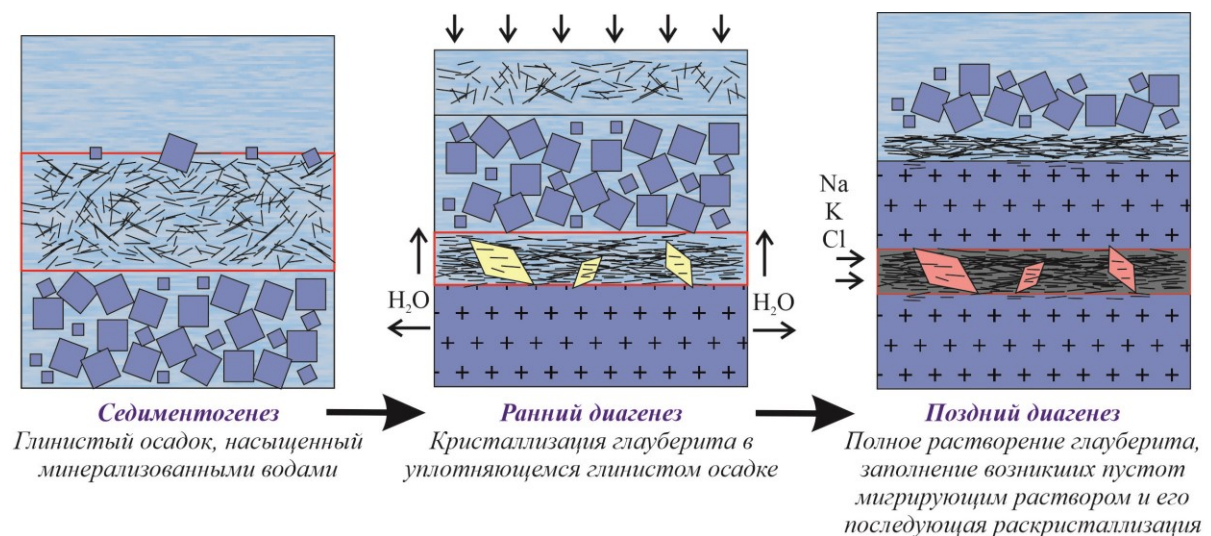


Рис. 5. Вероятный сценарий формирования псевдоморфоз

### Заключение

Исследование псевдоморфоз позволило детализировать минералообразующие процессы, возникавшие локально вдоль восточной окраины Соликамской впадины, где активную роль играли континентальные воды, богатые кальцием.

В период накопления минеральных солей этот участок представлял собой переходную зону с неровным рельефом, в которой происходило смешение морских и континентальных вод и реализовывались условия, благоприятные для кристаллизации глауберита, а возможно, и других солей.



Кроме того, присутствие в разрезе псевдоморфоз выполнения по глаубериту указывает на первичность данных пород и отсутствие каких-либо значительных (катагенетических) преобразований, то есть отсутствие калийных солей в разрезе связано с фациальным замещением, а не с их растворением и выщелачиванием.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения  
по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.  
(рег. номер 122012000400-0).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валяшко М.Г. Геохимические закономерности формирования месторождений калийных солей. – М.: МГУ, 1962. – 397 с.
2. Поликарпов А.И., Мелкова Н.В., Киселева О.В. Породы и минералы-индикаторы выщелоченных галогенных отложений соляно-мергельной толщи Верхнекамского месторождения // Условия формирования и преобразования вещественного состава пород калийных месторождений: сб. науч. тр. / ВНИИГ. – Л., 1982. – С. 34-44.
3. Поликарпов А.И., Мелкова Н.В., Липницкий В.К., Киселева О.В. Особенности гипергенеза пород соляно-мергельной толщи Верхнекамского месторождения и проблема реконструкций ее первичного солевого состава // Литолого-фациальные особенности осадконакопления в эвапоритовых бассейнах: сб. науч. тр. / ИГиГ СО АН СССР. – Новосибирск, 1983. – С. 108-109.
4. Федоров Т.В., Чайковский И.И. Литологические и минералогические особенности соляной и глинисто-ангидритовой толщ восточной части Соликамской впадины // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении: науч. чтения памяти П.Н. Чирвинского (140 лет со дня рождения). – 2020. – Вып. 23. – С. 146-154.
5. Чиркова Е.П. Глауберит Верхнекамского месторождения // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 6-7.

УДК 550.84 : 543.383.2

DOI:10.7242/echo.2023.2.3

## ОБНАРУЖЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В СЛОЖНОЙ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ МАТРИЦЕ ХЛОРОФОРМЕННОГО БИТУМОИДА В ХОДЕ ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА С МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ ДЕТЕКТИРОВАНИЕМ

Ю.С. Токсарова

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Предложены подходы к нецелевому анализу гомологических рядов нефтяных маркеров и их кислородсодержащих производных, базирующиеся на определении закономерности времени удерживания (RT) и аналитических серий фрагментарных и перегруппировочных ионов. Сформулированы причины сложностей идентификации аналитов в ходе нецелевого анализа.

**Ключевые слова:** газовая хроматография/масс-спектрометрия, алифатические углеводороды, гомологический ряд, аналитическая серия.

Анализ сложных многокомпонентных смесей является традиционной проблемой как аналитической химии, так и геохимии. Одним из методов, позволяющих решить эту проблему, является хромато-масс-спектрометрия (ХМС). Тем не менее, при нецеле-

вом анализе различных природных образцов, когда количество индивидуальных веществ измеряется сотнями, неизбежно возникают проблемы хроматографического разделения и идентификации веществ путем сравнения масс-спектров с библиотечными данными. Проблема идентификации может быть связана как с одновременным элюированием нескольких веществ, так и с отсутствием масс-спектров обнаруженных соединений в базах данных. Традиционный целевой анализ методом ХМС связан с использованием стандартов и в случае необходимости идентификации большого круга соединений приводит к существенным временным и финансовым затратам.

Нецелевой анализ, а именно он чаще всего применяется в геохимических и экологических исследованиях [1, 2], не предусматривает использование стандартных образцов, что является его основным недостатком, так как велика вероятность неправильной идентификации аналитов [3]. Результаты, полученные при различных условиях хроматографирования, при сравнении масс-спектров аналитов с различными базами данных могут существенно отличаться. Руффом, Мюллером и коллегами [4] в ходе анализа органических поллютантов вод реки Рейн было установлено, что, несмотря на использование баз данных (ChemSpider, SciFinder), библиотек масс-спектров (MassBank, Metlin, mzCloud) и программ обработки масс-спектрометрических данных (MetFrag, Mass Frontier 6.0), из 17 идентифицированных соединений только у семи были подтверждены структуры при сравнении со стандартными образцами, то есть идентификация почти 60% аналитов была ошибочной. Ситуация становится совсем грустной, если учесть, что в каждом образце речной воды немецкие исследователи фиксировали от 5300 до 7400 хроматографических пиков, из которых от 1500 до 2000 оказались фоновыми. Таким образом, становится очевидной проблема идентификации аналитов в ходе нецелевого анализа. Основными причинами возникновения этой проблемы являются следующие факторы.

1. Большое количество в пробе индивидуальных веществ, особенно при примерно равном содержании каждого из них. Хроматограмма таких проб характеризуется наличием плохо разрешенного «горба», а программы обработки хроматограмм воспринимают его как подъем базовой линии. Проблема идентификации компонентов «горба» трудно разрешима, так как изменения условий анализа, в том числе, замена хроматографической колонки на более длинную, ведет к существенным финансовым и временным затратам и не гарантирует решения проблемы.

2. Пики хорошо разделены, но масс-спектр отсутствует в библиотеке масс-спектров. Компоненты рассеянного органического вещества, как правило, отсутствуют в таких библиотеках. Основываясь на закономерностях разрыва связей, можно просчитать направления фрагментации и с большой долей вероятности определить класс соединения по характерным для него аналитическим сериям фрагментарных и перегруппировочных ионов.

3. Коэлюирующиеся компоненты. Эти вещества имеют очень близкие или даже одинаковые значения индексов Ковача. В этом случае идентификация каждого из них по масс-спектру невозможна, так как программа видит суммарный масс-спектр и пытается присвоить его индивидуальному веществу. Тут возможны два варианта развития событий: если одно вещество преобладает, то мы его все-таки узнаем, хотя и с малой степенью достоверности; если вещества находятся в равных долях, то мы получим неидентифицированный пик, или идентифицированный неверно.

4. Мешающее влияние посторонних веществ: примеси в реактивах и атмосфере воздуха, фон самого хроматографа, например, фталатных септ, фрагменты неподвижной фазы, масел вакуумного насоса и т.д., пики, возникающие в результате

отрыва неподвижной фазы с  $m/z$  207 и 281 (полидиметилсилоксаны). Особенно остро эта проблема стоит в случае использования, как ни странно, ультраинертных колонок DB-5MS UI. Следует учитывать фон фталатных пластификаторов самого прибора (септы, вкладки, склеивающие лаки) и использованных в пробоподготовке растворителей ( $m/z$  149). Содержание фталатов в растворителях можно существенно снизить в растворителях методом рэлееской дистилляции. Разработаны низкофоновые септы Agilent P/N 5183-4757-S и специальные насадки для испарителя фирмы Merlin [5]. Тем не менее, фоновый сигнал иона с  $m/z$  149 сохраняется, а учитывая особенности направления фрагментации фталатов (рис. 1), в результате которой образуется только один пик с очень высокой интенсивностью ( $m/z$  149), различить по масс-спектру фталаты, которые тянутся по всей хроматограмме, в условиях сложной матрицы практически невозможно.

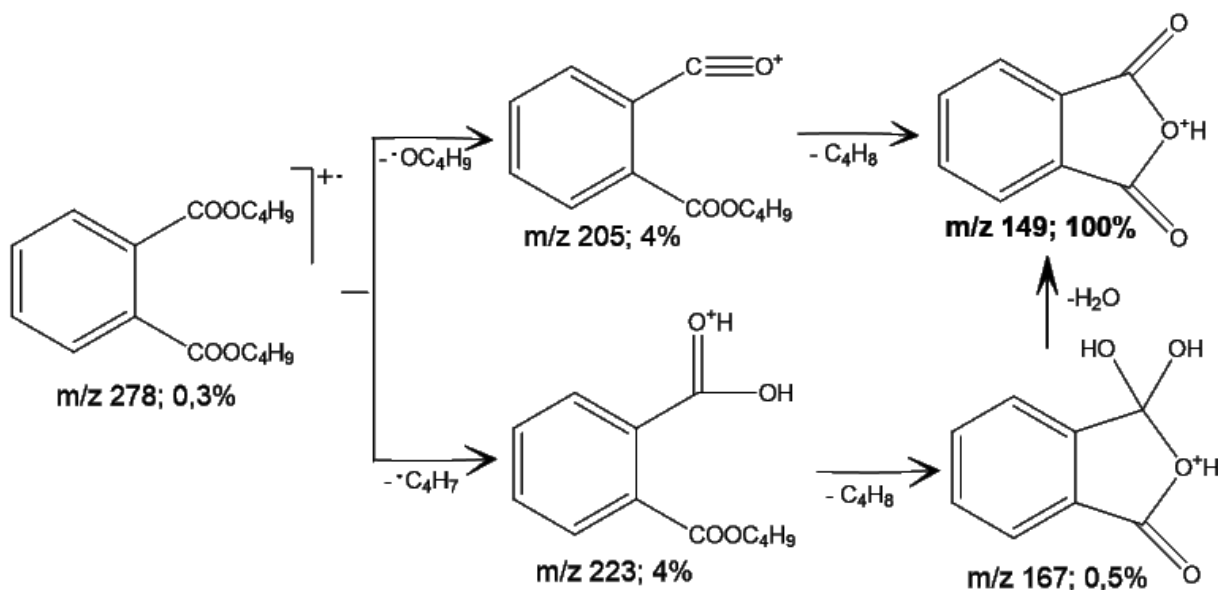


Рис. 1. Направление масс-фрагментации дибутилфталата

Мешающее влияние также оказывает атмосфера лаборатории (аргон,  $m/z$  40; углекислый газ,  $m/z$  44; летучие органические растворители (чаще хлороформ,  $m/z$  83, 85), алкановая серия углеводородов нефти с максимумом на  $m/z$  57).

Весь комплекс проблем нецелевого анализа хорошо демонстрируется на образце воды, практически свободной от органических веществ.

На рисунке 2 приведен фрагмент хроматограммы и масс-спектр пика с RT 12.118, на котором хорошо видно фоновое влияние отрыва неподвижной фазы (пики с  $m/z$  207, 281 и др.), аргон воздуха ( $m/z$  40), дибутилфталат септ или растворителей ( $m/z$  149) и компонент пробы – этилгексадеcanoат ( $m/z$  88, 101 и др.). Структуру этилгексаноата доказали на основе закономерностей фрагментации сложных эфиров жирных кислот [6, 7]. Минорные ионы, которые легко перегруппируются (перегруппировка Мак-Лафферти) в более устойчивые ионы в суммарном масс-спектре пика с RT 12.118 не фиксируются (рис. 3). Среди фрагментарных ионов, обусловленных отрывом неподвижной фазы, также фиксируются только ионы с наибольшей интенсивностью, хотя для масс-спектров полиметилсилоксанов характерно наличие двух весьма интенсивных серий ионов с разницей 74 а.е.м. На рисунке 4 изображен масс-спектр хроматографического пика, образовавшегося из-за отрыва неподвижной фазы колонки DB-5ms Ultra Inert (5%-фенил-95%-

диметилполисилоксан). Таким образом, от всей площади хроматографического пика с RT 12.118 на аналит приходится чуть более 30%. Учитывая недостатки целевого и нецелевого анализа, приходим к выводу, что оптимальной стратегией является сбалансированное сочетание этих двух подходов. Поскольку в практике лаборатории чаще всего приходится иметь дело с нефтями Пермского Прикамья и продуктами их деградации, а основным их компонентом являются *n*-алканы, то логично предположить, что большая часть аналитов будет относиться к гомологическим рядам собственно *n*-алканов, *i*-алканов, антеизоалканов, *n*-алкановых кислот и их эфиров, альдегидов, спиртов и т.п., которые связана между собой генетическим родством.

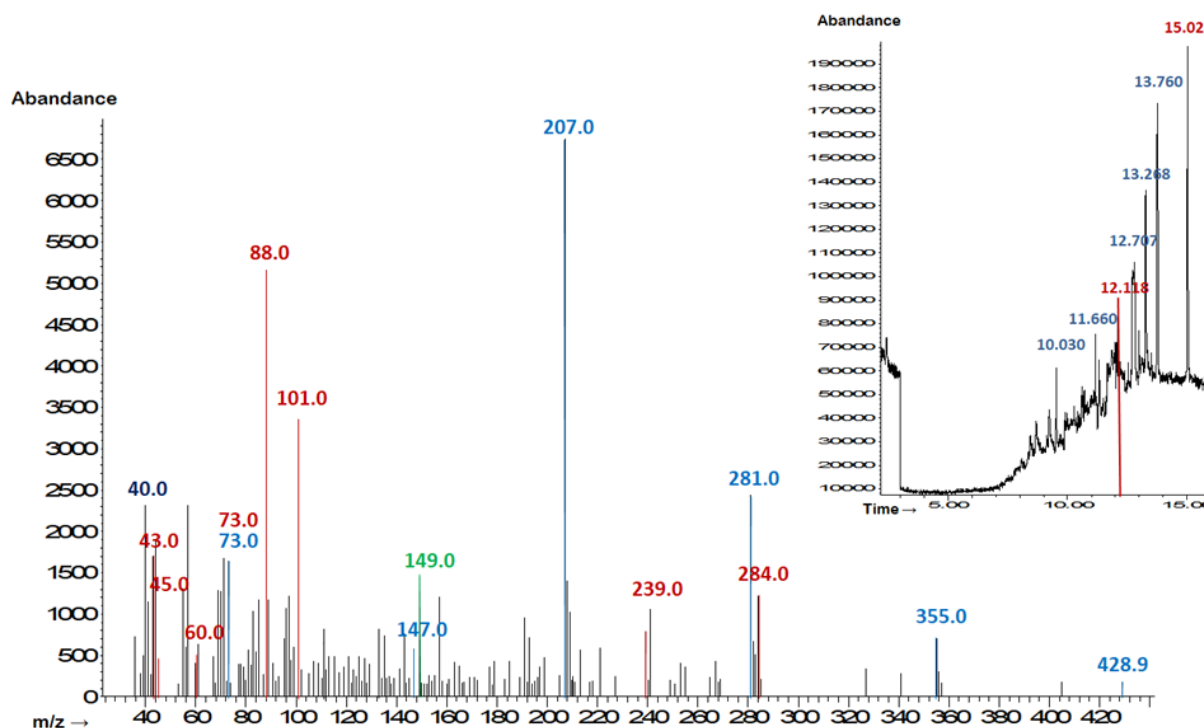


Рис. 2. Масс-спектр хроматографического пика с RT 12.118

Гомологические ряды соединений, за исключением первых членов ряда, объединены общей аналитической серией фрагментарных и перегруппировочных ионов, а также имеют в определенных условиях анализа линейную зависимость времени удерживания RT от количества атомов углерода в скелете [6-8]. Все это дает возможность при обнаружении и идентификации соединений, составляющих гомологический ряд, использовать в качестве реперных стандартов образцы только трех-пяти чистых веществ: для крайних значений и середины диапазона RT. Времена удерживания остальных членов ряда вычисляются интерполяцией и подтверждаются масс-спектром с учетом возможного мешающего влияния. Такой подход, в отличие от нецелевого анализа, должен улучшить достоверность получаемых результатов и в то же время избежать использования большого количества дорогостоящих стандартов.

Пробоподготовка осуществляется методом жидкой экстракции в хлороформ последовательно из нейтральной, кислой (10% HCl, pH 1-2), основной (насыщенный раствор NaOH, pH 10-12) среды. Полученный экстракт сушат безводным сульфатом натрия, избыток хлороформа отгоняют. Последние 1-1,5 мл хлороформа упаривают при комнатной температуре. Сухой экстракт взвешивают (при необходимости) и растворяют в гексане [4, 5].

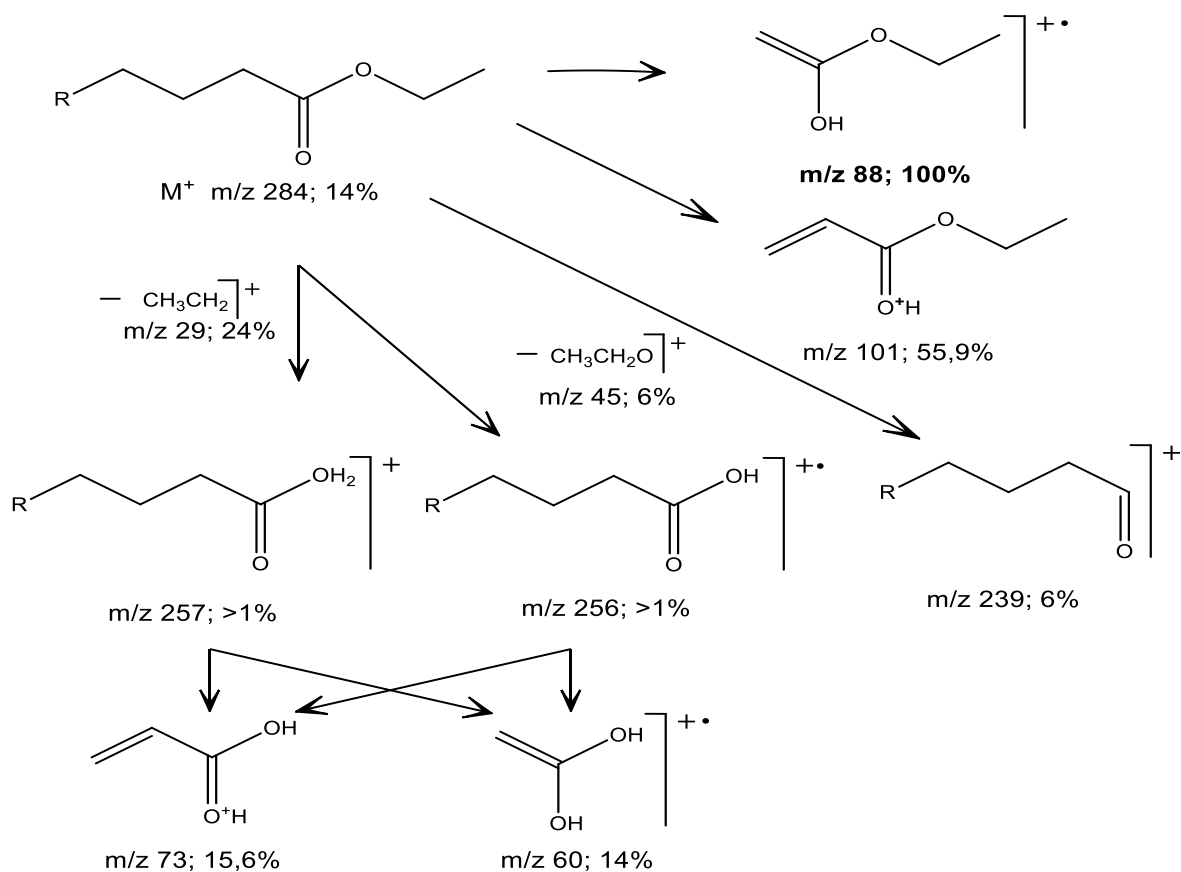


Рис. 3. Направление масс-фрагментации этилгексадеканата

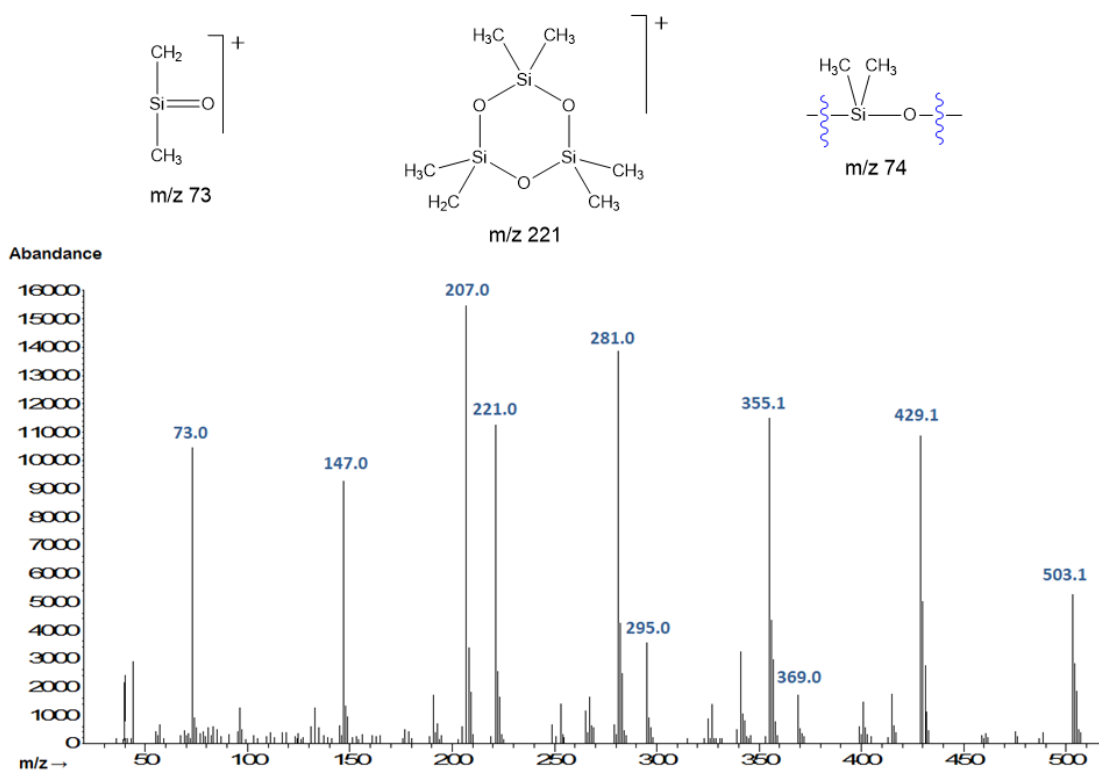


Рис. 4. Масс-спектр 5%-фенил-95%-диметилполисилоксана

### Методика анализа

Условия анализа на хромато-масс-спектрометрической системе 6890N/5973N фирмы «Agilent Technologies»: хроматографическая колонка DB-5ms Ultra Inert (5%-фенил-95%-диметилполисилоксан) длиной 30 м, внутренним диаметром 0,25 мм, с толщиной неподвижной фазы 0,25 мкм. Скорость газа-носителя (гелий) 1 мл/мин, давление 57,3 кПа. Программируемый нагрев от 80°C до 250°C, со скоростью 20 град/мин, далее изотермический на верхней границе интервала. Температура интерфейса 250°C, температура квадруполя 150°C, температура источника ионов 230°C. Температура инжектора 250°C с задержкой на растворитель 5 минут, деление потока 1:10. Масс-спектр записывается по полному ионному току и в режиме сканирования селективных ионов. Диапазон масс в режиме сканирования по полному ионному току 35-510.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000402-4).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Одинцова Т.А. Геохимическая характеристика состава аквабитумоидов нефтидного типа // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. вып. 12 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 58-61.
2. Бачурин Б.А., Одинцова Т.А. Экоаналитическая идентификация источников органического загрязнения природных геосистем // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 62-65.
3. Мазур Д.М. Установление структуры органических соединений в индивидуальном виде и смесях современными методами масс-спектрометрии: дис. ... д.х.н.; 02.00.03, 02.00.02 / Мазур Дмитрий Михайлович. – М., – 2017. – 149 с.
4. Ruff, M., Mueller, M.S., Loos, M., Singer, H.P. Quantitative target and systematic non-target analysis of polar organic micro-pollutants along the river Rhine using high-resolution mass-spectrometry - Identification of unknown sources and compounds // Water Research. – 2015. – V.87. – P. 145-154. – DOI: 10.1016/j.waters.2015.09.017.
5. Крылов В.А, Волкова В.В., Зайцев СД. Особенности газохроматографического определения эфиров О-фталевой кислоты в воде // Аналитика и контроль. – 2013. –Т.17, № 3. – С. 295-303.
6. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. – 2003. – 493 с.
7. Вульфсон Н.С., Заикин В.Г., Микая А.И. Масс-спектрометрия органических соединений. – М.: Химия, 1986. – 312 с.
8. Петров А.А. Углеводороды нефти. – М.: Наука, 1984. – 263 с.: ил.

УДК 628.316.13: 502.36

DOI:10.7242/echo.2023.2.4

### ОЦЕНКА РАСХОДА РЕАГЕНТОВ ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ КИСЛЫХ ШАХТНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ КРИВЫХ ТИТРОВАНИЯ

Н.Ф. Фетисова

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Излив кислых вод из штольни шахты им. Калинина является одним из наиболее проблемных в Кизеловском угольном бассейне ввиду высокого содержания металлов и значительного объема разгружающейся воды. В данном исследовании кислые стоки шахты им. Калинина были изучены с точки зрения расхода различных щелочных реагентов для их

нейтрализации путем моделирования титрования с использованием программного кода PHREEQC. При моделировании раствор известного состава титровался щелочными реагентами (известняком, гашеной и негашеной известью, каустической и кальцинированной содой) до тех пор, пока pH раствора не достигал значений 7,0-7,5. Моделирование позволило определить оптимальное количество щелочных веществ для нейтрализации шахтных вод, химический состав очищенных вод и количество образующегося шлама. Для каждого из добавляемых химических веществ было выполнено два варианта модельных расчетов: без газообмена с атмосферой и с газообменом. Газообмен (выравнивание парциальных давлений газов в двух средах) имитировал предварительную аэрацию шахтных вод перед добавлением реагентов.

**Ключевые слова:** моделирование, нейтрализация, известняк, известь, каустическая сода, кальцинированная сода.

## Введение

Определение количества щелочного реагента, необходимого для нейтрализации кислых стоков горнодобывающих предприятий и достижения целевого качества очищаемых вод, может быть выполнено с помощью эмпирического титрования. Однако, как правило, такие исследования выполняются для тестирования эффективности какого-либо определенного реагента и для ограниченного количества источников поступления шахтных (карьерных) вод. Расширение списка нейтрализующих реагентов и увеличение количества проб для эксперимента вплоть до охвата всех источников разгрузки кислых вод, существующих на территории месторождения или всего бассейна, на практике может быть трудновыполнимо. В качестве альтернативы эмпирическому титрованию можно использовать моделирование титрования, которое позволяет спрогнозировать состав сточных вод, формирующийся при добавлении различных количеств щелочных реагентов, а также оценить массу образующегося осадка. Результаты данного моделирования можно использовать для оценки затрат на нейтрализацию с учетом стоимости химических веществ и утилизации шлама.

Целью настоящего исследования является прогнозная оценка расхода щелочных реагентов, требуемых для нейтрализации кислых стоков разлива шахты им. Калинина, расположенного в пос. Косья Губахинского муниципального округа Пермского края. Воды, разгружающиеся из штольни шахты, отличаются низкой pH, высоким содержанием железа и других металлов, а также самым большим расходом потока по сравнению с другими разливами, существующими на территории Кизеловского угольного бассейна. Другой целью исследования являлась качественная и количественная оценка шлама, образующегося в процессе нейтрализации.

## Материалы и методы

Моделирование титрования было выполнено с использованием программы геохимического моделирования PHREEQC [1]. В качестве исходных данных в программу вводились показатели химического состава шахтных вод (анализ от 13.03.19), полученные в ходе экологического мониторинга (табл. 1) [2]. Температура шахтных вод задавалась равной 7°C. Окислительно-восстановительный потенциал определялся на основании известных концентраций ионов  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NO}_3^-$ . При моделировании имитировалось внесение в раствор известняка (состоящего из кальцита  $\text{CaCO}_3$ ), каустической соды ( $\text{NaOH}$ ), гашеной и негашеной извести ( $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaO}$ ) и кальцинированной соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) в количествах, постепенно увеличивающихся на некоторую постоянную величину до тех пор, пока pH раствора не достигал 7,0-7,5.



Таблица 1

Основные показатели химического состава шахтных вод (мг/л)

рН	Fe <sub>общ</sub>	Al <sup>3+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>
3,1	1098	24	11	277	89	14	31	1950	20

Таблица 2

Минералы, константы термодинамического равновесия (K) и предельные индексы насыщения (SI), используемые для геохимического моделирования

Твердая фаза	Формула	Log K	Предельный SI	Источник
Al(OH) <sub>3</sub> (a)	Al(OH) <sub>3</sub>	10,8	0,0	[6]
Бемит	AlOOH	8,58	0,0	[6]
Базальминит	Al <sub>4</sub> (OH) <sub>10</sub> SO <sub>4</sub>	22,70	0,0	[6]
Портландит	Ca(OH) <sub>2</sub>	22,80	0,0	[6]
Кальцит	CaCO <sub>3</sub>	1,85	2,5	[6]
Гипс	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	-4,58	0,0	[6]
Сидерит	FeCO <sub>3</sub>	-0,12	2,5	[6]
Fe(OH) <sub>2</sub>	Fe(OH) <sub>2</sub>	12,76	0,0	[7]
Fe(OH) <sub>3</sub> (a)	Fe(OH) <sub>3</sub>	4,89	0,0	[6]
Родохрозит	MnCO <sub>3</sub>	-0,06	2,5	[6]
Пирохроит	Mn(OH) <sub>2</sub>	15,20	0,0	[6]
Бирнессит	Mn <sub>8</sub> O <sub>14</sub> ·5H <sub>2</sub> O	-85,55	0,0	[8]

Титрование кислых шахтных вод щелочными веществами было смоделировано для двух сценариев: без аэрации и с предварительной аэрацией. Аэрация имитировалась перед добавлением реагентов, путем приведения концентрации растворенного газа в равновесие с парциальным давлением этого газа в атмосфере ( $P_{CO_2} = 10^{-3,4}$  атм;  $P_{O_2} = 10^{-0,678}$  атм), после чего во время титрования газообмен не разрешался. Исходные концентрации кислорода и углекислого газа задавались на основании сведений из опубликованных исследований. Согласно работе [3], если рН меньше или равен 3,9, то содержание углерода в воде можно принять равным

0,0001 моль/литр (4,4 мг/л), что в 10 раз выше нормального атмосферного давления  $\text{CO}_2$ . Начальная концентрация растворенного  $\text{O}_2$  в шахтных водах указывалась равной 0,5 мг/л по аналогии с содержанием кислорода, принятым в качестве исходного в исследовании [4].

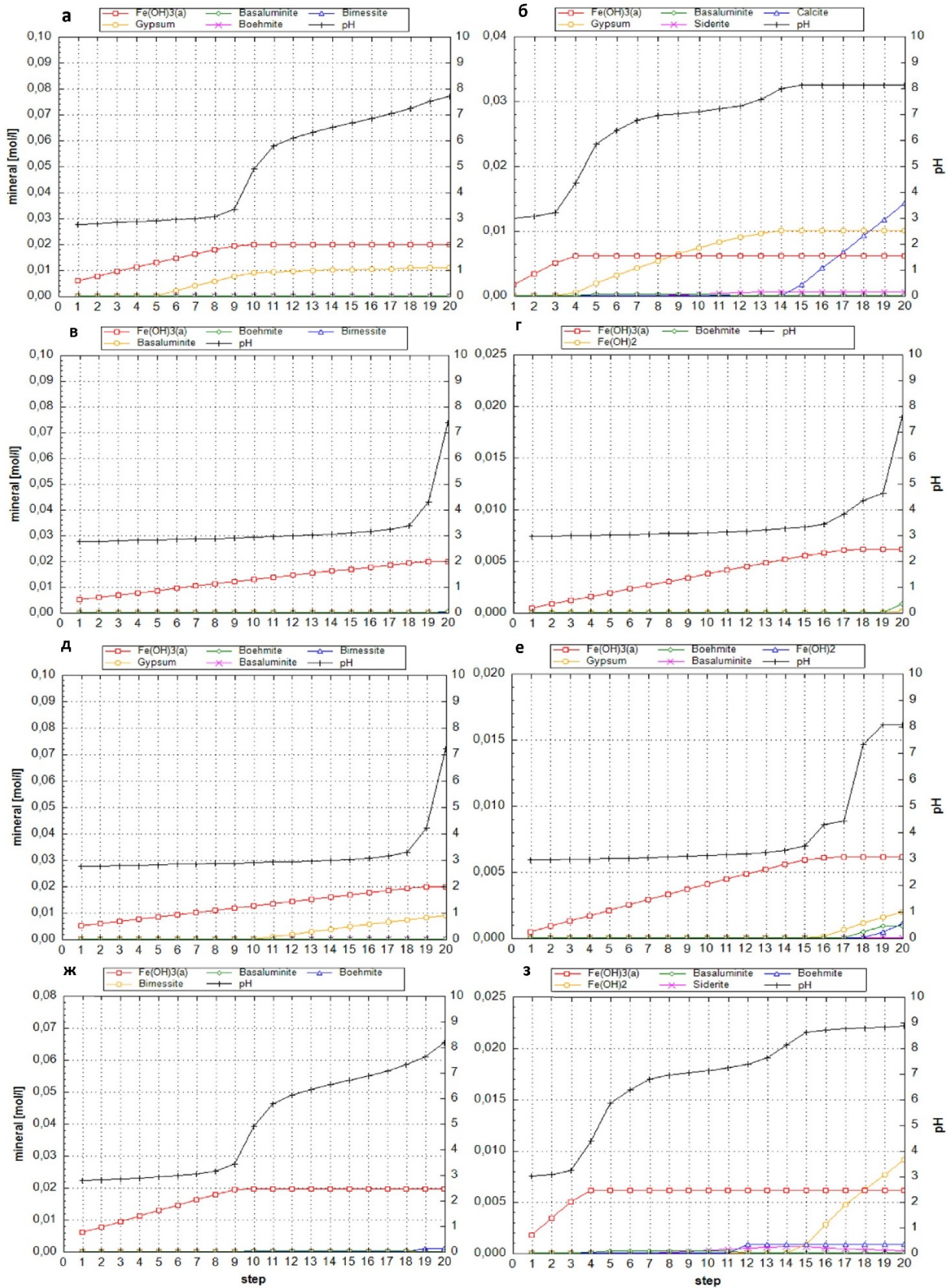
В процессе нейтрализации различные гидроксидные, сульфатные, гидроксисульфатные и карбонатные минералы могут осаждаться, удаляя растворенные вещества из очищаемой воды [3]. Соединения, образованные ионами  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$ , имеют разную растворимость в разных кислотно-щелочных условиях. Растворимость оксидов и гидроксидов металлов с различной степенью окисления в зависимости от pH показана на графиках в работах [3, 4, см. рис. 1]. Осаждение  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{MnOOH}$  и  $\text{MnO}_2$  и снижение концентраций ионов соответствующих металлов ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ) ниже 0,1 мг/л может происходить при низких pH (3-5), тогда как для осаждения соединений  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  в виде  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  и  $\text{Mn}(\text{OH})_2$  необходим более щелочной pH (9,5-11).

Из широкого спектра твердых фаз, которые могут осаждаться, в качестве потенциально возможных были отобраны соединения, контролирующие концентрацию металлов (Al, Fe, Mn) и сульфатов (табл. 2). Отсутствующие в используемой базе данных (WATEQ4F) минеральные фазы ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , бирнессит) были добавлены в программу с константами равновесия, указанными в табл. 2. При моделировании задавалась степень насыщения минералов, при достижении которой они начинали осаждаться. Для всех минералов, кроме карбонатных, предельный индекс насыщения (SI) задавался равным нулю. Согласно исследованиям [3, 5], карбонатные минералы характеризуются медленной кинетикой осаждения, поэтому осаждение кальцита, сидерита и родохрозита допускалось только после того, как раствор станет сильно пересыщен к этим минералам, а SI не достигнет значения 2,5.

### Результаты

Кривые титрования, полученные в результате моделирования, представлены на графиках (рис. 1) и в таблице 3. По левой оси каждого графика отложено количество минерала, выпадающего в осадок, в молях на литр. На правой оси – значения pH. Нижняя шкала показывает количество выполненных шагов. При титровании известняком ( $\text{CaCO}_3$ ) и кальцинированной содой ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) величина шага задавалась равной 0,0025 моль. Соблюдение такого же шага при титровании гидроксидом натрия ( $\text{NaOH}$ ) и гашеной известью ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) приводило к резкому скачку pH, примерно с 3 до 10. Поскольку  $\text{NaOH}$  и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  являются сильными основаниями, ими легко «перетитровать» и достаточно сложно определить именно то количество реагента, которое необходимо для получения целевого значения pH. Поэтому необходимая доза  $\text{NaOH}$  и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  была определена путем подбора, добавляя в воду различное количество молей реагента, пока не было получено pH, близкое 7 (рис. 1). Таким образом, потребовалось добавить 0,0495 моль  $\text{NaOH}$  при моделировании с предварительной аэрацией и 0,022 моль – без аэрации. Известии (как гашеной, так и негашеной) понадобилось 0,0247 моль и 0,012 моль, соответственно. Величина шага составила 1/20 от указанных значений. Кривые титрования негашеной известью ( $\text{CaO}$ ) получаются абсолютно аналогичными кривым титрования гашеной известью.

Основные результаты, полученные при моделировании, отражены в таблице 3: расход реагента, требуемого для достижения нейтральных значений pH, суммарная масса осадка (шлама), остаточная концентрация металлов и сульфатов в растворе.



**Рис. 1.** Кривые титрования шахтных вод, полученные при моделировании:  
 а, б – титрование известняком; в, г – каустической содой; д, е – известью; ж, з – кальцинированной содой.  
 На графиках а, в, д, ж представлены результаты титрования с предварительным аэрированием,  
 на графиках б, г, е, з – результаты моделирования без аэрирования

Таблица 3

Расход реагентов, масса осадка и качество очищенной воды, полученные в результате моделирования

Реагент	Расход г/л	pH	Шлам г/л	Концентрация, мг/л				Дебит л/с	Расход т/день	Масса шлама т/день
				Fe	Al	Mn	SO <sub>4</sub>			
При условии предварительного аэрирования										
CaO	1,38	7,20	3,74	0,0002	0,001	0,000	1081,7	245	29,32	79,23
Ca(OH) <sub>2</sub>	1,83	7,20	3,74	0,0002	0,001	0,000	1081,7	245	38,74	79,23
NaOH	1,98	7,40	2,20	0,0002	0,001	0,000	1946,2	245	41,91	46,50
CaCO <sub>3</sub>	4,25	7,04	4,01	0,0002	0,001	0,000	930,7	245	89,96	84,92
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	4,50	7,07	2,21	0,0002	0,001	0,000	1935,6	245	95,25	46,80
Без предварительного аэрирования										
CaO	0,67	7,20	0,91	761,20	0,00	11,00	1838,63	245,00	14,24	19,35
Ca(OH) <sub>2</sub>	0,89	7,20	0,91	761,20	0,00	11,00	1838,63	245,00	18,84	19,35
NaOH	0,88	7,55	0,71	756,20	0,00	11,00	1950,00	245,00	18,63	15,10
CaCO <sub>3</sub>	2,25	7,00	2,28	549,37	0,00	11,00	1317,01	245,00	47,63	48,33
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	2,38	7,03	1,17	550,70	0,00	11,00	1935,65	245,00	50,38	24,81

Меньше всего для нейтрализации рассматриваемых шахтных вод потребуется извести, больше всего кальцинированной соды. Наибольшее количество шлама образуется при нейтрализации карбонатом кальция, меньше всего при добавлении каустической соды. При моделировании без аэрирования нейтральный pH воды достигается при значительно меньшем расходе реагента и с меньшим образованием осадка. Однако без аэрирования значительная часть железа и практически весь марганец остается в воде. Остаточные концентрации железа и марганца превышают ПДК<sub>рх</sub> в 1000 раз. Без предварительного аэрирования для осаждения гидроксидов двухвалентного железа и марганца потребуется увеличивать pH до 9-11. Сульфаты остаются в растворе при любом из рассмотренных вариантов, однако при добавлении кальцита и извести до половины содержащихся сульфатов выпадет преимущественно в виде гипса и незначительная часть – в виде базальюминита.

Титрование шахтных вод карбонатом кальция и известью до получения нейтральных значений pH приведет к осаждению Fe(OH)<sub>3</sub> и гипса (как с аэрацией, так и без нее). При нейтрализации этими реагентами без предварительного аэрирования вода становится пересыщенной к родохрозиту и кальциту и сильно пересыщенной к сидериту ( $SI_{\text{сидерита}} > 2,5$ ), что говорит о том, что эти минералы будут осаждаться. Основным осадком при добавлении NaOH в обоих случаях является Fe(OH)<sub>3</sub>. При титровании воды известью и каустической содой без аэрирования наблюдается пересыщение раствора к сидериту ( $SI = 0,78$  и  $1,0$ , соответственно). Внесение кальцинированной соды в аэрированную воду дает осадок, состоящий преимущественно из Fe(OH)<sub>3</sub>, а в неаэрированную – Fe(OH)<sub>3</sub> и сидерита. Добавление Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> в обоих случаях может привести к осаждению кальцита, без аэрирования также возможно осаждение родохрозита. Алюминий при моделировании осаждался в виде базальюминита и бемита, а марганец – в

виде бирнессита. Указанные минералы алюминия и марганца являются аморфными «предшественниками» более кристаллических твердых минералов: гиббсита ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) и пиролюзита ( $\text{MnO}_2$ ) (исключенными из расчета осаждения) [3].

### Выводы

Моделирование титрования, выполненное с помощью специализированных компьютерных программ, может быть использовано для получения предварительных оценок при отсутствии данных эмпирического титрования. Подобные модели позволяют спрогнозировать состав сточных вод, образующийся при добавлении некоторых реагентов, обычно применяемых для очистки сточных вод на действующих рудниках, определить требуемое количество вносимого вещества и оценить массу образующегося шлама. В данном исследовании модельный подход был применен для выбора наиболее оптимального с точки зрения расхода реагента для нейтрализации кислых вод, поступающих из шахты им. Калинина. Исследование показало, что таким реагентом является известь. Однако ввиду большого объема воды, поступающей из шахты, для ее нейтрализации потребуется около 30 тонн негашеной (или 40 тонн гашеной) извести в день, при этом ежедневно будет формироваться примерно 80 тонн осадка. Кроме того, рассчитанная масса осадка не учитывает непрореагировавшую известь, которая может составлять 20% от изначально вносимой [3].

На основании прогнозных оценок можно заключить, что с учетом существующего объема воды, разгружающейся из шахты им. Калинина, применение любого из рассматриваемых вариантов химической очистки практически нереализуемо. В данном случае подход к решению проблемы может заключаться в поиске возможностей для снижения объема разгружающейся воды на основе гидрогеологических исследований.

Степень достоверности результатов моделирования зависит от точности исходных данных, вносимых в программу. Применение методов анализа, позволяющих определять концентрацию  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  (а также содержание коллоидного железа), проведение измерений ряда параметров (например, Eh и концентрацию растворенных газов) непосредственно на источнике, позволят осуществлять более достоверные прогнозы.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ (рег. номер проекта 122012000402-4).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations // Techniques and Methods. – U.S. Geological Survey, 2013. – Book 6 chap. A43. – 497 p.
2. Геоэкологическая геоинформационная система Кизеловского угольного бассейна: офиц. сайт. – Текст электронный. – URL: <http://kub.maps.psu.ru/> (Дата обращения 06.03.2023).
3. Cravotta C.A., Means B.P., Arthur W., McKenzie R.M., Parkhurst D.L. AMDTreat 5.0+ with PHREEQC titration module to compute caustic chemical quantity, effluent quality, and sludge volume // Mine Water and the Environment. – 2015. – V. 34. – P. 136-152. – DOI: 10.1007/s10230-014-0292-6.
4. Cravotta C.A., Parkhurst D.L., Means B., McKenzie R., Morris H., Arthur W. A geochemical module for «AMDTreat» to compute caustic quantity, effluent quality, and sludge volume // Proceedings of conference / American society of mining and reclamation. – Pittsburgh, 2010. – P. 1413-1436. – DOI:10.21000/JASMR10011413.
5. Langmuir D. Aqueous environmental geochemistry. – New Jersey, Prentice-Hall – 1997. – 600 p.
6. Ball J.W., Nordstrom D.K. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and text cases for calculating speciation of major, and redox elements in natural waters. – Menlow Park, California, 1991. – 185 p.
7. Duro L., Grive M., Giffaut E. ThermoChimie, the ANDRA Thermodynamic database // MRS Online Proceedings Library. – 2012. – Art. № 1475. – P. 589-592. – DOI:10.1557/opl.2012.637.
8. Wolery T.J. EQ3/6, a software package for geochemical modeling of aqueous systems: Package overview and installation guide (version 7.0). – University of California. Livermore, California, 1992. – 75 p.

## МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2023.2.5

### ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЕСТРУКТИВНОГО СЛОЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОДНООСНОЕ СЖАТИЕ

И.Л. Паньков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Проведены исследования по изучению характера деформирования деструктивного слоя при испытании образцов скальных горных пород на одноосное сжатие. Решение поставленной задачи достигалось за счет измерения продольных смещений образца датчиком деформаций, установленном в его средней части и скорректированных с учетом жесткости смещений траверсы электромеханического пресса. По результатам эксперимента строилась кривая деформирования и вычислялась толщина деструктивного слоя образца горной породы.

**Ключевые слова:** образец горной породы, деструктивный слой, электромеханический пресс, траверса, смещение, усилие, характер деформирования.

Известно, что при изготовлении образцов горных пород образуется ослабленный слой, называемый деструктивным. В общем случае характеристики слоя зависят от физико-механических свойств породы, ее зернистости, а также применяемого камнерезного оборудования и условий обработки. Несмотря на относительно малую толщину слоя, его влияние на определяемые характеристики горных пород весьма значительны. В качестве примера можно привести данные по экспериментальному исследованию влияния абсолютных размеров образцов квазипластичных горных пород на прочностные и деформационные свойства. При этом на характер изменения физико-механических свойств влияет деструктивный слой, а сами подобные проявления классифицируются как поверхностный масштабный эффект или масштабный эффект 2-го рода. Достаточно подробно механизм влияния толщины деструктивного слоя на свойства соляных пород изложен в работах [1, 2]. В то же время проведенные исследования не позволили ответить на вопрос об экспериментальной оценке характера деформирования деструктивного слоя, а также его толщины.

Для изучения характера деформирования деструктивного слоя проводились испытания образцов скальных пород на одноосное сжатие. Образцы выбуривались из породных монолитов, отобранных на месторождении Аксу Кварцитовые горки (республика Казахстан), с помощью установки алмазного бурения «Hilti DD 150». Торцевание образцов производилось на алмазном отрезном станке «Struers Labotom-3». При выбурировании и торцевании образцов в качестве промывочной жидкости использовалась вода. Диаметр ( $d$ ) образцов составлял 45 мм, высота ( $h$ ) – 70 мм. Эксперимент проводился на электромеханическом прессе «Zwick/Z400», позволяющим достигать максимального усилия 400 кН, с возможностью измерений продольных деформаций по траверсе (скорость перемещения – 1 мм/мин). Дополнительно в средней части образца устанавливался датчик продольных деформаций «Epsilon» с базой измерений ( $l$ ) – 50 мм (рис. 1). Снятие показаний датчиком осуществлялось в интервале нагрузок от 0 до 35÷70% от предела прочности на линейно-упругой стадии деформирования образца. В дальнейшем с целью исключения повреждений датчик деформаций снимался, а сам образец доводился до раз-



рушения. По результатам эксперимента определялись предел прочности образца ( $\sigma_{пр}$ ) и касательный модуль деформации ( $D_y$ ) начального участка диаграммы согласно методике, изложенной в работе [3].



**Рис. 1.** Проведение испытаний на одноосное сжатие при изучении характера деформирования деструктивного слоя образцов горных пород

Смещения верхнего (нижнего) деструктивного слоя на торцевых гранях образца определялись по формуле:

$$u_{сл} = \frac{u_{об} - u_{ж} - u_y}{2}, \quad (1)$$

где  $u_{об}$  – общие смещения образца с учетом деформирования прессового оборудования;  $u_{ж}$  – смещения прессового оборудования, обусловленные его жесткостью;  $u_y$  – линейно-упругие смещения образца, пересчитываемые по показаниям датчика деформаций.

Смещения прессового оборудования, обусловленные его жесткостью, определялись согласно методике, приведенной в работе [4], по формуле:



$$u_{ж} = \frac{F + \sqrt{F^2 + 4KFu_{л}}}{2K}, \quad (2)$$

где  $F$  – усилие пресса;  $K$  – жесткость «идеального» пресса, не имеющего люфтовых смещений;  $u_{л}$  – суммарная величина люфтовых смещений в узлах «реального» испытательного оборудования. Показатели жесткости электромеханического пресса «Zwick/Z400» составляли:  $K = 320$  кН/мм,  $u_{л} = 0,1$  мм.

Упругие смещения образца определялись по формуле:

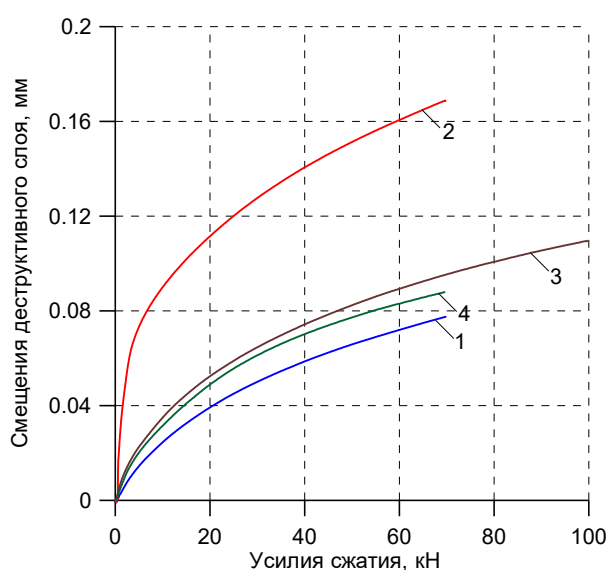
$$u_y = u_d \frac{h}{l}, \quad (3)$$

где  $u_d$  – показания датчика деформаций.

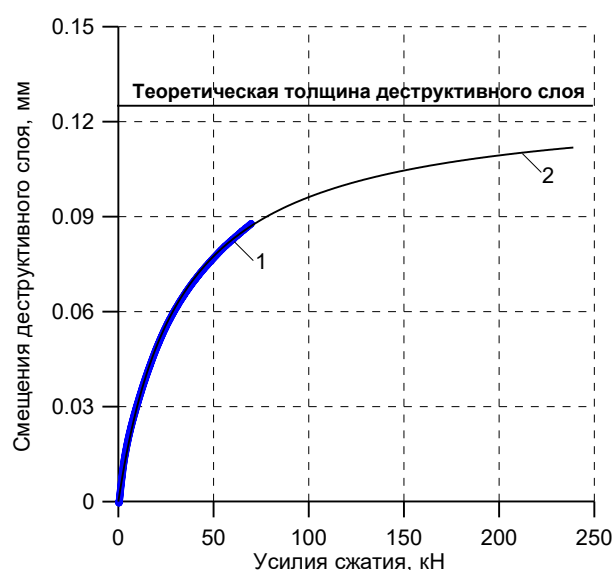
На рис. 2 приведены кривые изменения смещений деструктивного слоя при сжатии образца скальных пород. Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что характер деформирования деструктивного слоя при сжатии образцов горных пород с достаточной степенью достоверности описывается уравнением вида:

$$u_{сл} = h_{сл} \frac{F}{F + b}, \quad (4)$$

где  $h_{сл}$  – теоретическая толщина деструктивного слоя;  $b$  – параметр аппроксимации.



**Рис. 2.** Характер деформирования деструктивного слоя при сжатии образцов горных пород (цифрами обозначены номера образцов)



**Рис. 3.** Результаты экспериментального (1) и теоретического (2) определения смещений деструктивного слоя (на примере образца № 4)

На рис. 3 приведены результаты сопоставительного анализа смещений деструктивного слоя (на примере данных по образцу № 4), иллюстрирующие достаточно высокую степень корреляции между экспериментальными и теоретическими данными.

Результаты изучения механических показателей и параметры зависимости (4), описывающей характер деформирования деструктивного слоя образцов скальных пород приведены в табл. 1.

**Таблица 1**

Результаты изучения механических показателей и характера деформирования деструктивного слоя образцов горных пород

№ обр.	$\sigma_{пр}$ , МПа	$D_y$ , ГПа	$h_{сл}$ , мм	$b$ , Н
1	55,8	50,9	0,116	37699
2	104,5	108,5	0,201	15971
3	129,3	62,4	0,153	41425
4	57,6	61,2	0,127	31762

Анализ результатов исследований позволил установить, что теоретическая толщина деструктивного слоя испытанных образцов изменяется от 0,11 до 0,20 мм. Также установлено, что толщина слоя находится в пропорциональной зависимости от величины касательного модуля деформации скальной породы. Данный факт может косвенно свидетельствовать о хрупком характере микро-разрушений, участвующих в формировании деструктивного слоя.

Проведенные исследования направлены на совершенствование и разработку новых экспериментально-теоретических аспектов изучения деформационных свойств горных пород в лабораторных условиях.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Паньков И.Л., Асанов В.А. Изучение механизма масштабного эффекта при сжатии квазипластичных соляных пород // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2015. – № 2. – С. 273-278.
2. Паньков И.Л. Теоретическое описание проявлений поверхностного масштабного эффекта в квазипластичных породах // *Горное эхо*. – 2019. – № 1 (74). – С. 49-53. DOI: 10.7242/echo.2019.1.11.
3. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 198 с.
4. Паньков И.Л., Безматерных М.Д. Изучение влияния жесткости испытательного оборудования на деформационные показатели геоматериалов // *Актуальные проблемы прочности: сб. материалов 60-й Междунар. науч. конф., 14-18 мая 2018 г.* – Витебск, 2018. – С. 306-308.

## ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ СИЛЬВИНИТА РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТЫ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

А.А. Ударцев

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

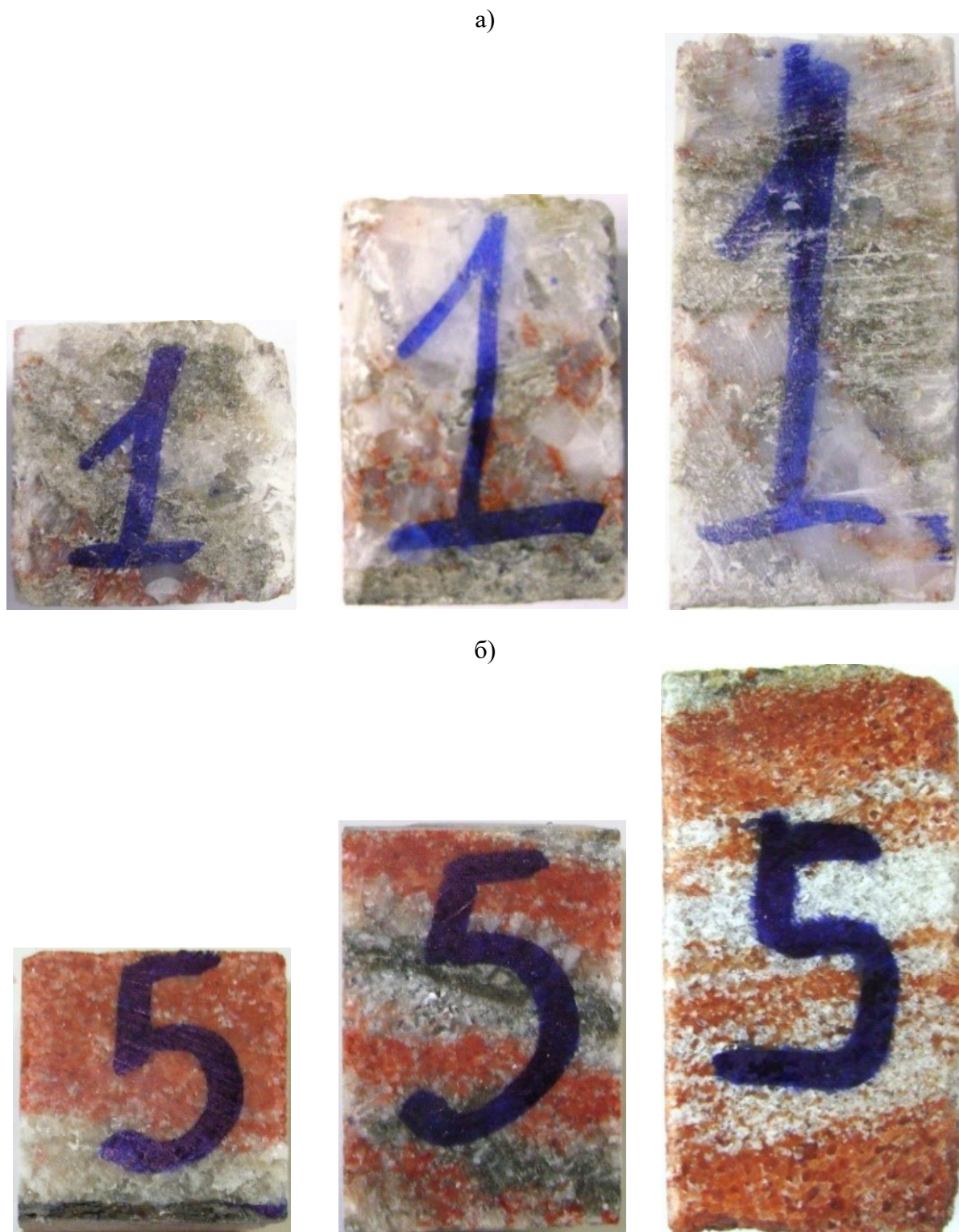
**Аннотация:** Проведен комплекс лабораторных экспериментов по изучению характера деформирования сильвинита пласта АБ и Кр. II, включающий условно-мгновенные испытания на одноосное сжатие и длительные испытания при различных степенях нагружения. По результатам исследований получены полные диаграммы деформирования и семейства кривых ползучести, по которым определялись механические характеристики пород и скорости деформирования образцов. Установлен характер изменения скорости установившейся ползучести от степени нагружения сильвинитовых образцов различной высоты, получены параметры аппроксимации.

**Ключевые слова:** сильвинит пестрый, сильвинит красный, условно-мгновенное сжатие, одноосная ползучесть, продольная деформация, скорость установившейся ползучести.

Ведение очистных работ на Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) осуществляется за счет применения камерной системы разработки, где основными грузонесущими элементами системы служат поддерживающие междукамерные целики, работающие в режиме ползучести. Геометрические размеры междукамерных целиков определяются исходя из горно-геологических и горнотехнических факторов, а также условий залегания продуктивных пластов и могут различаться соотношением высоты ( $h$ ) к ширине ( $d$ ). Безопасность отработки месторождения обуславливается интенсивностью деформирования грузонесущих элементов камерной системы разработки, контроль которых осуществляется за счет проведения инструментальных измерений деформаций в натуральных условиях [1]. В этой связи адекватная геомеханическая оценка процесса деформирования междукамерных целиков невозможна без лабораторных исследований, направленных на экспериментальное изучение скорости деформирования сильвинитовых образцов пласта АБ и Кр. II различной высоты в условиях ползучести.

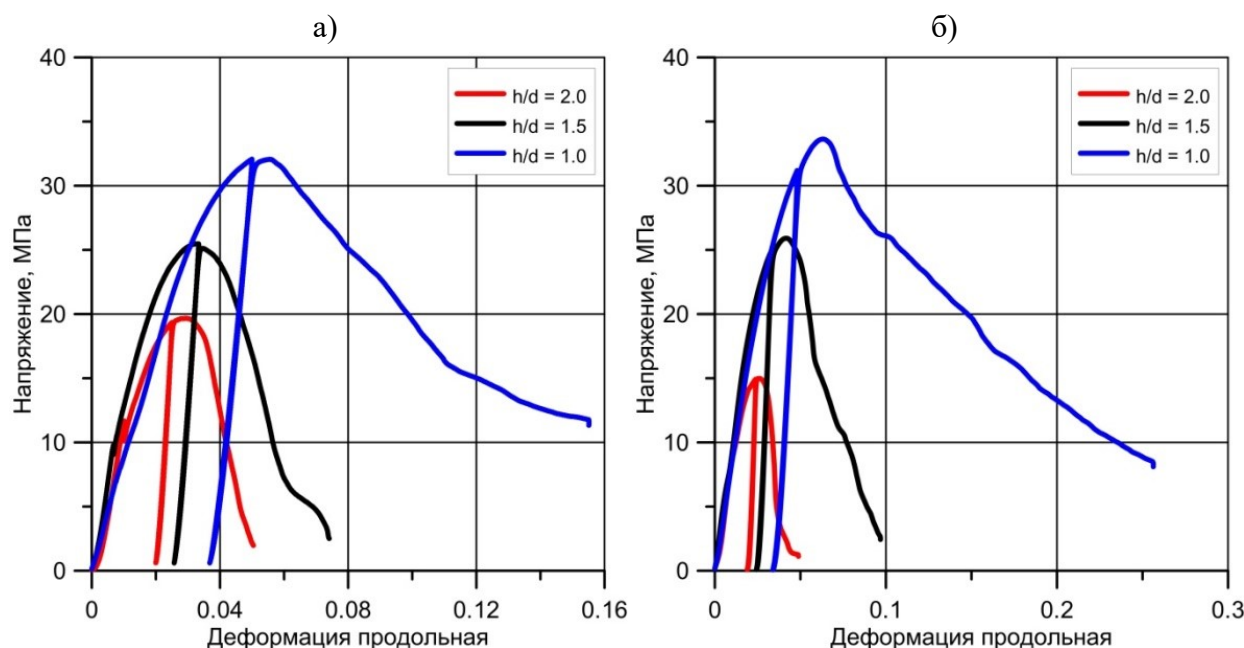
В целях реализации данного исследования производился отбор породных монолитов из продуктивных пластов шахтного поля рудника ПАО «Уралкалий». При помощи дискового отрезного станка без применения промывочной жидкости для каждого монолита отобранного с пласта АБ (сильвинит пестрый) и пласта Кр 2 (сильвинит красный) изготавливались три партии прямоугольных образцов, имеющих одинаковое основание – 40x40 мм и различную высоту – 40, 60 и 80 мм. Количество выпиленных образцов для каждой партии составляло около 30 шт., общее количество изготовленных образцов составило более 180 шт. Пример изготовленных образцов различной высоты для пестрого и красного сильвинита представлен на рис. 1.

Лабораторные исследования включали в себя комплекс мероприятий, которые проводились в два этапа. На первом этапе реализовывались эксперименты на одноосное сжатие в режиме условно-мгновенного нагружения с целью определения прочностных характеристик исследуемых пород и степеней нагружения для испытаний на ползучесть. На втором этапе с целью изучения закономерностей длительного деформирования и разрушения сильвинитовых пород, а также определения скоростей установившейся ползучести, проводились испытания в режиме длительного нагружения при одноосном сжатии. Методика проведения экспериментов на одноосное сжатие в режиме условно-мгновенного и длительного нагружения представлена в работе [2].



**Рис. 1.** Фотографии изготовленных образцов различной высоты пестрого (а) и красного (б) сельвинита

По результатам мгновенных испытаний строились диаграммы деформирования, по которым определялся полный комплекс прочностных и деформационных показателей. Пример полученных диаграмм деформирования для каждой партии сельвинита представлен на рис. 2.



**Рис. 2.** Пример диаграмм деформирования образцов пестрого (а) и красного (б) сильвинита

По результатам длительных испытаний строились кривые ползучести, где по оси ординат откладывалась продольная деформация образца, а по оси абсцисс – время. Эксперименты на ползучесть осуществлялись при уровнях нагрузки: 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 и 0,8 от среднего предела прочности на сжатие ( $\sigma_{пр}$ ), полученного по результатам мгновенных испытаний. Пример характерных кривых ползучести для каждой партии сильвинита представлен на рис. 3.

Качественный анализ кривых длительной прочности сильвинитовых образцов позволил установить, что интенсивность деформирования на всех уровнях сжимающей нагрузки возрастает с уменьшением высота образца как для пестрого, так и для красного сильвинита.

Для всех уровней нагружения проводилась количественная оценка скорости деформирования соляных образцов на участках установившейся ползучести. Результаты определения скоростей установившейся ползучести представлены в табл. 1.

По результатам оценки скоростей установившейся ползучести было установлено, что практически на всех уровнях нагружения скорости красного сильвинита превосходят аналогичные скорости пестрого сильвинита. Ниже на рис. 4 представлены зависимости характера изменения скорости установившейся ползучести от степени нагружения.

Анализ влияния степени нагружения на скорость установившейся ползучести сильвинитовых образцов позволил установить, что характер его изменения в интервале от  $(0,2 \text{ до } 0,8) \cdot \sigma_{пр}$  удовлетворительно описывается экспоненциальной зависимостью:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot e^{n\left(\frac{\sigma}{\sigma_{пр}}\right)},$$

где  $\sigma$  – действующее напряжение на образец,  $A$  и  $n$  – параметры аппроксимации.



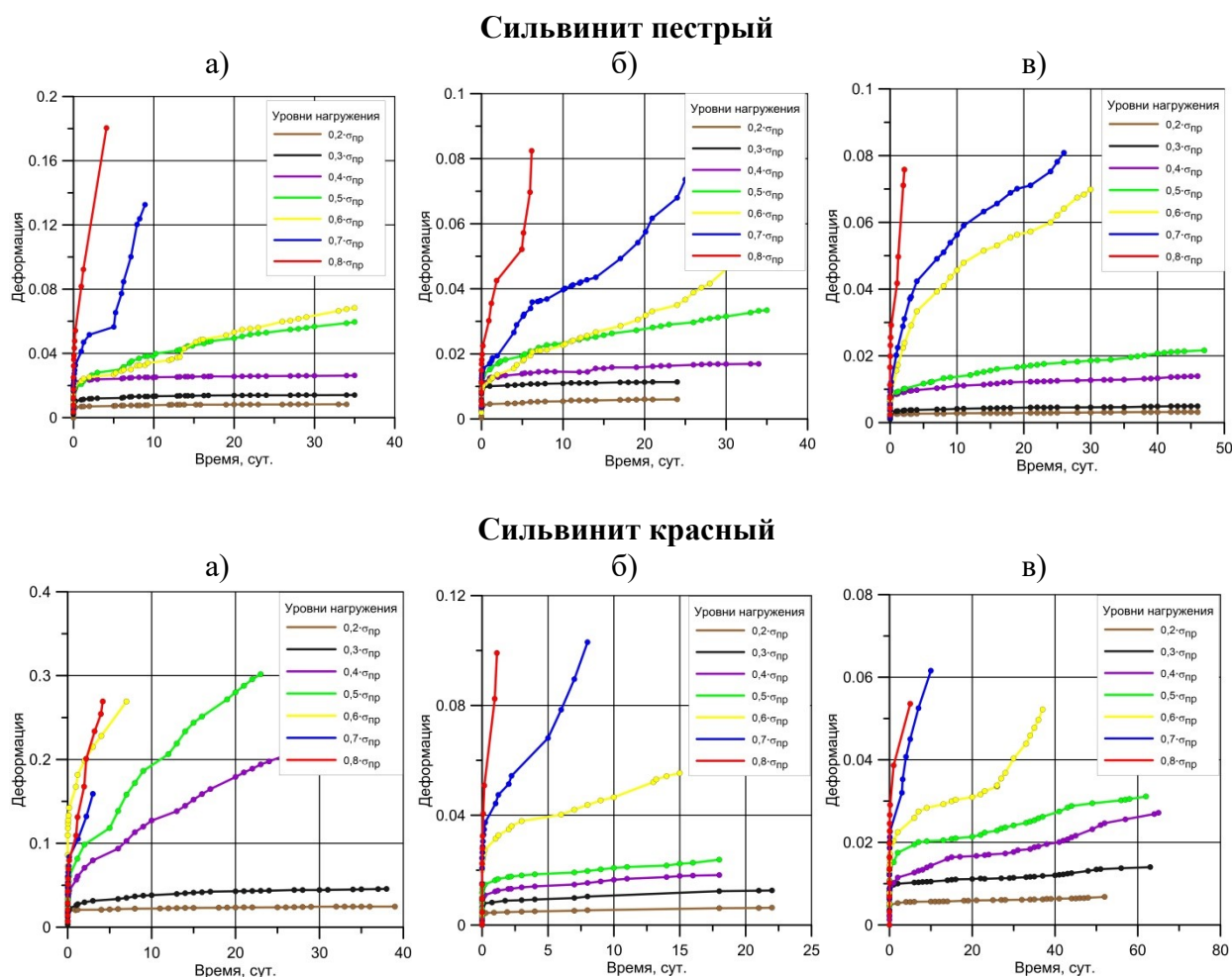
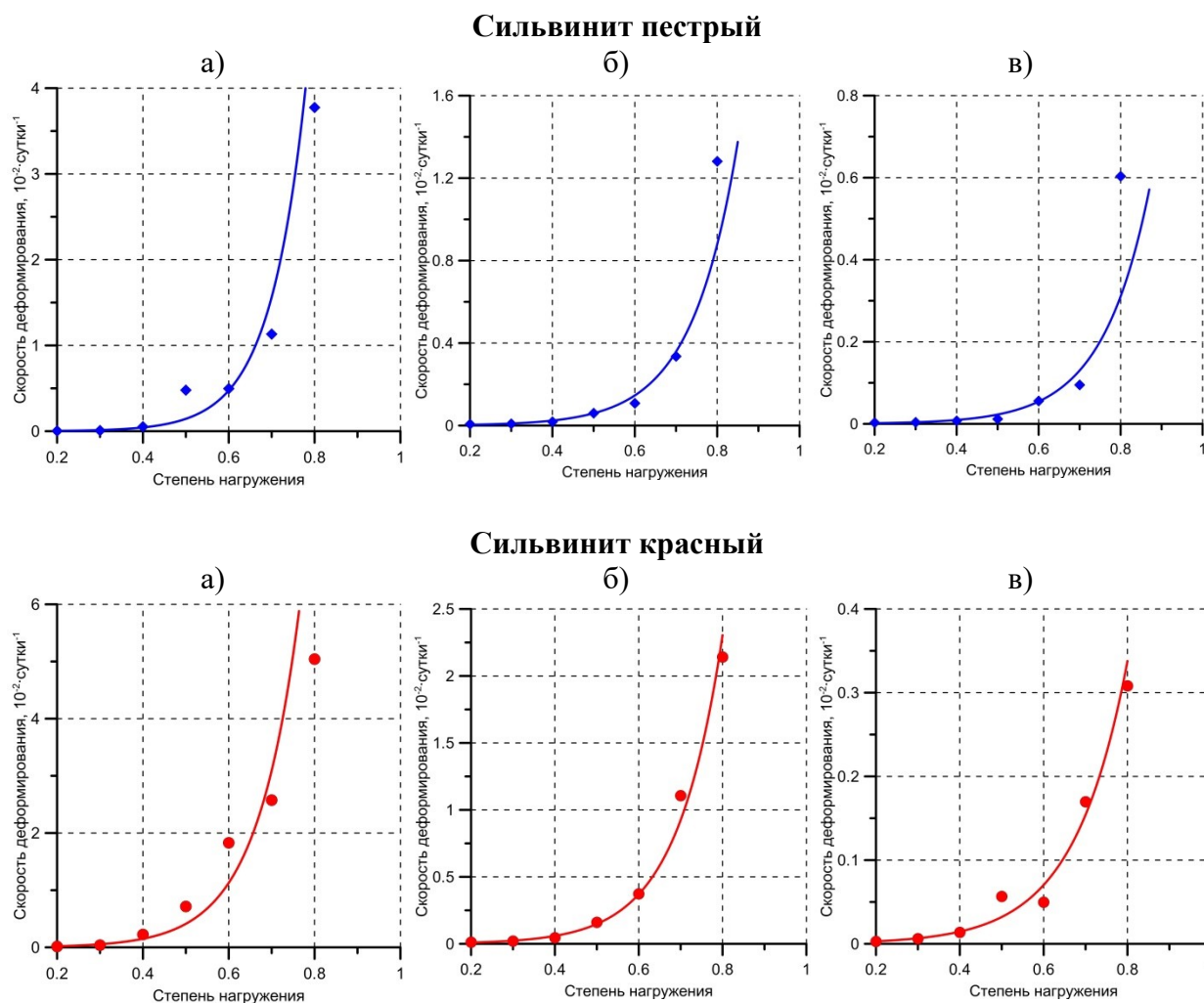


Рис. 3. Характерные семейства кривых ползучести сильвинитовых образцов:  
 а –  $h/d=1,0$ ; б –  $h/d=1,5$ ; в –  $h/d=2,0$

**Таблица 1**  
 Скорости установившейся ползучести пестрого и красного сильвинита

Степень нагружения	Скорость деформирования ( $\dot{\epsilon}$ ), $10^{-2} \cdot \text{сутки}^{-1}$					
	Сильвинит пестрый			Сильвинит красный		
	$h/d=1,0$	$h/d=1,5$	$h/d=2,0$	$h/d=1,0$	$h/d=1,5$	$h/d=2,0$
0,2	0,0035	0,0064	0,0029	0,0137	0,0123	0,0029
0,3	0,0071	0,0081	0,0039	0,0391	0,0201	0,0061
0,4	0,0522	0,0185	0,0074	0,2244	0,0455	0,0137
0,5	0,4783	0,0601	0,0119	0,7133	0,1602	0,0566
0,6	0,4964	0,1077	0,0556	1,8289	0,3726	0,0496
0,7	1,1312	0,3359	0,0948	2,5752	1,1064	0,1696
0,8	3,7740	1,2818	0,6033	5,0417	2,1412	0,3081



**Рис. 4.** Характер изменения скорости установившейся ползучести от степени нагружения сильвинитовых образцов: а –  $h/d=1,0$ ; б –  $h/d=1,5$ ; в –  $h/d=2,0$

В табл. 2 приведены результаты определения параметров аппроксимации  $A$  и  $n$  для образцов сильвинита с различным соотношением высоты к ширине ( $h/d$ ).

**Таблица 2**

Результаты определения параметров аппроксимации экспоненциальной функции

Параметр формы $h/d$	Параметры аппроксимации	
	$A$	$n$
<b>Сильвинит пестрый</b>		
1,0	$0,38 \cdot 10^{-3}$	11,91
1,5	$0,67 \cdot 10^{-3}$	8,97
2,0	$0,29 \cdot 10^{-3}$	8,70
<b>Сильвинит красный</b>		
1,0	$2,68 \cdot 10^{-3}$	10,07
1,5	$1,54 \cdot 10^{-3}$	9,14
2,0	$0,64 \cdot 10^{-3}$	7,85



Результаты проведенных исследований предназначены для получения объективной геомеханической оценки за процессом деформирования междукамерных целиков при отработке Верхнекамского месторождения калийных солей.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евсеев А.В. Методика инструментального контроля процессов деформирования камерного блока при двухпластовой отработке сильвинитовых пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 105-107.
2. Ударцев А.А., Паньков И.Л. Изучение характера деформирования сильвинита в условиях одноосного сжатия при различных режимах нагружения // Горное эхо. – 2022. – № 4 (89). – С. 54-59. – DOI: 10.7242/echo.2022.4.9.

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.834:622.12

DOI:10.7242/echo.2023.2.7

### О МЕТОДЕ ПРОГНОЗА ДИЗЬЮНКТИВОВ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ И ПРИУРОЧЕННЫХ К НИМ ЗОН СКОПЛЕНИЯ МЕТАНА

А.В. Анциферов, А.А. Глухов, В.В. Туманов

*Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт  
горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ), г. Донецк*

**Аннотация:** В данной статье приведены основы метода дифрагированных волн для прогноза разрывных тектонических нарушений угольных пластов и приуроченных к ним зон вероятного скопления метана. Универсальность метода заключается в том, что он не адаптирован к определенным схемам наблюдений. Представлен алгоритм расчета сейсмических изображений зоны наблюдений. Описаны критерии наличия геологических аномалий. Описана последовательность процедур обработки данных сейсмических наблюдений.

Метод может быть использован геофизическими службами и специализированными организациями для обработки результатов сейсмических исследований в качестве дополнительного способа обработки и анализа данных сейсморазведки.

**Ключевые слова:** шахтная сейсморазведка, прогноз дизъюнктивов, зоны вероятного скопления метана, метод дифрагированных волн, обработка данных сейсморазведки, программное обеспечение.

### Введение

В зонах тектонических структур достаточно часто наблюдается возрастание концентрации газов и тяжелых углеводородов. Такие образования можно рассматривать в качестве газосодержащих коллекторов. Их вскрытие горными выработками сопровождается выбросами газа и человеческими жертвами. При своевременном обнаружении таких аномалий и целенаправленном выполнении предварительной дегазации подобных аварий удалось бы избежать. Сейсмические методы, особенно методы шахтной сейсморазведки, являются достаточно апробированным средством обнаружения подобных аномалий [1].

В последние годы интерес к шахтной сейсморазведке существенно возрос. Наибольший прогресс наблюдается в КНР [3-6]. Ведутся подобные исследования в Европе [7], а также в России [8-12], где метод нашел широкое и всестороннее развитие. Разрабатываются новые прогрессивные методики [5, 6], алгоритмическая база обработки результатов сейсмических наблюдений [9, 10], анализируются вопросы математического моделирования [4]. При этом основная тенденция развития метода заключается в развитии многоволнового подхода [3], основы которого обоснованы в [2].

Особую актуальность имеют методы отраженных волн (МОВ) и сейсмической локализации (МСЛ), обеспечивающие возможность прогноза на участках, куда еще не дошли горные работы [1]. В качестве альтернативного инструмента могут быть использованы дифрагированные волны [13].

В данной статье дан анализ возможности использования дифрагированных волн для прогноза разрывных тектонических нарушений и приуроченных к ним зон вероятного скопления метана. Представлены математические соотношения основных процедур для построения сейсмических изображений исследуемой зоны. Описаны признаки наличия геологических аномалий. На реальном примере проиллюстрирован граф обработки результатов сейсмических наблюдений и особенности практического применения метода.

### Теория метода

Рассмотрим задачу в плоскости залегания угольного пласта (см. рис. 1). На профиле наблюдений (вдоль выработки) располагаются пункты возбуждения (ПВ) колебаний  $S_k$  ( $k=1..K$ ) и сейсмоприемники (СП)  $R_l$  ( $l=1..L$ ).

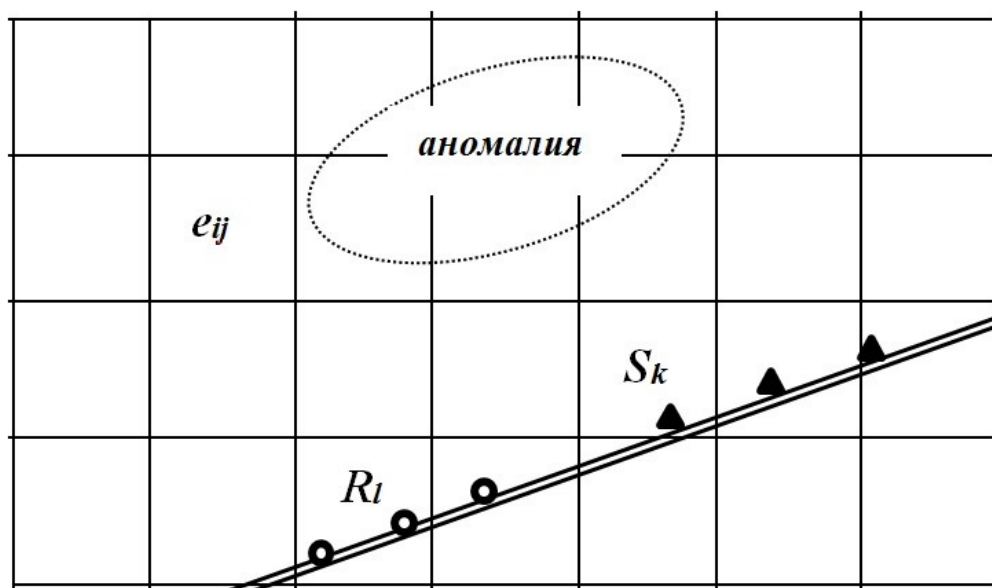


Рис. 1. К объяснению алгоритма метода дифрагированных волн

Расчет сейсмических изображений участка массива горных пород базируется на приведенном ниже алгоритме. Интересуемая зона разбивается на регулярную сеть ячеек  $e_{ij}$  со сторонами  $h$  и номерами  $i$  и  $j$  вдоль осей  $X$  и  $Z$ , соответственно.

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, каждая точка среды, куда достигла волна, является источником вторичных колебаний. Тогда рассчитать изображение  $A_{ij}$  ячейки  $e_{ij}$  можно по формуле

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L A_{ij}^{S_k R_l}, \quad (1)$$

где  $A_{ij}^{S_k R_l}$  – соответствующие времени  $T_{ij}^{S_k R_l}$  значения сейсмических отсчетов на сейсмоотрассе соответствующей СП  $R_l$  и ПВ  $S_k$  для пути распространения колебаний через ячейку  $e_{ij}$ . Время  $T_{ij}^{S_k R_l}$  представимо в виде:

$$T_{ij}^{S_k R_l} = T_{ij}^{R_l} + T_{ij}^{S_k},$$

$$\text{где } T_{ij}^{R_l} = h/V \sqrt{(i - i_{R_l})^2 + (j - j_{R_l})^2}, \quad T_{ij}^{S_k} = h/V \sqrt{(i - i_{S_k})^2 + (j - j_{S_k})^2}, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость распространения выбранной информативной волны (получаемая на практике процедурами скоростного анализа).

Необходимым условием применения предлагаемого метода является предварительная нормировка сейсмоотрасс для устранения разницы в уровнях записи, которая может быть следствием ряда причин. Это может быть различие сил ударов (взрывов) в пунктах возбуждения, различные условия закрепления сейсмоприемников. Уровни записи даже для сейсмоотрасс, получаемых соседними СП от одного ПВ, могут отличаться на порядок [1].

Нормировка выполняется по формуле

$$A(t) = A_0(t)K, \quad (4)$$

где  $A(t)$  нормированные,  $A_0(t)$  – исходные значения отсчетов на сейсмоотрассах,  $K = C / \max(A_0(t))$ , где  $C$  – коэффициент нормировки (единый для всего набора нормируемых сейсмоотрасс),  $\max(A_0(t))$  – максимум амплитуды отсчетов исходной сейсмоотрассы.

В случае малой амплитуды информативной части сигнала может быть выполнена автоматическая регулировка уровня записи (АРУ). Данная процедура выражается в применении варианта формулы (4):

$$A(t) = A_0(t)K(t), \quad (5)$$

где  $K(t) = \frac{C}{\max(A_0(t)) - \delta}$ ,  $\max(A_0(t))$  – максимум амплитуды на фрагменте исходной сейсмоотрассы от  $t-T/2$ , до  $t+T/2$ , где  $T$  – ширина полосы усреднения,  $\delta$  – пороговый уровень амплитуды.

### Результаты математического моделирования

На ненарушенных участках горных работ сейсмическое изображение зоны наблюдений представляет собой совокупность эллипсов, образующих регулярную структуру. Пример такой картины полученной на практике приведен на рис. 2.

Геологические аномалии на сейсмических изображениях могут проявляться разнообразно. Различные варианты можно проиллюстрировать методами математического моделирования. Методика моделирования достаточно хорошо описана [4]. На первом этапе производится расчет теоретических сейсмограмм при заданном расположении нарушения и системы наблюдений. Затем выполняется обработка результатов модели-

рования и построение сейсмических изображений. Рассчитанное положение аномалии сравнивается с заданным в модели.

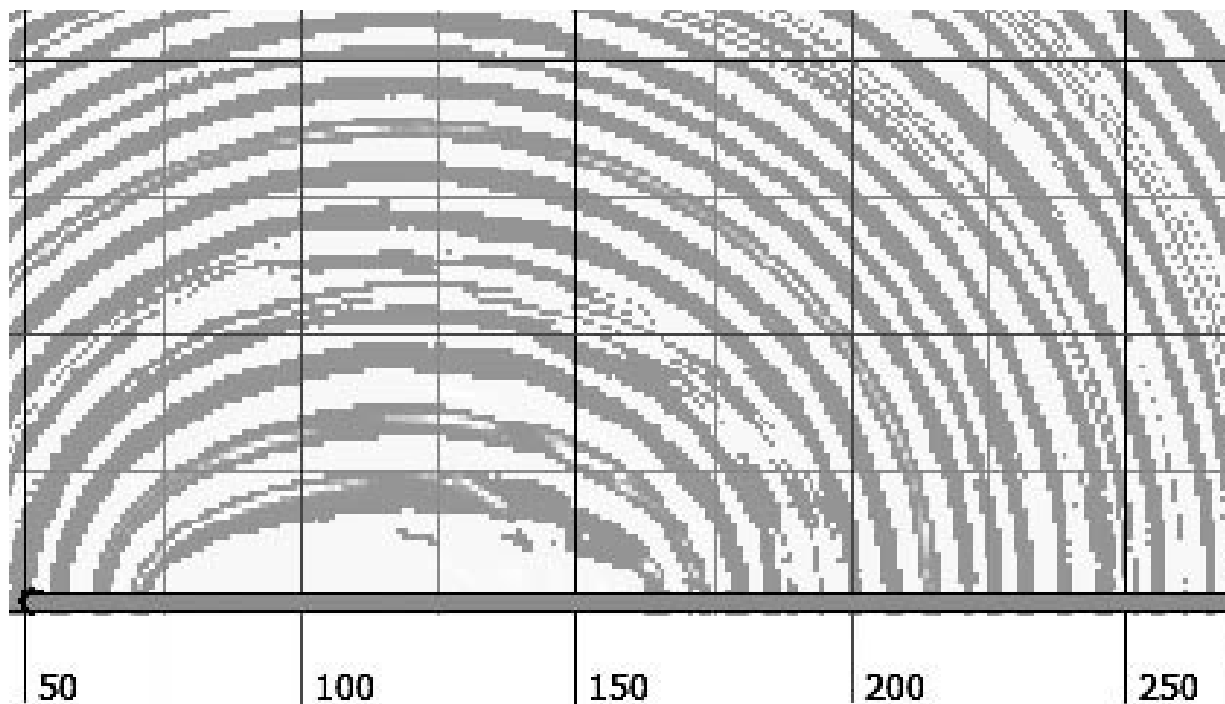


Рис. 2. Сейсмическое изображение ненарушенного участка шахтного поля

То, каким образом проявится зона нарушения на сейсмическом изображении, зависит от множества факторов и реализуется в разных вариантах (см. рис. 3). Во-первых, большое значение имеет то, напротив какого участка профиля расположено нарушение, во-вторых, его ориентация.

В идеальном для наблюдателя случае, если конфигурация системы наблюдений такова, что могут быть зарегистрированы отраженные волны, генерируется информативная картина расположения тектонического нарушения (см. рис. 3а). В общем случае зоны аномалий проявляются либо в виде локальных зон потери синфазности (см. рис. 3б, рис. 3в, рис. 3е), либо в изменении формы и направления характерных полос (см. рис. 3г), либо в виде синфазных максимумов в зоне аномалии (см. рис. 3д). Смещая профиль наблюдения относительно нарушения, мы можем получать совершенно разные по информативности изображения дизъюнктива. Наиболее актуальное из них получим в том случае, если средняя точка профиля будет расположена напротив нарушения.

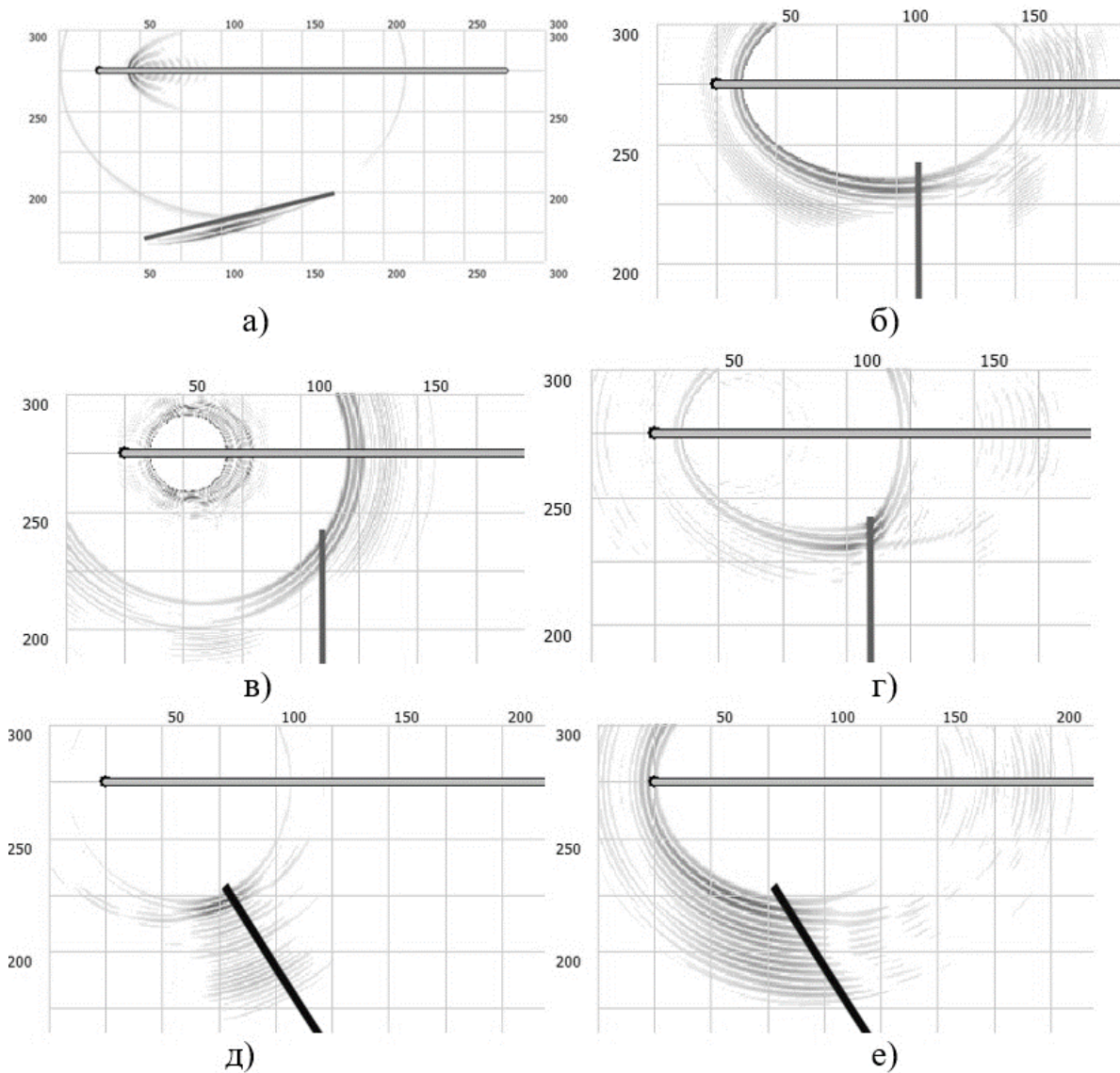
Скоростной анализ является обязательной частью графа обработки. При изменении используемого значения миграционной скорости форма и расположение изображения аномалии может меняться.

Признаки нарушения проявляются всегда, но в различной форме, что существенно затрудняет интерпретацию.

### Практическое использование

В качестве примера практического использования описанного выше метода рассмотрим результаты сейсмических экспериментов на участке 1086 лавы пласта  $c_{10}^6$  шахты «Днепровская». Профиль наблюдения располагался вдоль выработки (1086 бортового штрека). Система наблюдений была ориентирована на использование метода

общей глубинной точки. Метод дифрагированных волн был использован в качестве альтернативного подхода.



**Рис. 3.** Изображения дизъюнктива при различных вариантах расположения относительно профиля наблюдений

На рис. 4 представлено изображение области наблюдений. Четко прослеживается прямолинейный сегмент дизъюнктива от точки с координатами (200, 280), до точки (400, 200). Данный прогноз был подтвержден результатами отработки пласта.

В качестве другого примера приведем результаты обработки данных, полученных методом сейсмической локации (МСЛ) впереди забоя вентиляционного штрека 322 Д7-3 на шахте «Казахстанская» (Карагандинский угольный бассейн). Штрек проходится в плотных породах вне угольного пласта (Д<sub>6</sub>). Сейсмические изображения углепородного массива были построены справа и слева от груди забоя. Согласно результатам анализа, справа от груди забоя выделяются две зоны потери синфазности сейсмической картины (см. рис. 5). Первая зона расположена вперед 50 м, вправо 20 от груди забоя. Вторая зона расположена 20 метров назад, 20-30 вправо от груди забоя. Аномалии прослеживаются в диапазоне скоростей от 1200 до 1450 м/с.



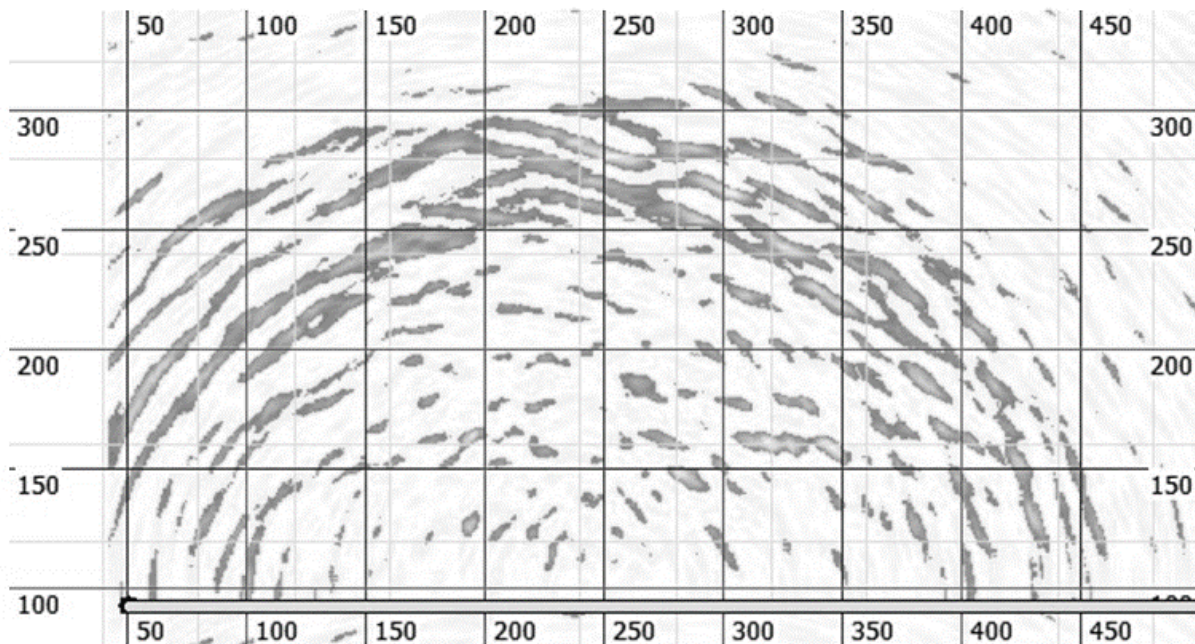


Рис. 4. Пример использования метода дифрагированных волн на участке 1086 лавы пласта  $c_{10}^6$  шахты «Днепровская»

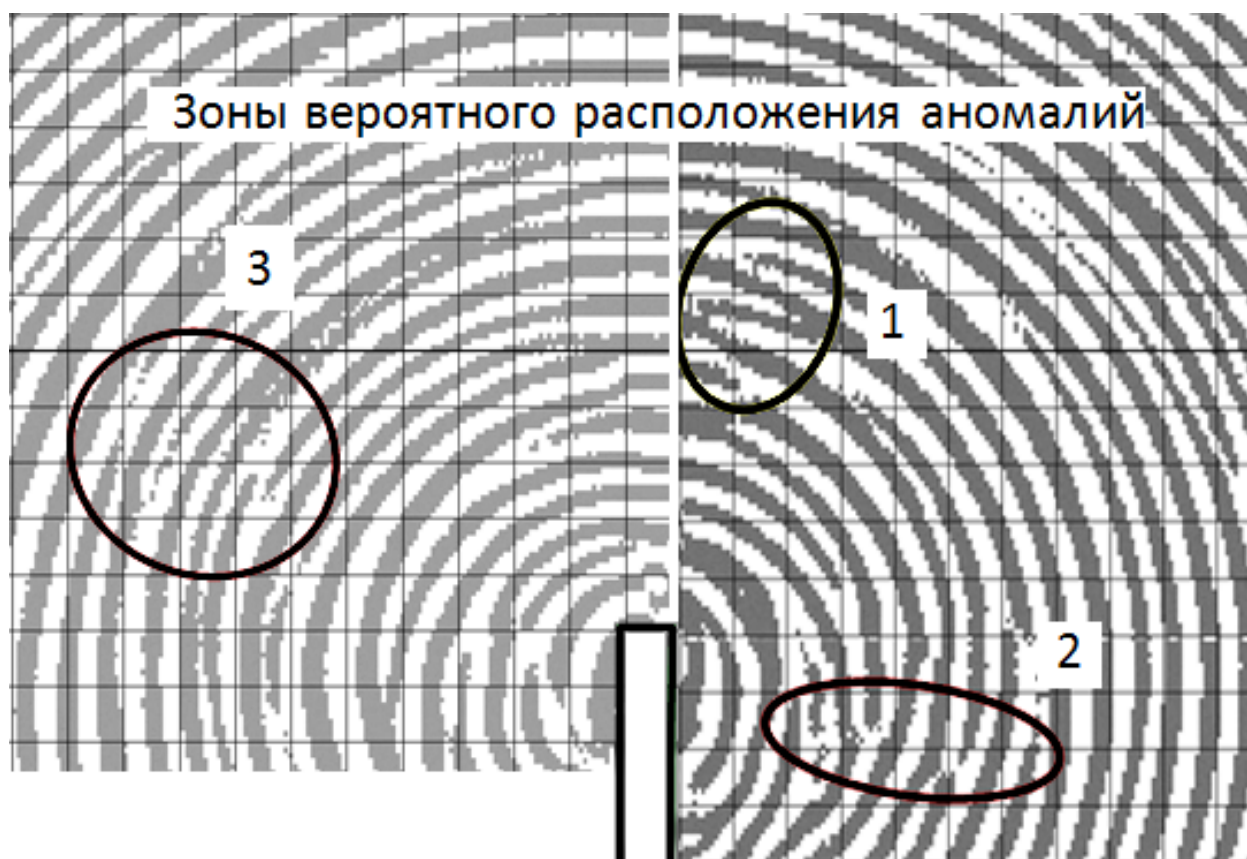


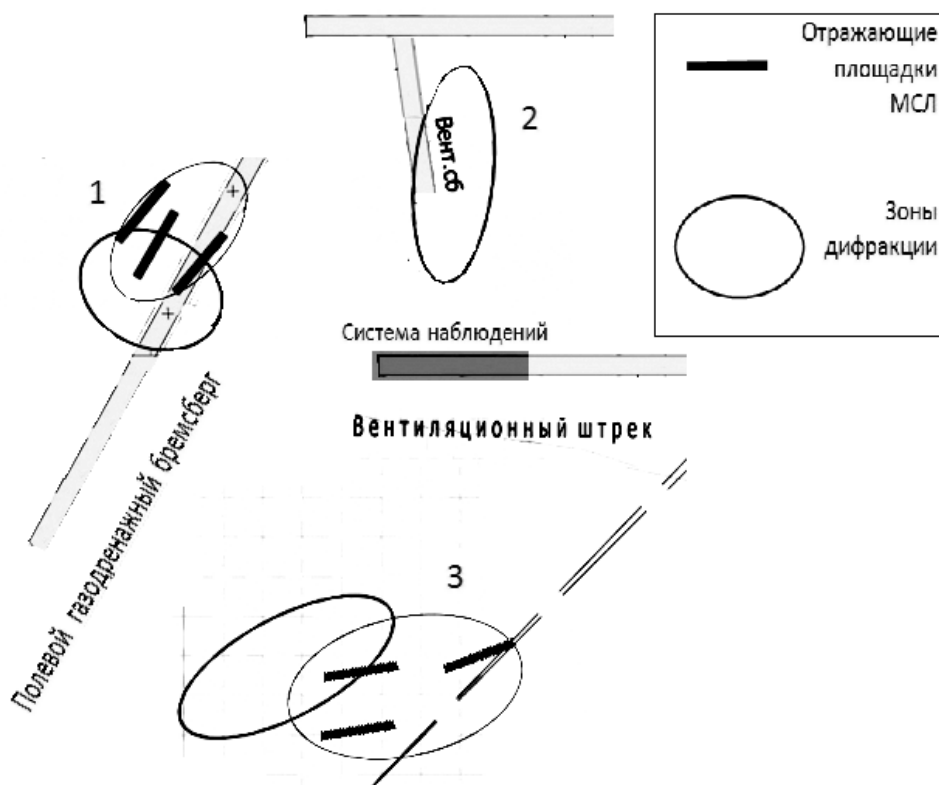
Рис. 5. Зоны вероятного расположения аномалий на участке вентиляционного штрека 322 Д7-3. Шаг масштабной сетки равен 10 м

Слева от груди забоя (60-70 м влево, 20-30 м вперед) в том же диапазоне скоростей выделяется не очень четкая третья зона потери синфазности сейсмической картины. Она не имеет ярко выраженного направления либо формы.

На рис. 6 представлены результаты сопоставления расположения аномальных зон, выделенных с использованием дифрагированных волн с результатами, полученными стандартным графом обработки МСЛ и с известными данными о горно-геологической ситуации.

Анализ показывает, что зона 1 – изображение полевого газодренажного бремсберга. Зона 2 – изображение вентиляционной сбойки. Предполагаемое тектоническое нарушение (зона 3) прослеживается слева от вентиляционного штрека 322 Д7-3 позади забоя. На уровне пласта Д<sub>6</sub> оно было подсечено горными работами.

Результаты прогноза зон 1 и 3 по методу учета дифрагированных волн полностью подтверждаются результатами стандартного подхода МСЛ.



**Рис. 6.** Результаты сопоставления расположения аномальных зон, выделенных с использованием дифрагированных волн с результатами, полученными стандартным графом обработки МСЛ

Метод сейсмической локации при использовании стандартного графа обработки практически не позволяет распознать объект подобный сбойке (см. рис. 5, зона 2), ориентированной практически по направлению сейсмического луча. Сечение выработки мало по сравнению с длиной волны информативных волновых пакетов и не представляет собой существенную отражающую площадку. Поэтому зона 2 не могла быть выявлена стандартным МСЛ.

Особенность метода дифрагированных волн в том, что информативен и в случаях, когда сейсмические лучи пересекают аномалии по касательной. Случай зоны 2 – тому подтверждение. Аномалия выделяется очень четко. С другой стороны, прогноз расположения зон 1 и 3, вероятно, точнее при использовании стандартного подхода МСЛ. В связи с этим рекомендуется использовать обработку дифрагированных волн параллельно в дополнение к стандартным подходам.

## Выводы

К настоящему времени рассмотренная методика успешно использована на ряде объектов по выявлению тектонических нарушений, в том числе потенциально опасных по выбросу газа. Обработывались сейсмические данные, полученные в ходе натурных наблюдений, проведенных на шахтах Донбасса. В частности, полученные на участке 7 откаточного штрека по пласту  $k_5$  ш. Горняк на участке лавы 1086 по пласту  $c_{10}^B$ , ш. Днепровская. Кроме этого, методика была использована при обработке результатов экспериментальных работ различными методами на пластах  $D_6$  и  $D_{1-2}$  на шахте «Шахтинская»,  $D_6$  шахты «Казахстанская»,  $K_{10}$  на шахте им. Т. Кузембаева и на других объектах Карагандинского угольного бассейна (Казахстан).

Методика доказала свою информативность. Имеется существенный задел в плане ее дальнейшего совершенствования. Методика может быть использована геофизическими службами и специализированными геологоразведочными организациями, оснащенными сейсмостанциями в шахтном исполнении и соответствующим оборудованием для проведения работ.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тиркель М.Г., Анциферов В.А., Глухов А.А. Изучение газоносности угленосных формаций. – Донецк: Вебер, 2008. – 301 с.
2. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. – Донецк: Алан, 2003. – 312 с.
3. Lu J., Meng X., Wang Y., Yang Z. Prediction of Coal Seam Details and Mining Safety Using Multicomponent Seismic Data: A case History from China // *Geophysics*. – 2016. – V.81, № 5. – P. 149-165. – DOI: 10.1191/geo2016-0009.1.
4. Hongliang W., Maochen G. Seismic wave propagation in coal seams: finite element modeling and field tests // *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. – 2014. – V. 5, № 3. – P. 229-244. – DOI: 10.1504/IJMME.2014.064482.
5. Jiwen Teng, Songying Li, Mingkui Jia, Jie Lian, Honglei Liu, Guodong Liu, Wei Wang, Schape Volker, Lei Feng, Xiaoshuai Yao, Kang Wang, Yafen Yan, Wanpeng Zhang. Research and Application of In-seam Seismic Survey Technology for Disaster causing Potential Geology Anomalous Body in Coal Seam // *Acta Geologica Sinica*. – 20120. – V. 94, № 1. – P. 10-26. – DOI: 10.1111/1755-6724.14372.
6. Cai W., Dou L., Cao A., Gong S., Li Z. Application of seismic velocity tomography in underground coal mines: A case study of Yima mining area, Henan, China // *Journal of Applied Geophysics*. – 2014. – V. 109. – P. 140-149. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2014.07.021.
7. Stewart A. Greenhalgh, Iain M. Mason, Cvetan Sinadinovski. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure // *Geophysics*. – 2016. – V. 65, № 6. – P. 1908-1919. – DOI: 10.1190/1.1444875.
8. Соколов С.В., Салтымаков Е.А., Кормин А.Н. Комплексные геофизические исследования состояния угленосного массива в условиях Кузбасса // *Вестн. Кузбасского гос. технич. ун-та*. – 2017. – № 2. – С. 66-71.
9. Рубан А.Д., Захаров В.Н., Аверин А.П., Вартанов С.А. Программный комплекс итерационного линейного восстановления строения и нарушенности угольного пласта на основе информативных параметров при сейсмодосветивании // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2010. – № 3. – С. 177-182.
10. Захаров В.Н., Аверин А.П., Вартанов С.А. Анализ алгоритмов лучевой томографии для прогноза нарушенности выемочного столба // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2010. – № 3. – С. 183-190.
11. Аверин А.П., Белоусов Ф.С. Результаты сейсмического профилирования на выемочном участке угольной шахты // *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы III конф. Междунар. науч. школы акад. К.Н. Трубецкого*. – М., 2018. – С. 151-154.
12. Захаров В.Н., Аверин А.П. Геофизическая оценка геодинамического состояния призабойного массива горных пород при подземных горных работах // *Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XXVI Междунар. науч. шк. им. акад. С.А. Христиановича / Крымский фед. ун-т [и др.]*. – Симферополь, 2016. – С. 90-94.
13. Глухов А.А. Алгоритм метода дифрагированных волн по прогнозу дизъюнктивов угольных пластов // *Журнал теоретической и прикладной механики*. – 2021. – №1. – С. 73-82.



## ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

С.Г. Бычков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** Выполнение гравиметрических исследований в условиях расчлененного рельефа местности связано с рядом определенных трудностей как на этапе проведения полевых работ, так и при обработке и интерпретации полученных данных. При интерпретации гравиметрических данных в условиях расчлененного рельефа местности необходимо тщательно учитывать плотность промежуточного слоя. Трансформации поля, разделение его на составляющие и выделение локальных аномалий осуществляется с данными, пересчитанными на горизонтальную плоскость. Для количественной интерпретации данных и построения геолого-геофизических моделей среды необходимо использовать данные, измеренные на рельефе, а сам рельеф включать в исходную геологическую модель.

**Ключевые слова:** гравиразведка, расчлененный рельеф, трансформация, интерпретация.

Выполнение гравиметрических исследований в условиях расчлененного рельефа местности связано с рядом определенных трудностей как на этапе проведения полевых работ, так и при обработке и интерпретации полученных данных [1, 6]. Сложные ортогидрографические условия в большинстве случаев не позволяют выполнить кондиционную площадную съемку, что затрудняет интерпретацию данных. Необходимость тщательного вычисления поправок за влияние рельефа местности и выбор плотности промежуточного слоя вносят сложности при обработке полевых материалов. Кроме того, в горных районах аномалии от искомым геологических объектов (особенно залегающих на незначительных глубинах, сравнимых с перепадом высот рельефа), искажены за счет изменения расстояния от источника поля до пунктов наблюдений. Особенно разновысотность гравиметрических пунктов необходимо учитывать при трансформациях поля с использованием скользящих окон, которые предусматривают горизонтальность поверхности наблюдений.

Некоторые особенности интерпретации гравиметрических данных в условиях расчлененного рельефа местности рассмотрим на примере гравиметрической съемки, выполненной в горной местности с множеством саев и промоин, с резкими перепадами высот около 600 м (рис. 1).

Полевые работы выполнялись высокоточными компьютеризированными гравиметрами AUTOGRAV CG-6. Для проведения топографо-геодезической съемки использовались GPS-приемники «Trimble R8». Среднеквадратическая погрешность определения аномалии силы тяжести составила  $\pm 0.029$  мГал.

При обработке полевых гравиметрических данных в качестве параметра поправки за промежуточный слой входит плотность этого слоя – толщи горных пород от поверхности Земли до уровня приведения. Рекомендуется плотность пород промежуточного слоя выбирать таким образом, чтобы вычисленные аномалии силы тяжести наименее коррелировали с рельефом местности [2].

Плотность промежуточного слоя, наиболее близкая к истинной плотности пород слагающих рельеф, определялась методом Неттлетона. Для каждого профиля строилось семейство кривых аномалий Буге с различной плотностью промежуточного слоя и из них выбрана та, которая меньше всего коррелирует с рельефом. На основании анализа графиков аномалий определена средняя («истинная») плотность промежуточного слоя.

Для примера на рис. 2 представлены графики аномалий Буге по одному из профилей, вычисленные с плотностями в диапазоне от  $2.0 \text{ г/см}^3$  до  $3.0 \text{ г/см}^3$ .

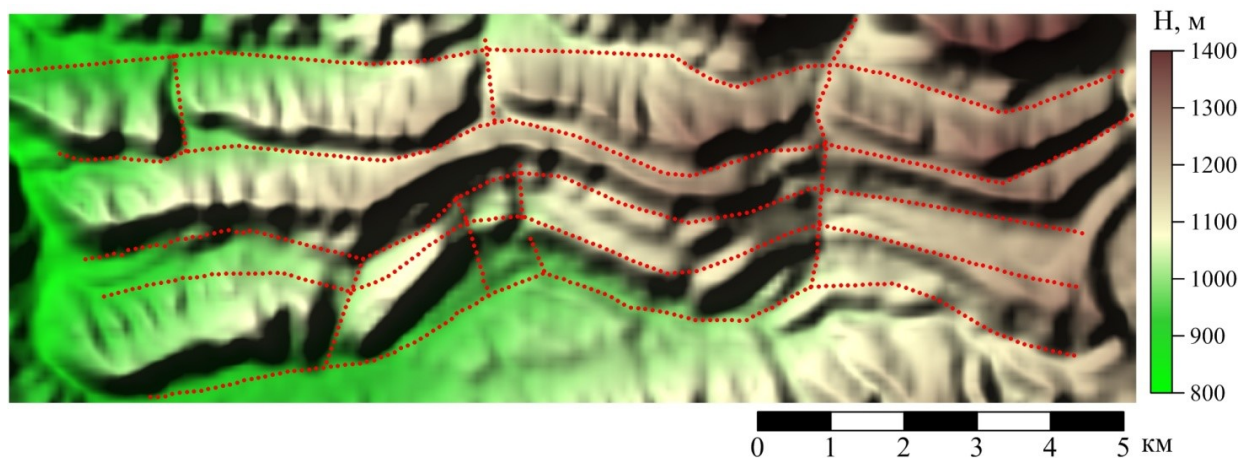


Рис. 1. Рельеф участка (красными точками показаны пункты наблюдений)

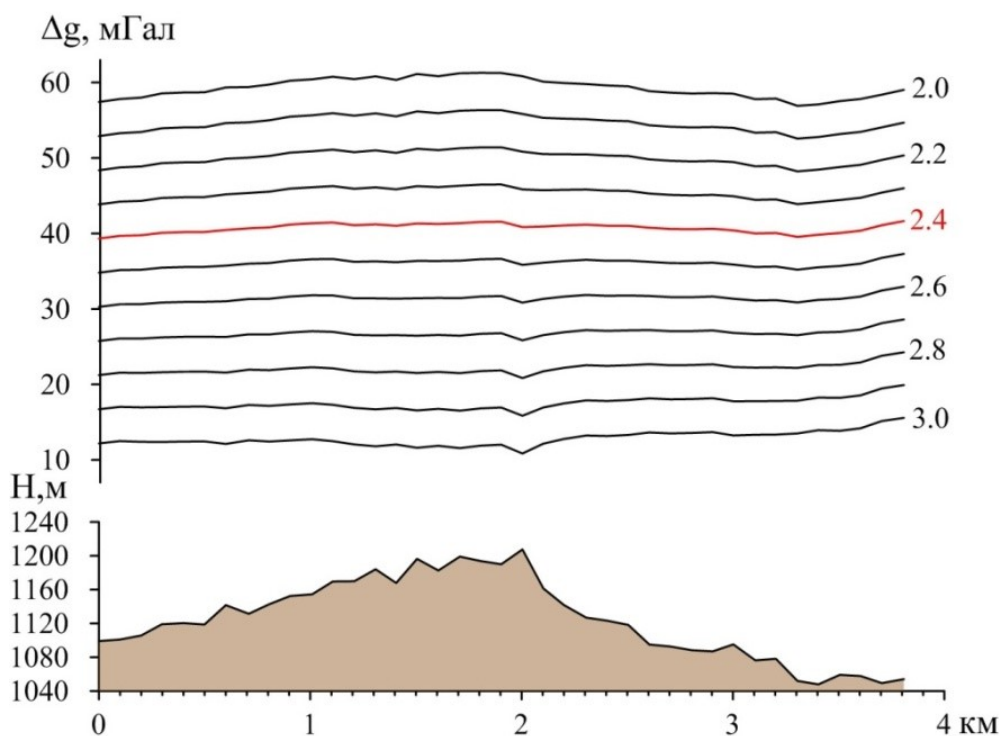


Рис. 2. Подбор плотности промежуточного слоя методом Неттлетона (параметр кривых аномалий силы тяжести – значение плотности в  $\text{г/см}^3$ )

Анализ графиков показал, что наименьшую коррелируемость с рельефом имеет график аномалий, вычисленный с плотностью  $2.40 \text{ г/см}^3$  с введенной поправкой за влияние рельефа. Поле, вычисленное с этой плотностью промежуточного слоя, использовано в дальнейшей интерпретации.

Перепад высот рельефа на данной площади составляет более 600 м. Измеренные значения гравитационного поля в условиях резкорасчлененного рельефа неизбежно содержат искажения, обусловленные влиянием «геометрического фактора» – изменением расстояний между возмущающими объектами и пунктами наблюдений. Приведение потенциальных полей, измеренных в условиях горного рельефа местно-

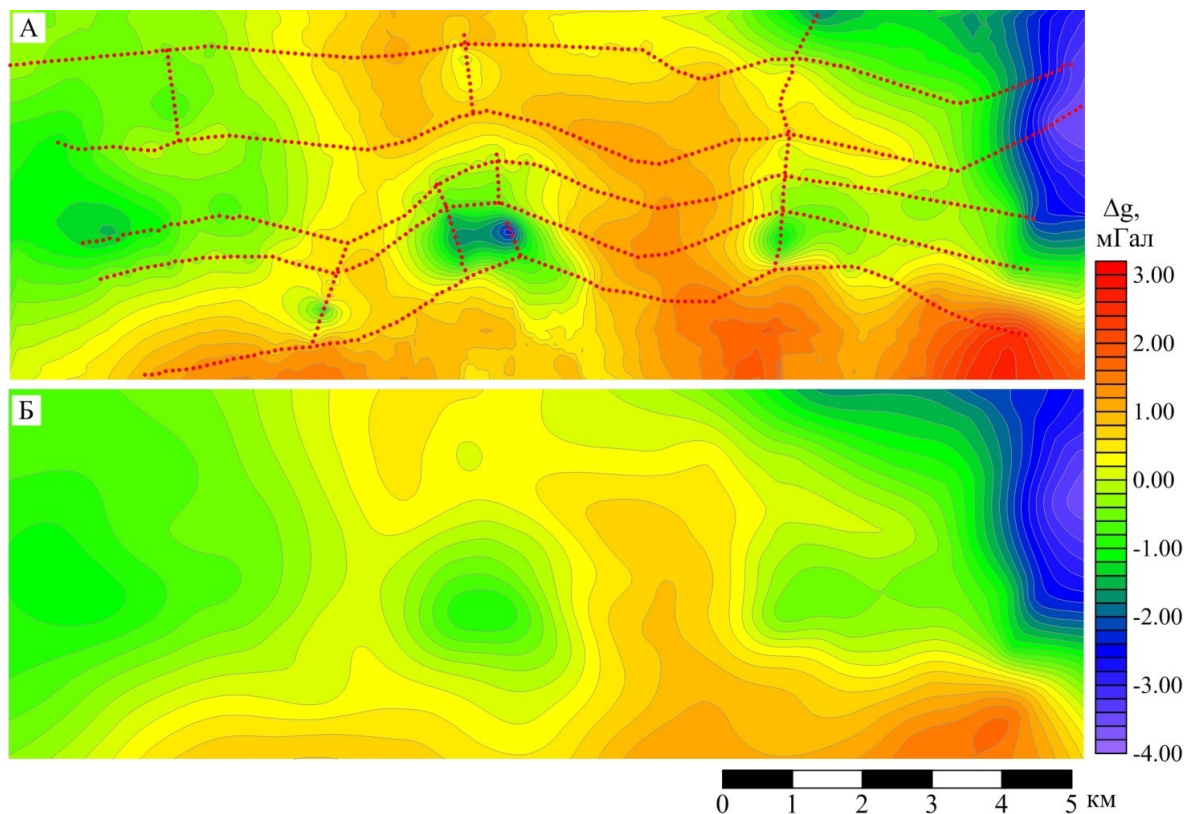
сти, к горизонтальной поверхности наблюдений во всех случаях является весьма полезным для последующей интерпретации материалов, так как приводит к упрощению морфологии поля и к устранению смещений эпицентров аномалий относительно возмущающих объектов.

Пересчет аномалий силы тяжести на горизонтальную плоскость произведен аппроксимационным способом, который является весьма эффективным инструментом решения целого ряда геолого-геофизических задач [3]. Суть способа заключается в представлении исходных данных функциями заданного класса с заданной степенью точности.

В процессе решения задачи исходное гравитационное поле, измеренное в произвольно расположенных точках на рельефе местности, аппроксимировано полем, обусловленным совокупностью сфер (точечных масс), расположенных ниже поверхности наблюдений. Аппроксимация измеренных аномалий силы тяжести осуществлялось суммарным полем масс на глубине 4 км, которые аппроксимировали региональную составляющую, и на глубине 50 м относительно рельефа местности (локальная составляющая поля). Точность подбора составила  $\pm 0.007$  мГал.

Восстановление значений поля на горизонтальной плоскости 1300 м осуществлено путем решения прямой задачи от аппроксимационной конструкции. Важным моментом является то, что при построении аппроксимационных моделей происходит подавление помех негармонического характера, обусловленных погрешностями измерений, мелкими приповерхностными неоднородностями геологической среды, погрешностями, возникающими в процессе формирования цифровых моделей поля.

Из сравнения полученной карты (рис. 3 Б) с картой аномалий силы тяжести, построенной по данным гравиметрических измерений на рельефе местности (рис. 3 А), видно, что поле стало более гладким, исчезли мелкие аномалии, зафиксированные на одном-двух пунктах.



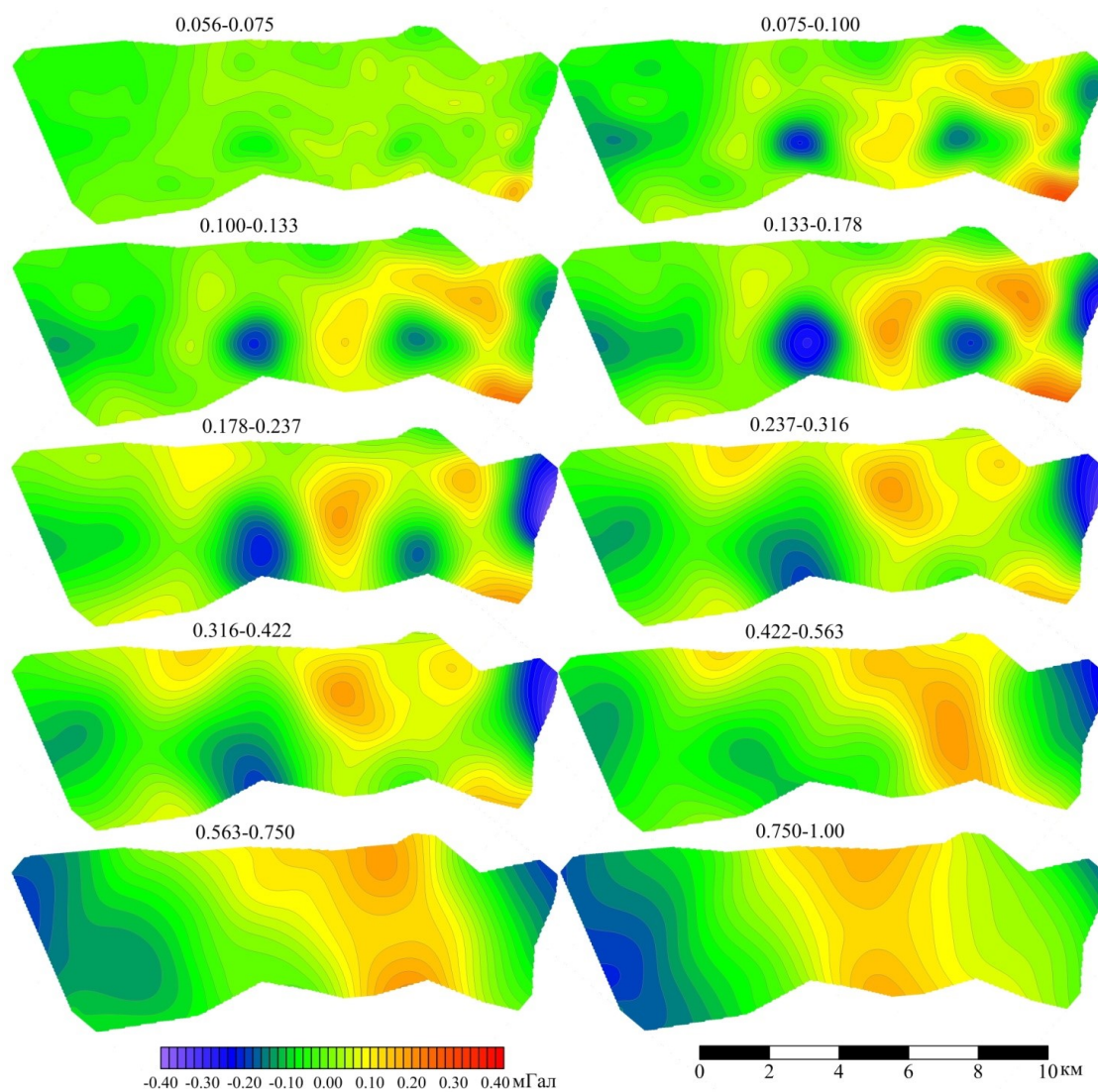
**Рис. 3.** Карты аномалий силы тяжести:  
А – измеренное на рельефе, Б – на горизонтальной плоскости 1300 м



С целью выделения и оконтуривания в пространстве локальных аномалий гравитационное поле, полученное на основании аппроксимационной конструкции, было обработано в системе Vector, которая позволяет вычислять распределение гравитационного поля в пространстве [4]. Для изучения плотностного строения породного массива построена трехмерная трансформанта, представленная на рис. 4 горизонтальными срезами при различных коэффициентах трансформации.

Коэффициент трансформации является относительным размером окна сканирования поля и изменяется от 0 до 1. В общем случае увеличение коэффициента соответствует увеличению глубины сканирования поля. Составляющая поля связана с распределением плотности внутри рассматриваемого слоя, поэтому может использоваться с целью выделения и оконтуривания геологических объектов, расположенных в определенном интервале глубин.

Как видно из рисунка, в центральной части площади выделяются две интенсивные локальные отрицательные аномалии. Наиболее рельефно они прослеживаются на коэффициентах 0.075-0.237. Отрицательные аномалии на западе и востоке площади носят региональный характер и возможно связаны с влиянием сторонних масс, расположенных за пределами площади.

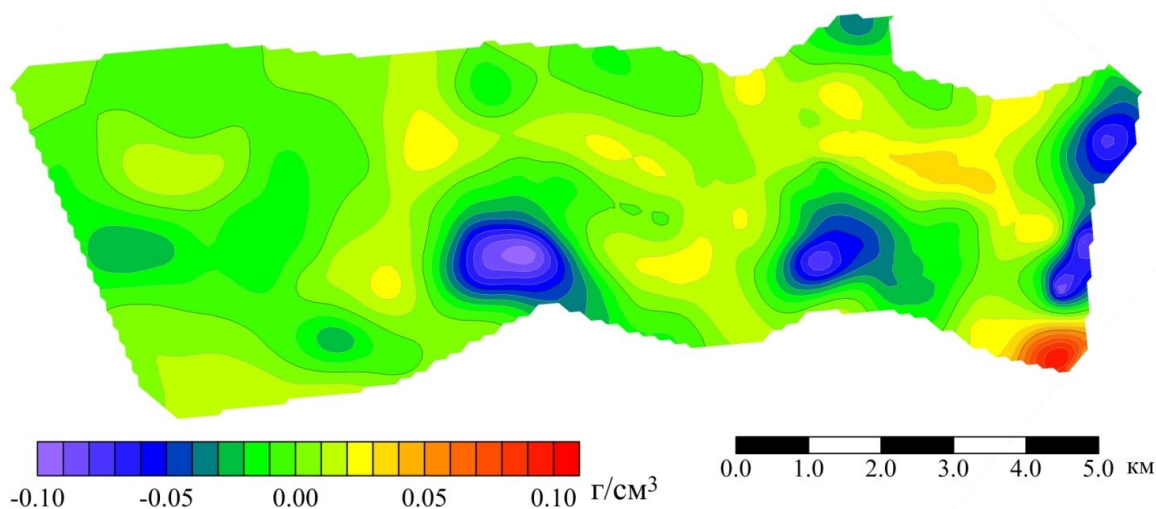


**Рис. 4.** Горизонтальные срезы 3D диаграммы поля (величины коэффициентов трансформации показаны на картах)

Трансформанты поля, полученные в системе Vector, имеют качественный характер. Для определения количественных характеристик горного массива, например характера распределения плотности пород, необходимо решить обратную задачу гравиразведки.

Для решения обратной линейной задачи использовалось поле, измеренное на рельефе. Вычисление плотности пород осуществлялось в слое, ограниченном рельефом местности и первой плотностной границей разреза, залегающей на глубине порядка 400 м. Решения обратной задачи осуществлялось методом локальных поправок [5].

Карта полученных значений аномальных плотностей приведена на рис. 5. Диапазон изменения относительных плотностей составляет до  $0.2 \text{ г/см}^3$ . В зонах отрицательных аномалий с горизонтальными размерами до 1.5 км, выделенных в системе Vector, отмечается наибольшее разуплотнение пород и большие градиенты изменения плотности.



**Рис. 5.** Плотностные неоднородности в слое между рельефом местности и первой плотностной границей

Таким образом, при интерпретации гравиметрических данных в условиях расчлененного рельефа местности необходимо тщательно учитывать плотность промежуточного слоя, иначе исходные аномалии силы тяжести будут отражать прежде всего не геологические неоднородности разреза, а рельеф местности. Поскольку теория трансформаций поля, разделение его на составляющие и выделение локальных аномалий построены на предположении о горизонтальности рельефа наблюдений, необходимо использовать данные, пересчитанные на горизонтальную плоскость. Для количественной интерпретации и построения геолого-геофизических моделей среды необходимо использовать данные, измеренные на рельефе, а сам рельеф включать в исходную геологическую модель.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения  
по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29. декабря 2020 г.  
(рег. номер 122012000398-0).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гордин В.М. Способы учета влияния рельефа местности при высокоточных гравиметрических измерениях: обзор. – М.: ВИЭМС, 1974. – 89 с. – (Сер. IX. Региональная, разведочная и промысловая геофизика: ВИЭМС. ОЦНТИ).
2. Гравиразведка: справ. геофизика / под ред. Е.А. Мудрецово́й, К.Е. Веселова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра. 1990. – 607 с.: ил.

3. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемки в горной местности. – Абакан: Таймыркомприродресурсы, 2002. – 187 с.: ил.
4. Простолупов Г.В., Новоселицкий В.М., Конешов В.Н., Щербинина Г.П. Об интерпретации гравитационного и магнитного полей на основе трансформации горизонтальных градиентов в системе VECTOR // Физика Земли. – 2006. – № 6 – С. 90-96.
5. Пруткин И.Л. О решении трехмерной обратной задачи гравиметрии в классе контактных поверхностей методом локальных поправок // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1986. – № 1. – С. 67-77.
6. Хесин Б.Э. Рудная геофизика в горных областях. – М.: Недра, 1969. – 200 с.

УДК 550.343.64+622

DOI:10.7242/echo.2023.2.9

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА МИКРОСЕЙСМИЧНОСТИ НА РУДНИКЕ СКРУ-2 ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Т.В. Злобина

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье представлена методика прогнозирования максимально возможного уровня микросейсмической активности на руднике СКРУ-2 Верхнекамского месторождения калийных солей. Разработанный алгоритм включает в себя семь этапов, которые позволяют верифицировать и апробировать математическую модель. Результатом применения данного алгоритма является прогнозная карта на 2023 год для изучаемого рудника. На полученной карте выделены области с параметром  $E_{S_{max}}$  (максимальная плотность выделения сейсмической энергии) более 12 Дж/100 м<sup>2</sup>, которые являются геодинамически опасными зонами.

**Ключевые слова:** калийный рудник, сейсмологический мониторинг, техногенная сейсмичность, математическая модель, горнотехнические параметры отработки, пространственный анализ, прогноз.

### Введение

Вопрос прогнозирования сейсмической активности на рудниках и шахтах является актуальным для многих горнопромышленных районов мира [1, 2]. Так, для Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) в работах [3-5] описаны региональный и локальный прогнозы, которые основаны на регистрации сейсмических событий, а также на изучении оседаний земной поверхности. Как показала практика сейсмологических наблюдений на ВКМКС, зарегистрированная сейсмичность зависит от многих факторов. Впервые в работе [6] предложена математическая модель, описывающая влияние различных факторов на уровень техногенной сейсмичности месторождения, а также качественно оценено влияние таких факторов, как разработка нескольких пластов, влияние закладочных работ, возраст горных выработок, влияние удаленных землетрясений и взрывных работ. В статьях [7, 8] показана реализация данной математической модели и даны ее количественные параметры для выбранных влияющих факторов. Публикация [9] демонстрирует апробацию метода прогнозирования сейсмической активности для рудника СКРУ-2 Верхнекамского месторождения. Данный прогноз основан на выявленных ранее закономерностях, которые учитывают влияние нескольких основных горнотехнических факторов. Верификация данной методики была осуществлена только с помощью корреляционного анализа. Настоящая работа описывает сам алгоритм прогнозирования сейсмической активности, который включает не только корреляционный, но и регрессионный анализ. Предложенная методика описана для рудника Второго Соликамского рудоуправления – СКРУ-2.

## Особенности микросейсмической активности на руднике СКРУ-2

Шахтное поле рудника СКРУ-2, приуроченное к южной части Соликамской брахиантиклинали (южная часть Соликамского участка), имеет размер 7.0 на 8.5 км. Площадь шахтного поля по границам горного отвода составляет 50.4 км<sup>2</sup>. На руднике ведется добыча силвинитовой руды на пластах АБ, Вс, и Красный-II [10].

Промышленная отработка данного участка началась в 1974 году. 5 января 1995 года в северо-восточной части рудника произошло динамическое разрушение несущих элементов горных выработок, что привело к техногенному землетрясению с магнитудой  $m_b = 4.7$ . На земной поверхности непосредственно над участками обрушения образовалась мульда с размерами в плане 650 на 850 м при глубине 4.5 м [11]. Несмотря на обширное разрушение и появление оседания земной поверхности рудник продолжил функционировать. 18 ноября 2014 года в юго-восточной части ранее образовавшейся мульды произошел провал [12]. В настоящее время рудник находится в стадии ликвидации.

Особенности вскрытия пластов, способа подготовки и раскройки шахтного поля представлены в работе [13]. Первые сейсмологические наблюдения на данном шахтном поле были получены в 1995 году. В настоящее время в самом руднике установлено 10 сеймопавильонов, оснащенных вертикальными сеймоприемниками СМЗ-КВ, позволяющими регистрировать сейсмические сигналы в диапазоне частот от 0.5 до 100 Гц. Посредством кабельных телеметрических линий связи сеймоприемники связаны с наземными регистрирующими модулями, которые в непрерывном режиме принимают сигналы сеймоприемников и фиксируют сейсмические события [14-15]. С 2000 по ноябрь 2022 года сейсмологической сетью на руднике зарегистрировано более 6000 сейсмических событий, связанных с деформационными процессами в подработанном массиве горных пород. Суммарная энергия сейсмических событий, произошедших на территории рудника, составила 4.5 МДж.

## Этапы прогнозирования микросейсмической активности

После проведения ряда исследований [6-9] по изучению различных влияющих факторов на интенсивность сейсмичности в калийных рудниках был сформулирован алгоритм прогнозирования микросейсмической активности. Последовательность этапов представлена на рисунке 1.

Первый этап данного алгоритма заключается в выделение факторов, влияющих на уровень микросейсмической активности. Более подробно об изучении влияющих факторов в исследовании [7].

Второй этап сводится к выбору прогнозируемого сейсмического параметра. В данном случае была выбрана величина плотности выделения сейсмической энергии –  $E_s$ . Методика расчета данных карт представлена в статье [16]. Расчет параметров математической модели влияющих факторов осуществляется при третьем этапе. Актуализированные значения модели для рудника СКРУ-2 по данным 2000-2020 гг. описаны в [8]. Далее (четвертый этап) необходимо выбрать те факторы, которые целесообразно использовать при прогнозе. Подробно изучение возможности использования изученных факторов в прогнозировании отражено в работе [9].

Более подробно в настоящей статье пойдет речь об пятом, шестом и седьмом этапах прогнозирования. Пятый шаг описываемой методики заключается в расчете прогнозируемого параметра для определенного года по следующей формуле:

$$P(t) = P_0 \sum_{i=0}^n \frac{U_i(t, t_i)}{n} \quad (1)$$

где  $P(t)$  – прогнозируемое значение плотности выделения сейсмической энергии, рассчитанное для определенного года (Дж/100 м<sup>2</sup>);  $P_0$  – максимальный уровень сейсмичности, а именно плотности выделения сейсмической энергии для фактора возраста горных выработок (Дж/100 м<sup>2</sup>);  $U_i(t, t_i)$  – функция, описывающая относительные изменения влияния выбранных факторов во времени;  $t$  – момент времени, для которого рассчитывается модельное значение;  $t_i$  – момент начала действия фактора.

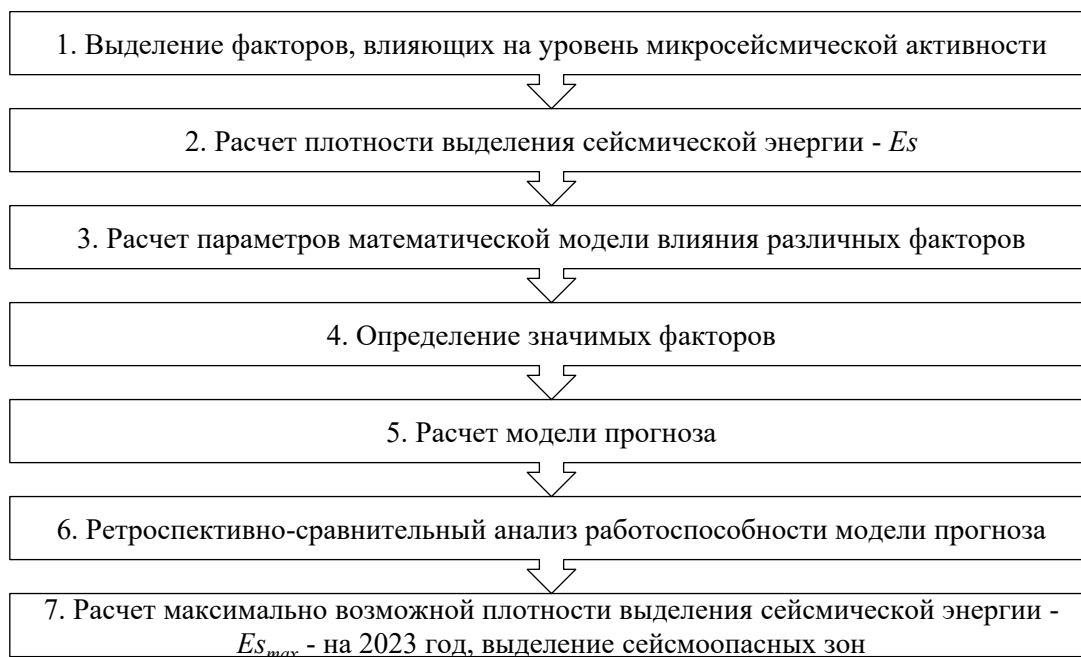


Рис. 1. Алгоритм прогнозирования плотности выделения сейсмической энергии

В текущем алгоритме используются два основных влияющих горнотехнических фактора: возраст горных выработок и тип и возраст закладочных работ. Параметр  $P(t)$  рассчитывается для каждой отдельной камеры на основании характеристик, полученных из базы данных по параметрам отработки. Все расчеты проводились в программном пакете ArcGIS.

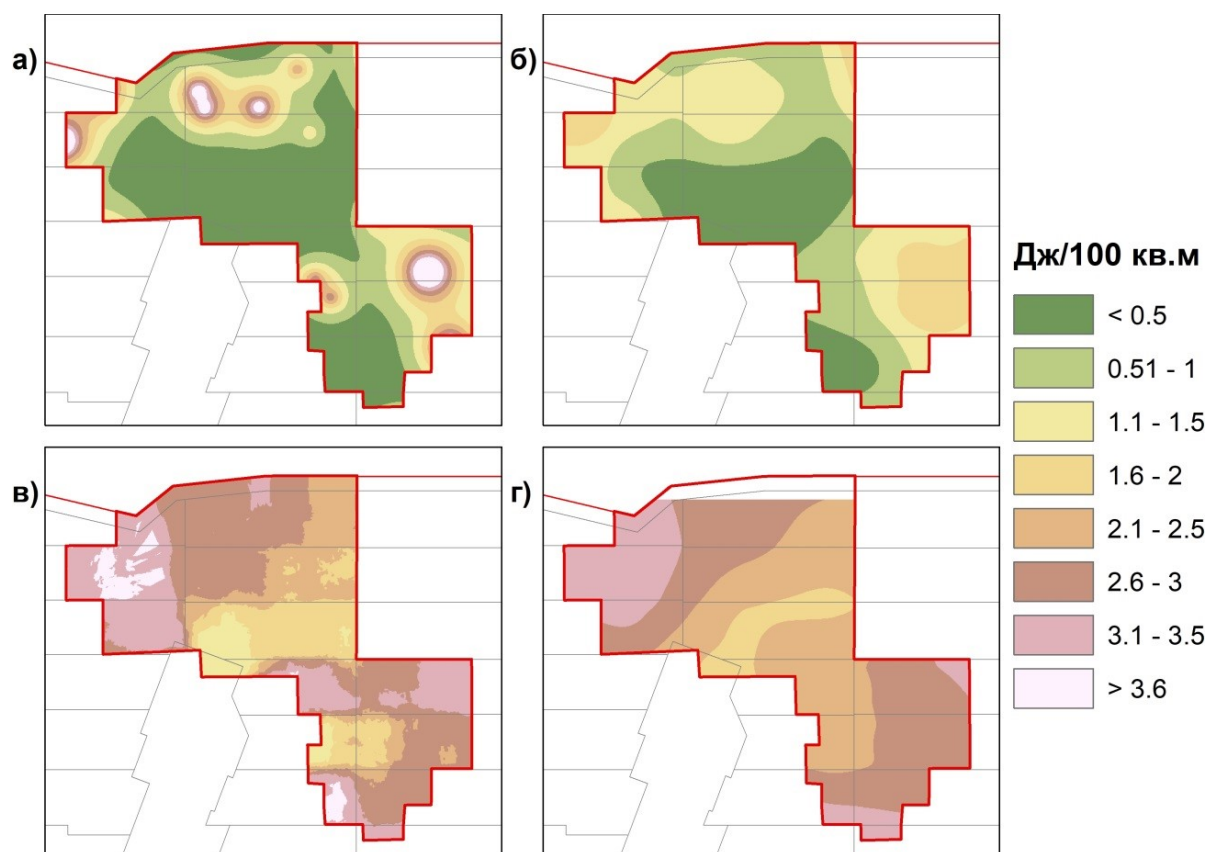
Ретроспективно-сравнительный анализ работоспособности модели будет являться шестым этапом данного алгоритма. Этот этап необходим для установления, насколько верно модельные вычисления отражают фактический исходный материал.

В качестве исходных данных были взяты полигональные слои отработанных камер по трем продуктивным пластам рудника СКРУ-2. Все эти слои объединялись в один, при этом каждый полигон-камера наделялся соответствующей атрибутивной информацией: идентификатор, площадь, количество пластов, минимальный год отработки, минимальный год закладки. По этим данным проводился расчет прогнозного параметра по формуле (1). Для сопоставления площадных данных были построены растры модельных значений  $E_s$  методом интерполяции кригинг. Далее были получены коэффициенты корреляции Пирсона между фактическими и модельными данными (сопоставление данных проводилась для каждой отдельной ячейки растра). Пример таких карт параметра  $E_s$  для 2019 год представлен на ри-



сунке 2. Исследуемая площадь камер для выбранного года составляет 8.9% от общей площади. Коэффициент корреляции составил 0.30. Рассматривая рис. 2а и 2в, можно отметить совпадение реальных и прогнозных зон с повышенными значениями плотности выделения сейсмической энергии (северо-запад и юго-восток изучаемой территории). Центральная часть характеризуется пониженными значениями прогностического параметра. К зарегистрированному и рассчитанному полям применялся сглаживающий фильтр с радиусом осреднения 750 метров (рис. 2б и 2г). При применении сглаживания коэффициент корреляции увеличился до 0.58, что говорит о заметной корреляционной связи.

Для реализации регрессионного анализа атрибутивных данных были найдены фактические значения плотности выделения сейсмической энергии для каждой камеры путем нахождения среднего значения ячеек раstra, попадающих на эту площадь. На рисунке 3а представлен график зависимости зарегистрированной сейсмичности от модельных значений. Рассматривая его, необходимо выделить определенную тенденцию: с увеличения прогностического параметра, увеличивается максимальное фактическое значение зарегистрированной сейсмичности. Таким образом, представленные данные позволяют говорить о возможности уверенного прогноза максимального уровня сейсмичности на конкретном участке шахтного поля, исходя из горнотехнических параметров его отработки.



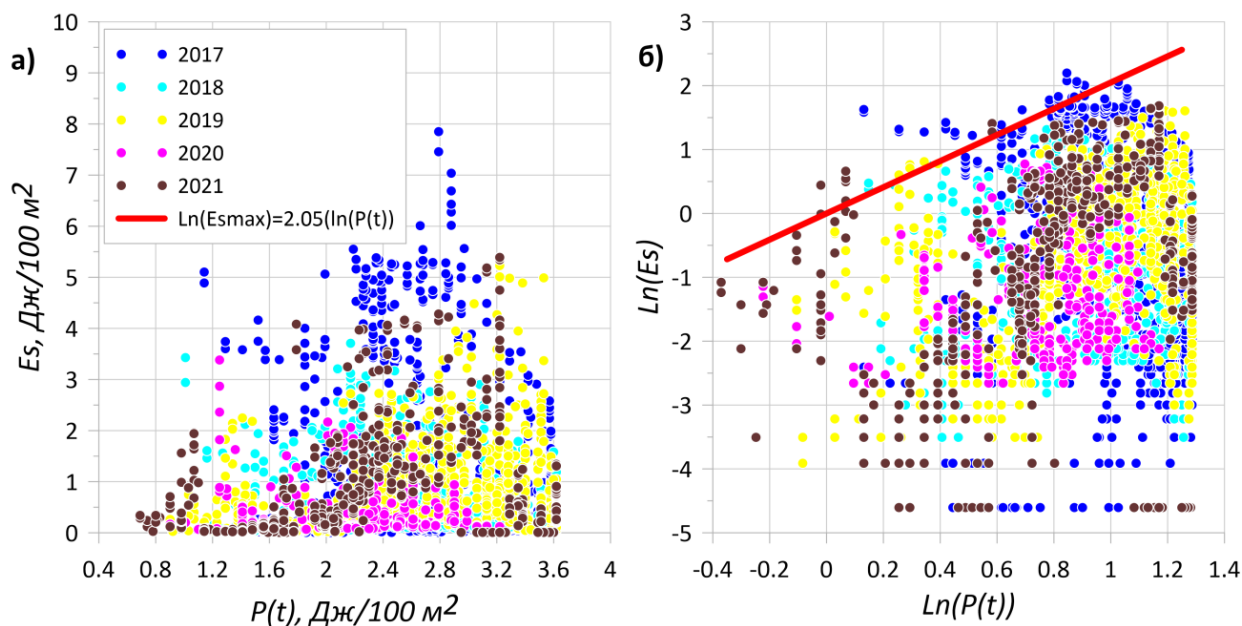
**Рис. 2.** Карты плотности выделения сейсмической энергии для СКРУ-2 на 2019 год:  
а) фактическая карта  $E_s$ ; б) отфильтрованная фактическая карта  $E_s$  с радиусом сглаживания 750 м;  
в) модельная карта  $E_s$ ; г) отфильтрованная модельная карта  $E_s$  с радиусом сглаживания 750 м

Рисунок 4а демонстрирует графики невязок регрессии, который показывает распределение пере- и недооценок по отношению к прогнозированным значениям. В идеальном случае данные значения должны распределяться случайно. Как видно

из рисунка 4а, значения распределены неравномерно, есть смещения в положительные значения (положительная асимметрия). Это говорит о наличии нелинейной связи между параметрами; для устранения данного смещения данные были прологарифмированы. Зависимость логарифма зарегистрированных значений  $E_s$  от логарифма рассчитанных показана на рисунке 3б. Рисунок 4б демонстрирует зависимость стандартных остатков от прогнозируемых значений для логарифмированных данных. Необходимо заметить, что такого смещения, как было ранее, не наблюдается, что говорит об адекватности регрессионной модели. Как видно из рисунка 4б, одному и тому же значению модельного параметра могут соответствовать различные значения фактического, т.е. достаточно уверенно можно спрогнозировать только максимальный уровень сейсмической активности при определенных сочетаниях горнотехнических параметров. Формула максимально возможной плотности выделения сейсмической энергии, исходя из определенных горнотехнических параметров обработки, имеет вид:

$$\ln(E_{s_{max}}) = 2.05 \cdot \ln(P(t)) \quad (2)$$

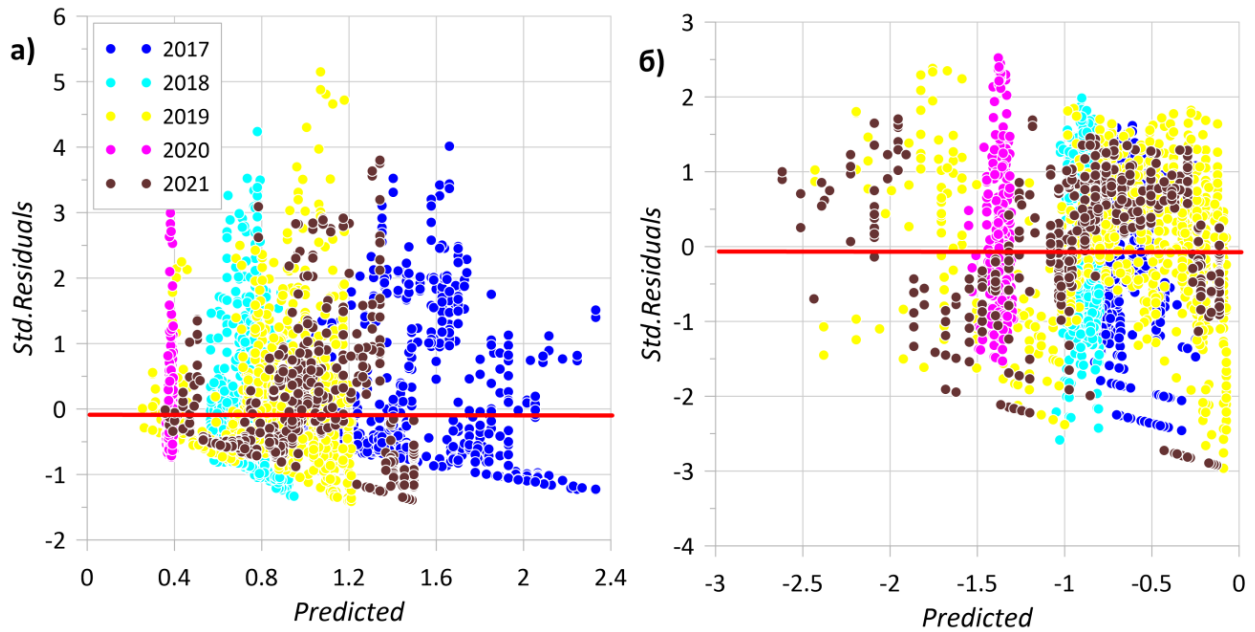
где  $P(t)$  – рассчитанное значение плотности выделения сейсмической энергии для каждой камеры,  $E_{s_{max}}$  – максимально возможное значение плотности выделения сейсмической энергии.



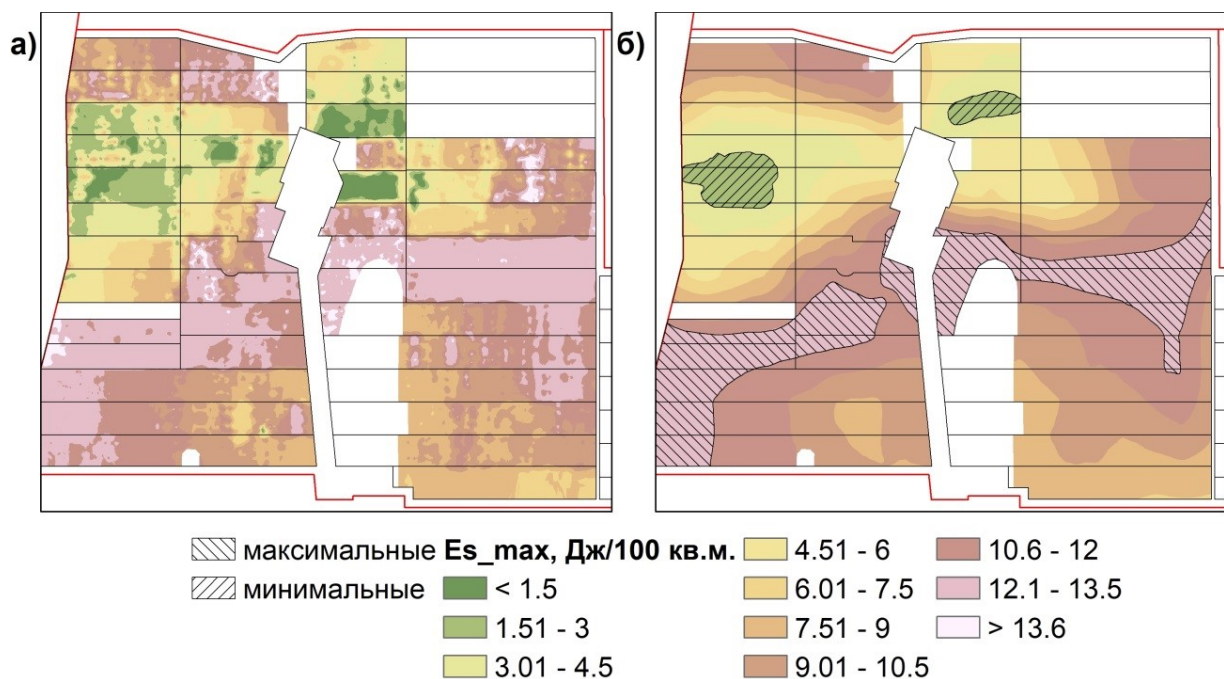
**Рис. 3.** а) Зависимость зарегистрированной плотности выделения сейсмической энергии от рассчитанного значения для СКРУ-2; б) зависимость логарифма зарегистрированной плотности выделения сейсмической энергии от логарифма рассчитанного значения для СКРУ-2

Последним завершающим седьмым этапом алгоритма прогноза является расчет прогностического сейсмического параметра – ожидаемого максимального уровня плотности выделения сейсмической энергии на 2023 год. На рисунке 5 показаны рассчитанные карты модельного параметра  $E_{s_{max}}$  без сглаживания и со сглаживанием значений поля в радиусе 750 м. Зоны с пониженными значениями прогностического параметра были выделены по условию  $E_{s_{max}} < 3$  Дж/100 м<sup>2</sup>. Возраст таких камер составил 35-50 лет, из них в 92% камер была произведена закладка хотя бы на одном продуктивном пласте. Геодинамически опасные зоны выделялись на территории, где прогностический

параметр  $E_{s_{max}}$  более 12 Дж/100 м<sup>2</sup>. Данная зона проходит вдоль всего рудника в центральной части с юго-запада на северо-восток. Рассматривая эту территорию совместно с планами горных работ, можно сказать, что камеры, на которых ожидается повышенные значения  $E_{s_{max}}$ , имеют возраст 10-30 лет. 16% этих камер не заложены на всех трех обрабатываемых пластах.



**Рис. 4.** а) Зависимость стандартных остатков от прогнозируемых значений для СКРУ-2; б) зависимость стандартных остатков от прогнозируемых значений для логарифмированных данных для СКРУ-2



**Рис. 5.** Карты максимальных значений плотности выделения сейсмической энергии для СКРУ-2 на 2023 год:  
а) модельная карта  $E_{s_{max}}$ ;  
б) модельная отфильтрованная карта  $E_{s_{max}}$  с радиусом сглаживания 750 м

## Выводы

Предложенный в статье алгоритм показал возможность прогноза максимального уровня плотности выделения сейсмической энергии на исследуемом руднике на всей отработанной площади. Количественная оценка влияния двух горно-технических факторов (возраст горных выработок, а также тип и возраст закладочных работ) позволила выделить область с повышенным прогностическим параметром  $Es_{max}$ . Эта территория является геодинамически опасной, на ней возможны крупные сейсмические события в следующем году. На данной территории рекомендуется предусмотреть соответствующие меры для снижения рисков возникновения аварийных ситуаций.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения  
по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.  
(рег. номер 122012000401-7)*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Герман В.И. Прогноз обрушений на рудниках по данным сейсмического мониторинга // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 99-109.
2. Яковлев Д.В., Цирель С.В., Мулев С.Н. Закономерности развития и методика оперативной оценки техногенной сейсмической активности на горных предприятиях и в горнодобывающих регионах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 2. – С. 34-47.
3. Дягилев Р.А. Прогнозирование крупных сейсмических событий по результатам мониторинга на руднике СКРУ-2 // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы регион. конф. / ПГУ. – Пермь, 1997. – С. 188-189.
4. Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю. Методы регионального и локального сейсмологического прогноза на калийных рудниках // Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: тез. докл. I-го междунар. шк.-семинара. – Красноярск, 2001. – С.58-59.
5. Шулаков Д.Ю. Изучение корреляционной зависимости между микросейсмической активностью и сдвигами земной поверхности в зависимости от горно-технологических условий // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. – Пермь, 2004. – С. 104-106.
6. Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю., Верхоланцев А.В. Техногенная сейсмичность калийных месторождений // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы науч.-практ. конф., посвящ. 25-летию Горн. ин-та УрО РАН и 75-летию основателя и первого директора ин-та чл.-корр. РАН А.Е. Красноштейна / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 45-50.
7. Дягилев Р.А., Злобина Т.В., Шулаков Д.Ю. Техногенная сейсмичность в калийных рудниках Верхнекамского месторождения. // Геомеханические поля и процессы: Экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. Т. 1 / отв. ред. Н.Н. Мельников. – Новосибирск, 2018. – С. 80-94.
8. Злобина Т.В. Обновление параметров модели прогноза сейсмической активности для рудника СКРУ-1 Верхнекамского месторождения калийных солей // Горное эхо. – 2022. – № 1 (86). – С. 101-108. – DOI: 10.7242/echo.2022.1.16.
9. Злобина Т.В., Дягилев Р.А. Апробация метода прогноза сейсмической активности для Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 4. – С. 56-66. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_4\_0\_56.
10. Белкин В.В. Мониторинг геологической среды Верхнекамского соленосного бассейна / ПГТУ, Березников. филиал. – 2-е изд. – Березники, 2006. – 252 с.
11. Маловичко Д.А. Изучение механизма Соликамского землетрясения 5 января 1995 года // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т.7, №1 – С. 75-90.
12. Шулаков, Д.Ю., Варлашова Ю.В. Сейсмологический мониторинг развития аварийной ситуации на руднике СКРУ-2 // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Десятой Междунар. сейсмологич. шк. / ГС РАН. – Обнинск, 2015. – С. 368-372.
13. Соловьев В.А., Секунцов А.И. Разработка калийных месторождений: практикум. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 265 с.
14. Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А. Сейсмологический мониторинг на рудниках Верхнекамского месторождения калийных солей // Горный журнал. – 2008. – № 10. – С. 25-29.

15. Шулаков Д.Ю., Бутырин П.Г., Верхоланцев А.В. Сейсмологический мониторинг Верхнекамского месторождения: задачи, проблемы, решения // Горн. журн. – 2018. – № 6. – С. 25-29. – DOI: 10.17580/gzh.2018.06.05.
16. Шулаков Д.Ю. Методика расчета карт плотности выделения сейсмической энергии в условиях пространственно неоднородной сейсмической сети // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы 7-й Междунар. сейсмолог. шк. / ГС РАН [и др.]. – Обнинск, 2012. – С. 360-364.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2023.2.10

## РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙМОСТРАТИГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

А.И. Никифорова

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Рассмотрена связь физических характеристик геологического разреза и особенностей эвапоритонакопления. Выполнен сеймостратиграфический анализ малоглубинных сейсморазведочных исследований. Намечены наиболее проблемные участки с точки зрения безопасности ведения горных работ.

**Ключевые слова:** Верхнекамское месторождение калийных и магниевых солей, малоглубинная сейсморазведка, сейсмофация, высокоамплитудная складка.

Неоднородность физико-геологических условий эвапоритонакопления и разнонаправленный характер постседиментационных изменений обуславливают заметные различия акустических свойств соляной толщи Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС). Отмечается связь физических характеристик геологического разреза с особенностями геологического развития территории. Это проявляется в изменчивости параметров сейсмической записи: амплитудной выразительности и протяженности отражений, частотного состава, рисунка осей синфазности в пакетах отражений. Анализ перечисленных характеристик в качестве индикаторов геологических процессов (тектонических, палеогеоморфологических и т.д.) лежит в основе сеймостратиграфического анализа [1].

При детальном малоглубинном сейсморазведочном исследовании единицей изучения на этапе интерпретации является сейсмическая фация. В данном случае под термином «сейсмофация» понимается генетическая группа отложений, строение которых отображается в наборе параметров сейсмозаписи.

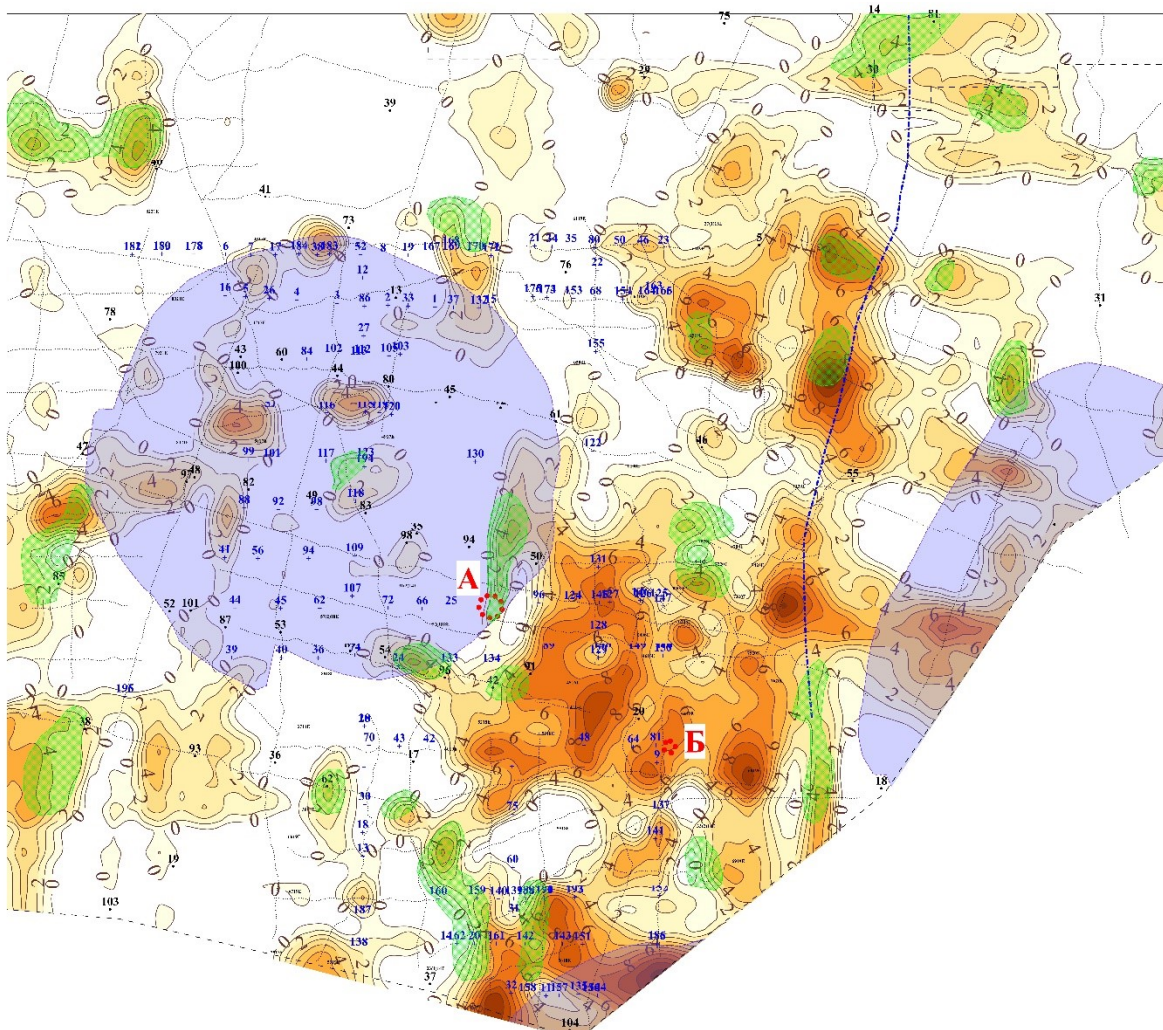
В условиях ВКМКС особый интерес с позиций обеспечения безопасного ведения горных работ представляет прогноз сейсмофаций интенсивных постседиментационных преобразований продуктивной толщи, в том числе высокоамплитудных складок.

Сеймостратиграфическую интерпретацию малоглубинных сейсмических данных можно разделить на два основных этапа. На первом этапе выполняется преобразование априорной геолого-геофизической информации в форму, приемлемую для сопоставления с результатами сейсморазведочных исследований. На втором проводится совместный структурный и сейсмофациальный анализ, результатом которого являются интерпретационные заключения о природе выделенных сейсмофаций и прогноз их распространения.

Данная методика опробована в южной части ВКМКС, где в 2008-22 гг. выполнялись малоглубинные сейсморазведочные исследования. В качестве исходных данных использовались:



- результаты цифровой обработки по профильным линиям (временной разрез, распределение эффективных скоростей во временной области, динамический временной разрез, вычисленный в различных частотных диапазонах, комплексный параметр);
- структурные карты опорных отражающих горизонтов (ОГ), приуроченных к кровле: переходной пачки (ОГ ПП), карналлитового пласта Е (ОГ Ек), сильвинитовой пачки (Сил) и к интервалу маркирующей глины (МГ);
- карты распределения интервальных скоростей в рассматриваемых диапазонах;
- данные бурения солеразведочных и подземных скважин;
- геологические разрезы горных выработок.



2 - изохроны  $\Delta T$  МГ-Сил     - наземные сейсмические профили      - верхнедевонско-турнейские рифовые массивы      - высокоамплитудная складка по пласту КрII  
5    7  
 - солеразведочная скважина     - подземная скважина     - надвиг на поверхности Кр2      - прогнозные участки интенсивной складчатости

Рис. 1. Карта  $\Delta T$  МГ-Сил

Результатами прямых исследований в большей степени охарактеризован интервал МГ-Сил, поэтому он выбран в качестве эталонного. Характер внутрисоляных деформаций этого комплекса определяется в основном характером деформации сильвинитовых пластов, которые в пределах соляных поднятий имеют слож-



носкладчатые условия залегания. Наряду со складками до 1-3 м, охватывающими отдельные пласты, развиты складки амплитудой до 20-30 м, прослеживающиеся по всему разрезу комплекса. Наиболее интенсивная складчатость распространена в сводах поднятий и на площадях, примыкающих с востока и запада к зонам замещения каменной соли. На крыльях поднятий складки более симметричные (преимущественно наклонные) и характеризуются неравномерным распространением [2].

Литологическая и структурная неоднородность породного массива обуславливает дифференциацию скоростей распространения упругих волн, вызывающую различия во временах прохождения через эти отложения. Поэтому для выявления фациальных особенностей рассматриваемой толщи построена карта  $\Delta T$  МГ-Сил, представленная для удобства интерпретации за вычетом региональной составляющей (рис. 1).

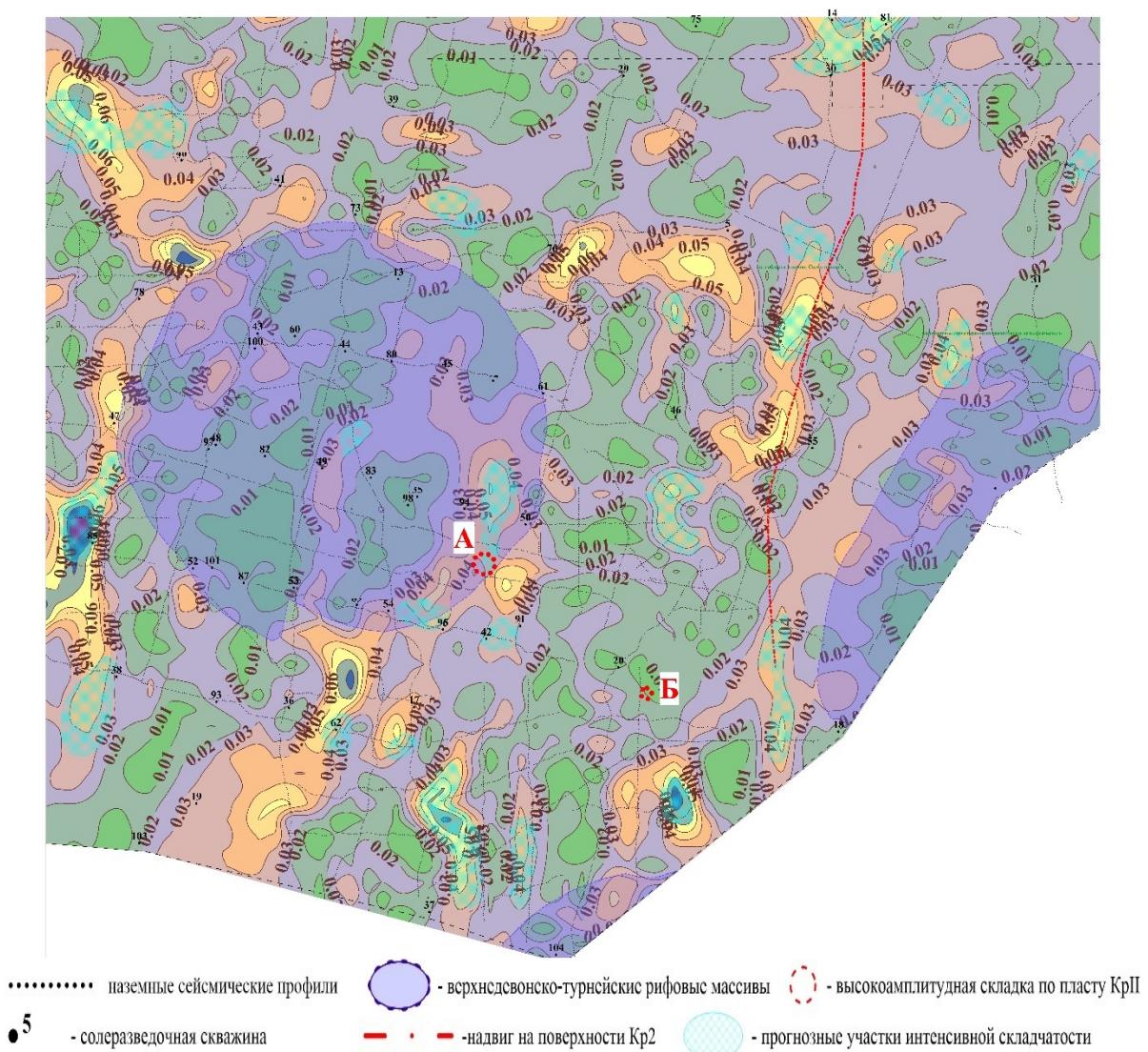


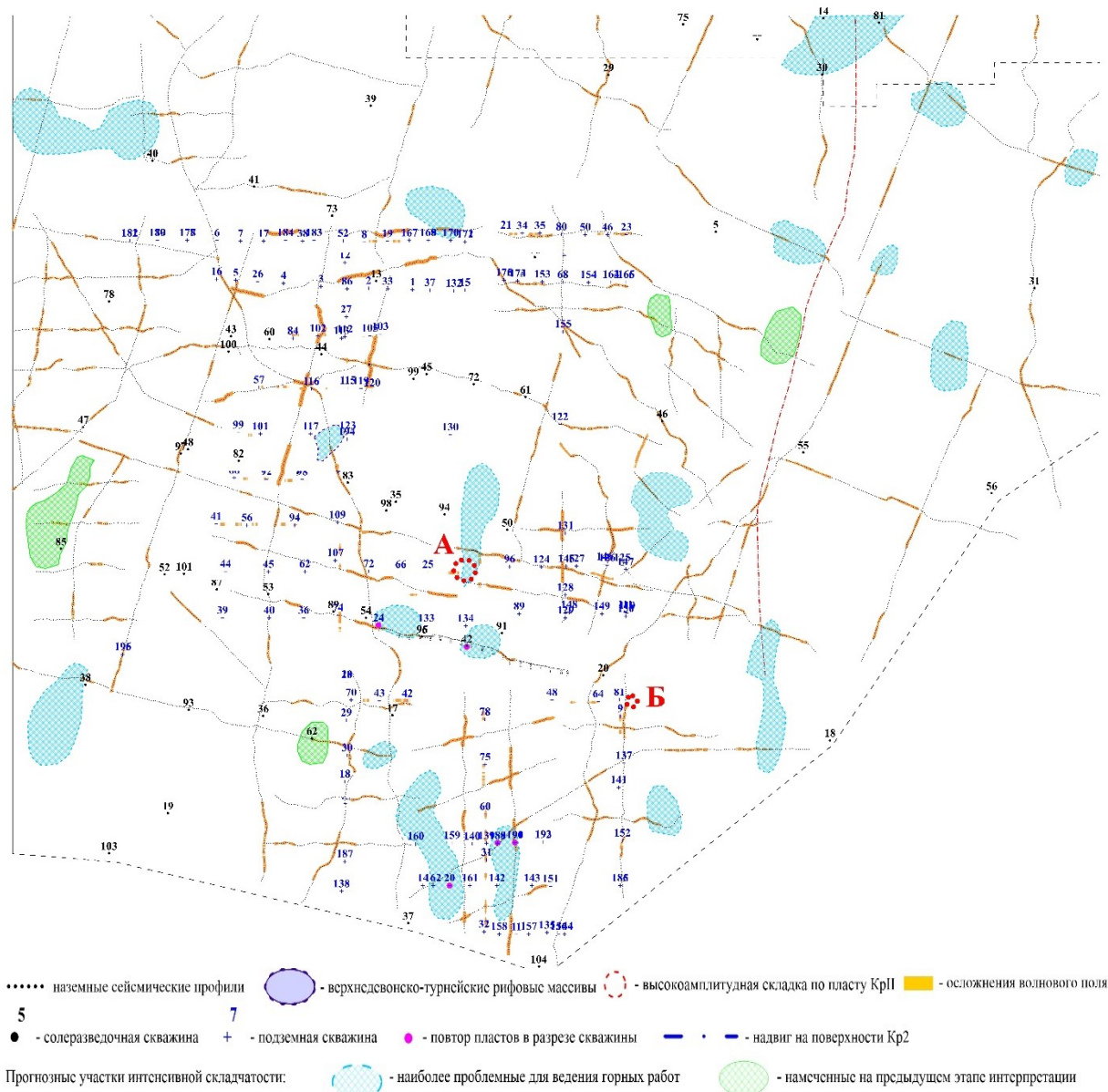
Рис. 2. Карта изменения структурного градиента ОГ Сил

Аномальное увеличение значений  $\Delta T$  МГ-Сил соответствует участкам, отличающимся по физическим свойствам от вмещающего массива пород. Для отбраковки зон, сформировавшихся под влиянием литологического фактора, целесообразно построение карт изменения структурного градиента ОГ кровли и подошвы рассматриваемого ин-

тервала. Поскольку пласты солей верхней части данного комплекса деформированы больше, чем нижней, карта построена для структурной поверхности кровли сильвинитового пласта А (ОГ Сил) (рис. 2).

Области повышенных структурных градиентов приурочены к склоновым частям поднятий соляной толщи, периферии органогенных построек верхнедевонско-турнейского возраста и зоне влияния надвига по поверхности Кр2.

Пространственная корреляция зон повышенных значений  $\Delta T$  МГ-Сил с участками максимальной изменчивости структурного градиента ОГ Сил позволяет наметить зоны интенсивной складчатости в рассматриваемом интервале разреза (рис. 3).



**Рис. 3.** Схема результатов качественной интерпретации данных малоглубинной сейсморазведки

На следующем этапе выполняется ранжирование выделенных зон по степени дислоцированности породного массива на основе интерпретации результатов цифровой обработки по профильным линиям. Исходя из ожидаемой сейсмогеологической модели зоны интенсивной складчатости, можно предположить основные диа-

гностические признаки искомой сейсмофации: локальное нарушение регулярности волнового поля, снижение скоростей распространения упругих волн и частотной составляющей.

Выделенные таким образом участки представляются наиболее проблемными с точки зрения безопасности отработки шахтного поля (рис. 3).

Полученные результаты согласуются с известными особенностями геологического строения. На одном из участков рудника в процессе проходки подготовительных выработок по сильвинитовому пласту КрII вскрыта складка высотой более 30 м (рис. 1 – А), вероятно, сформировавшаяся на месте пересечения двух диагональных (северо-восточной и северо-западной) складчатых систем соляной толщи. Она представляет собой фрагмент крупной складчато-надвиговой структуры. Приуроченные к ней зоны вязких разрывов прослеживаются до кровли покровной каменной соли [3]. Складка Б (рис. 1, рис. 2), закартированная вне зоны, намеченной по результатам сейсмостратиграфической интерпретации данных малоуглубинной сейсморазведки, имеет высоту около 10 м. Она не сопровождается вязкими разрывами слоев, брекчиями, свидетельствующими о распространении дислокаций вверх по разрезу, а имеющиеся структурные признаки отражают внутрипластовый характер течения соляных пород, что не позволяет отнести ее к аномальным особенностям водозащитной толщи.

Поскольку ядра антиклинальных складок, образуемых слоями сильвинитов, дополнительно осложнены мелкой внутрипластовой складчатостью, повторы пластов, установленные при бурении скважин, подтверждают корректность выделения участков интенсивной складчатости.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596030 р\_НОЦ\_Пермский край*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бондарев В.И. Сейсморазведка: учебник для вузов. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2007. – 690 с.
2. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
3. Чайковский И.И., Иванов О.В., Паньков И.Л., Чиркова Е.П. О природе крупной антиклинальной складки на Усольском руднике верхнекамского месторождения солей, ее геомеханической и газовой-геохимической зональности // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2021. – Т.163, кн. 3. – С. 490-499.

УДК 004.42, 550.34.01

DOI:10.7242/echo.2023.2.11

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МАЛОУГЛУБИННОЙ СЕЙМОРАЗВЕДКИ

М.В. Тарантин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Исследовательские работы требуют гибкого обрабатывающего алгоритмического обеспечения. Наиболее крупные этапы процедуры работы с материалами реализованы в программных модулях, каждый из которых со временем подвергается модернизации в соответствии с наиболее результативными алгоритмами. Представлены некоторые современные модули, предназначенные для

решения ряда задач, возникающих в процессе обработки волновых материалов, указаны их основные отличия от прежних версий. Разработанные модули совместимы между собой по способам обработки материалов и форматам внешних файлов.

**Ключевые слова:** малоглубинная сейсморазведка, цифровая обработка, алгоритм.

Обработка и интерпретация сейсмических материалов проводится с применением специализированного программного обеспечения, представленного единым модулем либо некоторым их комплексом. Исследовательские работы, как правило, требуют второго варианта обработки, поскольку позволяют вносить небольшие изменения на отдельных этапах сообразно выбранной методике при сравнительно малых потерях времени. Отделом активной сейсмоакустики Горного института УрО РАН выполняется большой объем исследовательских работ, существенная часть которых предполагает поиск новых методик обработки либо модернизацию существующих. По этой причине для работы с сейсмическими материалами используется комплекс программных средств, большая часть которых создается сотрудниками отдела.

Многообразие источников волновых материалов и некоторые ограничения средств обработки привели к необходимости перевода их из одного формата файлов в другой. Для этого был разработан файл-конвертер, способный манипулировать файлами наиболее часто встречающихся сейсмических форматов. Впоследствии на этот же модуль были возложены некоторые функции анализа и коррекции сигналов, неверно зарегистрированных при полевых работах (рис. 1).

При обработке материалов используется определенный набор разобщенных программных модулей. Ввиду разных форматов внешних данных их комплексное использование крайне затруднено. Для обхода этого затруднения были разработаны преобразователи форматов данных, позволяющие приводить к понятному виду некоторые файлы SPS-PC [1] и Tesserall Engineering [2]. Иногда целесообразнее создать собственный модуль для решения аналогичной задачи, чем пользоваться имеющимся со специфическими входными и выходными данными; при этом имеется возможность приспособить алгоритм для решения чуть более широкого круга задач.

Одной из первых процедур обработки волновых материалов является частотная фильтрация, призванная удалить помехи в некоторых частотных диапазонах. На протяженных профилях или при существенных изменениях внешних условий эти диапазоны могут изменяться вдоль профиля либо со временем (регистрации). Для оперативности обработки программа фильтрации была изменена; для обработки одного профиля используется список фильтров, чье действие ограничено в пространстве и времени (рис. 2). Фильтрация предполагает удаление части мощности сигнала, поэтому предусмотрена процедура восстановления уровня результирующей амплитуды до первоначального. Обработка сигнала возможна как через пространство спектров Фурье, так и путем свертки в пространстве времен.

Наибольшие изменения претерпел модуль просмотра (рис. 3), получив возможность проведения практически любой операции (из предполагаемого графа обработки) над загруженными в данный момент сигналами, начиная от пересортировки трасс «на лету» и заканчивая миграцией. Это делает его не просто визуализатором, а средством исследования, позволяя оперативно подбирать необходимые параметры дальнейшей обработки.

Изменения способа передачи из него параметров при создании скриптов, совместимых с GS Surfer, привели к возможности редактирования полученных изображений. Все компоненты разделены и предполагают изменение некоторых графических свойств.



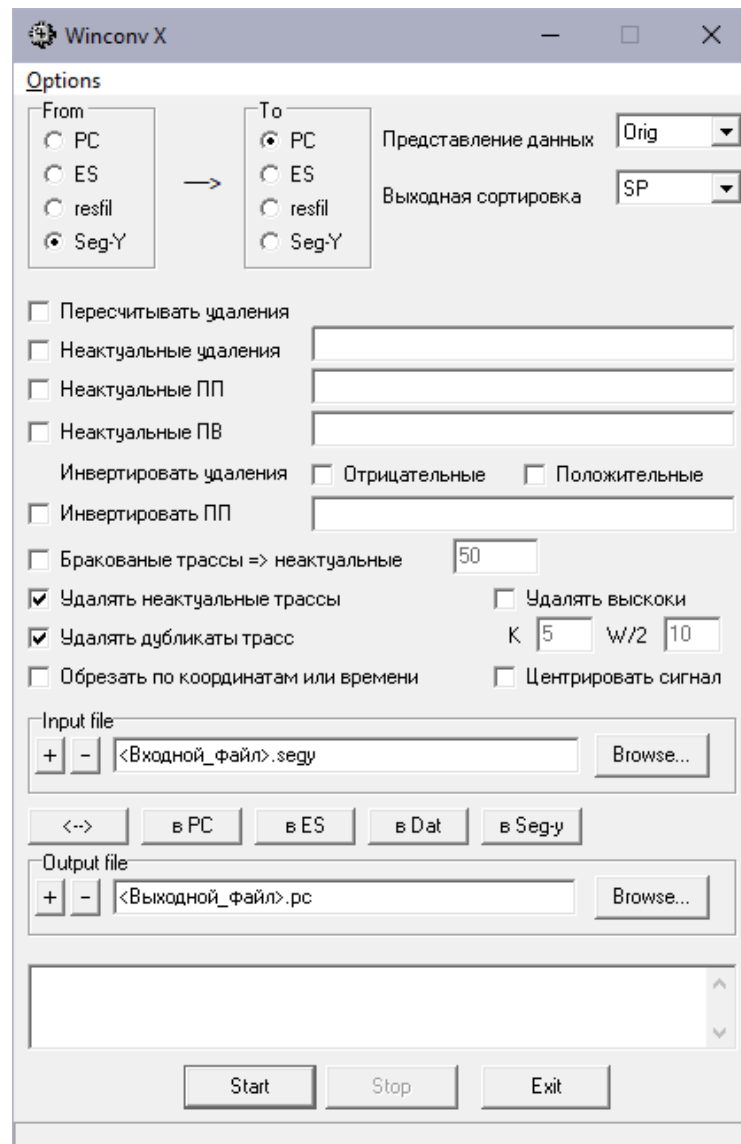


Рис. 1. Внешний вид модуля конвертации

Необходимость поддержки работ с регистрацией многокомпонентных сейсмических сигналов [3] реализовалась в их комплексном отображении и спектральном анализе. Для этих же целей был реализован экспорт свойств отраженных сигналов в пределах одной сейсмограммы.

Комплексирование пакетов программ разных разработчиков выразилось в возможности добавления к волновой картине априорных моделей строения среды в нескольких форматах внешних файлов: STR, HOR, BLN, G, D.

Как видно из рис. 3, анализ отдельной сейсмограммы позволяет вычислить скоростной спектр и вручную определить наиболее подходящий априорный закон для последующего скоростного анализа. Кроме того, можно визуальнo проконтролировать результат.

Манипуляции с сейсмограммами в пределах одного файла (профиля) предполагают единообразие их последующей обработки, поэтому основные корректирующие процедуры образуют список, применяемый к каждой сейсмограмме перед ее визуализацией. В настоящее время в этот список можно внести процедуры выравнивания уровня нуля сигнала и очистки от единичных выбросов, автоматического или простого усиления амплитуд, инверсии, частотной фильтрации и деконволюции. Порядок применения процедур имеет значение, поскольку не все из них коммутативны.

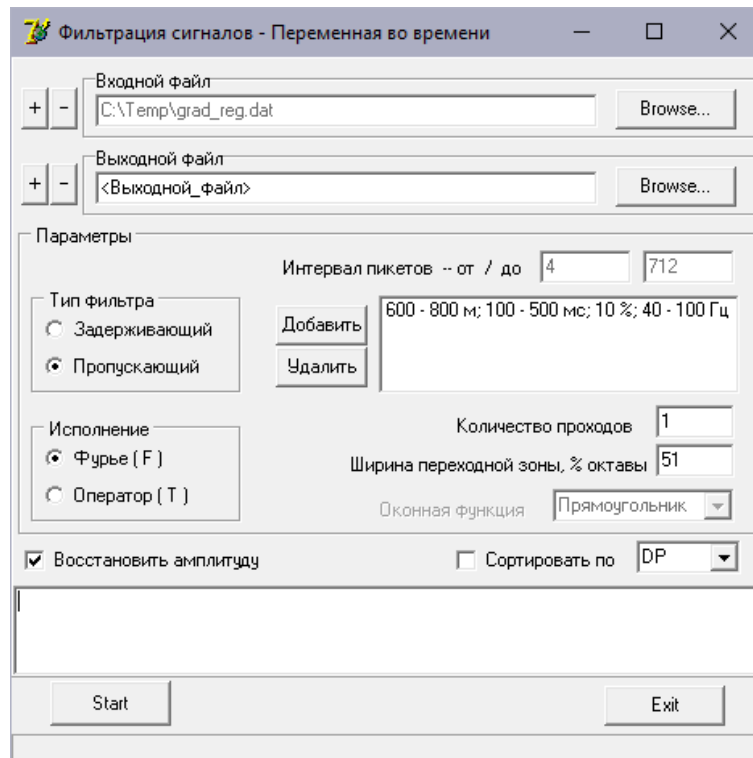


Рис. 2. Внешний вид модуля фильтрации. Можно видеть все параметры фильтра

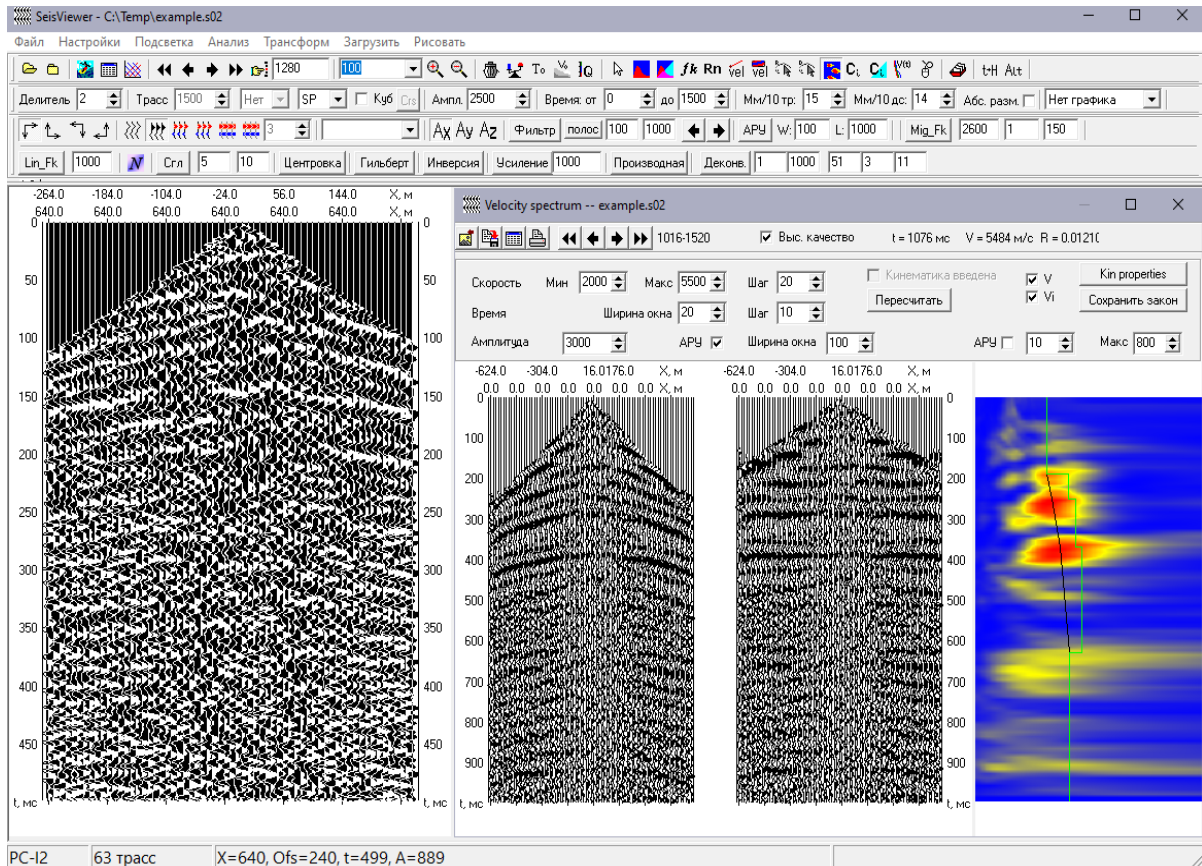


Рис. 3. Внешний вид модуля просмотра в режиме анализа скоростных спектров. Показана сейсмограмма до и после введения кинематических поправок на основании выбранного скоростного закона (правая панель)



Модуль ScanVel (рис. 4) скоростного анализа получил возможность работать не только с различными типами волновых материалов, но и разными исходными скоростными данными. Кроме поддержки «файла-паспорта» появилась возможность загрузки выходных данных этого же модуля, табличных файлов, ручного задания скоростных законов. Сам модуль в настоящее время пригоден для обработки данных 3D-сейсморазведки, а алгоритм получил несколько вариаций [4, 5, 6] как способа получения анализируемых данных, так и метода обработки непосредственных (промежуточных) результатов, что в конечном итоге призвано повысить достоверность получаемых зависимостей.

Сообразно общим представлениям о модели исследуемой среды как горизонтально-слоистой, значимые отражения волн и соответствующие скорости ожидаются лишь в некоторые моменты времени регистрации сигнала. На основании таких представлений дальнейшее преобразование получаемых данных в требуемую непрерывную кривую носит аппроксимационный характер и может включать фильтрацию. Кроме собственно скоростных зависимостей, результатом работы алгоритма являются коэффициенты корреляции волновых форм, определяющие с одной стороны качество исходного материала, с другой – надежность вычислений. Они могут быть использованы при статистическом анализе скоростей.

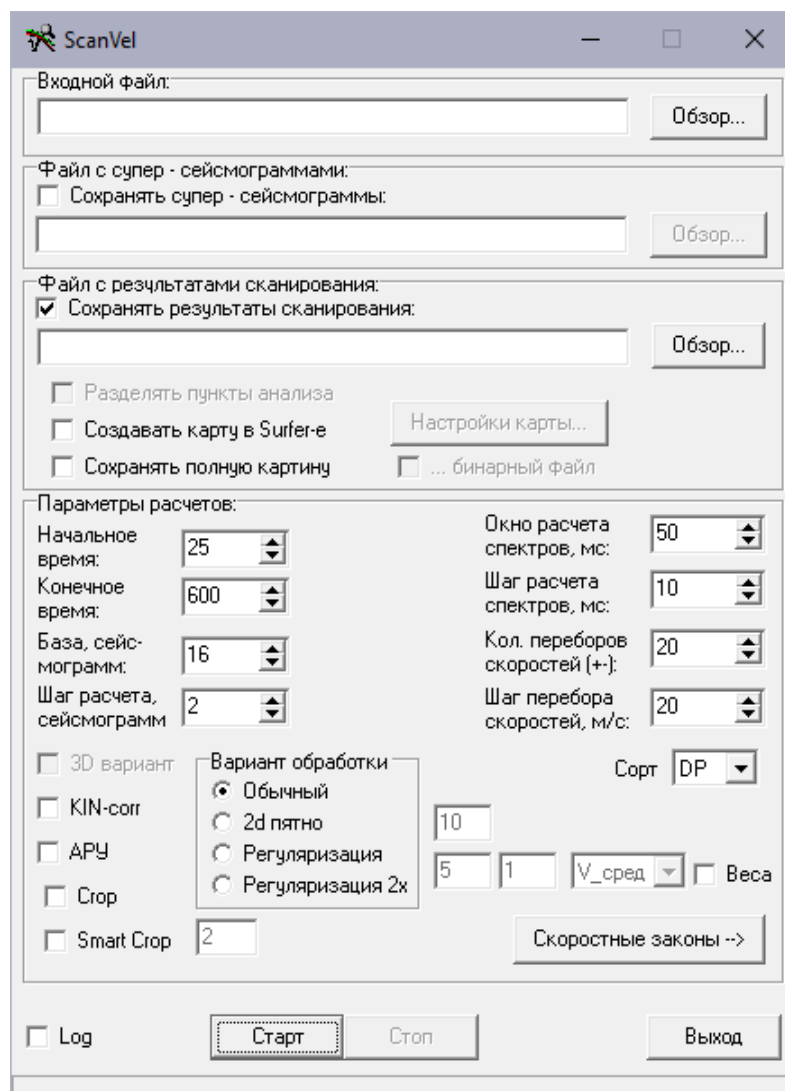


Рис. 4. Внешний вид модуля скоростного анализа

На базе этого модуля разработан алгоритм построения суммарного временного разреза без учета априорной скоростной информации [7], который может быть использован, например, для оперативного контроля полевых работ (рис. 5).

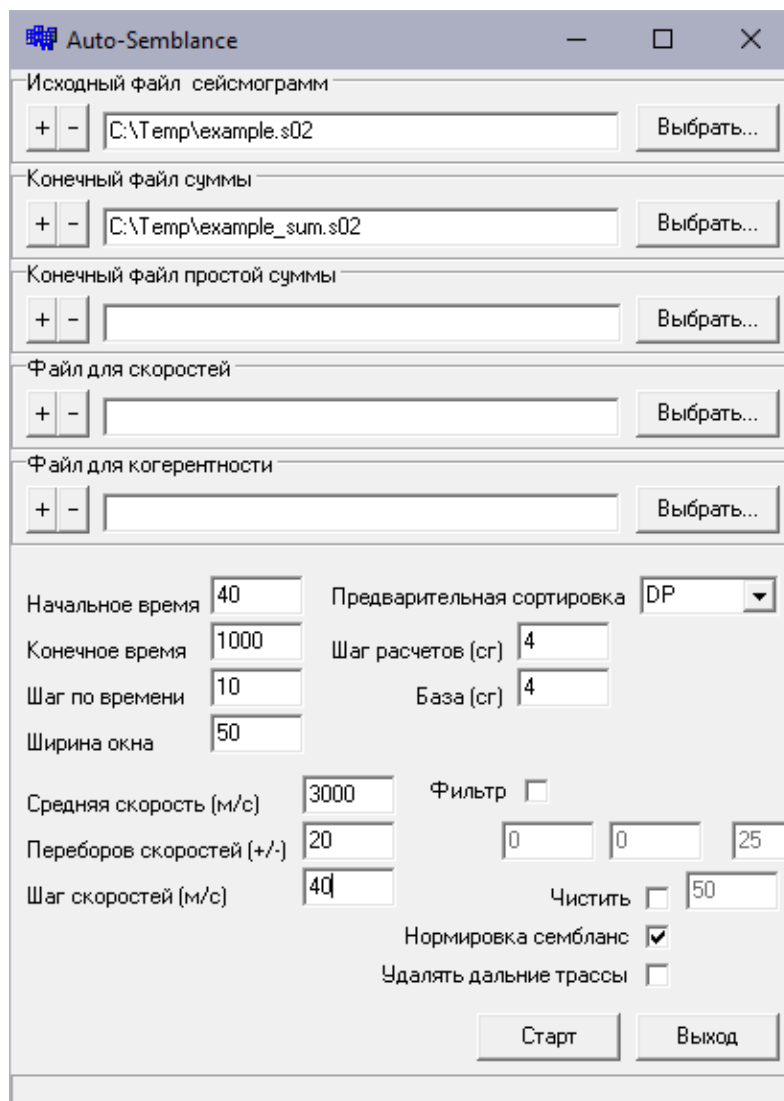


Рис. 5. Внешний вид модуля построения априорного суммарного разреза

Интерпретационный модуль Akin также подвергся изменениям. Кроме приведения его в соответствие с предыдущим модулем, изменены возможности построения моделей отражающих границ в пределах профиля – предусмотрена возможность окончания границы. Такое наблюдается при выклинивании слоя либо при наличии интервала деструкции волновой картины большого глубинного (и временного) простирания. Ранее «обрыв» границы приводил к невозможности вычисления скоростей упругих волн. Внесенные изменения напрямую позволяют вычислять скорости между любыми двумя границами без учета их соседства в модели. Для удобства интерпретатора добавлены некоторые сервисные функции: отображение априорной модели на волновом разрезе, просмотр всех использованных файлов проекта и отмена последней операции.

Кроме наземной и шахтной сейсморазведки, когда профили исследования располагаются преимущественно в горизонтальном направлении, следует упомянуть скважинную сейсморазведку. Для обработки данных межскважинного просвечива-

ния с целью поиска и картирования отражающих границ разработан отдельный модуль, реализующий лучевую миграцию [8]. В качестве исходных данных он принимает волновые данные, источник и приемник которых находятся в скважинах, и скоростную модель межскважинной среды. Модель среды представляется набором равновеликих прямоугольников, в которых и происходит распространение волн. В определенный момент имеет место отражение сигнала, конверсии типа волн в текущем варианте не предусмотрено. Преодоление границ происходит с учетом законов геометрической сейсмологии. Результатом работы алгоритма является волновая картина отражений от акустических границ, изображенная в масштабах глубин (и длин). Такой результат может служить промежуточным шагом в построении скоростной модели среды и повышает детальность расчленения геологического разреза.

В случае долговременной стабильной скважинной системы наблюдений возможно построение интерферометрического алгоритма обработки. Источником сигналов при этом могут быть как специальные источники, так и источники природно-техногенного характера, имеющие место независимо от проведения регистрации сигналов.

Таким образом развивается используемый комплекс программ, позволяющий решать определенные задачи обработки и интерпретации сейсмических данных, увеличивая полноту и достоверность получаемых заключений.

В заключение автор выражает благодарность сотрудникам отдела активной сейсмоакустики, принявшим участие в тестировании и отладке программ и алгоритмов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596030 р\_НОЦ\_Пермский\_край.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. SPS-PC. Программный комплекс. – Текст электронный. – URL: <https://geo-cloud.ru/sps-pc-ru.html>. (дата обращения: 12. 04. 2023)
2. Программа моделирования сейсмических данных Tesserat Engineering. – Текст электронный. – <http://www.tesserat-geo.com/index.ru.php>. (дата обращения 12.04.2023).
3. Бабкин А.И. Изучение закономерностей формирования и распространения объемных сейсмических волн в породном массиве по данным трехкомпонентной записи в горных выработках // Горное эхо. – 2020. – № 4 (81). – С. 57-63. – DOI: 10.7242/echo.2020.4.12.
4. Тарантин М.В. Совершенствование алгоритма учета скоростных неоднородностей при цифровой обработке данных малоглубинной сейсморазведки // Горное эхо. – 2019. – № 3 (76). – С. 49-52. DOI: 10.7242/echo.2019.3.14.
5. 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.
6. Герасимова И.Ю. Применение данных метода первых волн для уточнения скоростного закона в верхнем интервале малых глубин // Горное эхо. – 2023. – № 1 (90). – С. 72-76. – DOI: 10.7242/echo.2023.1.10.
7. Тарантин М.В., Голячук Н.А. Квантовомеханический подход к построению временных разрезов при малоглубинных сейсмических исследованиях // Инженерная геофизика 2020: Материалы 16-й науч.-практ. конф. и выставки, сентябрь 2020. – Пермь, 2020. – С. 1-7. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051030.
8. Чугаев А.В., Санфиоров И.А., Тарантин М.В. Сейсморазведка на отраженных волнах при межскважинных исследованиях на Верхнекамском месторождении калийных солей // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 293-307. – DOI:10.15372/GiG2022119.

## АТТРИБУТИВНЫЙ АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ДАННЫХ

К.Б. Фатькин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Сейсморазведка на малых глубинах (до 100 м) характеризуется наличием интенсивных волн-помех в целевом интервале на полученных сейсмограммах. Это накладывает дополнительные трудности при обработке материала, особенно если требуется сохранить истинные амплитуды зарегистрированного сигнала для дальнейшего атрибутивного анализа. В работе показан опыт использования методики анализа изменения удалений отраженной волны с удалением источник-приемник в комплексе обработки и интерпретации инженерных сейсморазведочных данных.

**Ключевые слова:** атрибутивный анализ, инженерная сейсморазведка, зоны трещиноватости и разуплотнения, дистанционный прогноз, флюидонасыщение, динамический анализ, отраженные волны.

Конечной целью цифровой обработки сейсморазведочных данных обычно является построение временных разрезов для структурной интерпретации с соответствующим стратиграфическим разрешением, а не анализ амплитудных изменений с удалением от источника возбуждения (AVO). Поэтому конечные сейсмограммы обычно имеют автоматическую регулировку усиления (APU). Однако с развитием стратиграфической интерпретации появилось осознание того, что полная информация о сейсмических временных разрезах важна, а стало быть, нужно сохранять относительные амплитуды во время обработки [2]. Эта информация также помогает обнаружить яркие пятна (аномальные отражатели соответствующие газонасыщенным породам) и плоские пятна (аномальные субгоризонтальные отражатели, связанные с контактами жидкости, обычно газа-вода) на исследуемых участках. Поэтому геофизики упорно пытаются извлечь дополнительную информацию из сейсмических амплитуд в процессе как предварительной, так и последующей обработки. Наряду с AVO-анализом существует множество сейсмических атрибутов, которые повышают ценность интерпретации таких данных [5].

Обработка и интерпретация данных инженерной сейсморазведки осложняется присутствием на сейсмограммах интенсивных волн-помех, присущих верхней части разреза. Характеристики профильной линии рассчитаны на регистрацию отражений от неглубоких горизонтов (рис. 1). Соответственно, оси синфазности отраженных волн, наиболее ярко выраженных на временных разрезах ОГТ, полученных в рамках инженерных изысканий, относятся к подошве четвертичных образований (Q), кровле терригенно-карбонатной толщи (ТКТ1), кровлям пластов известняков (Из1) и мергелей (ТКТ2) в толще ТКТ.

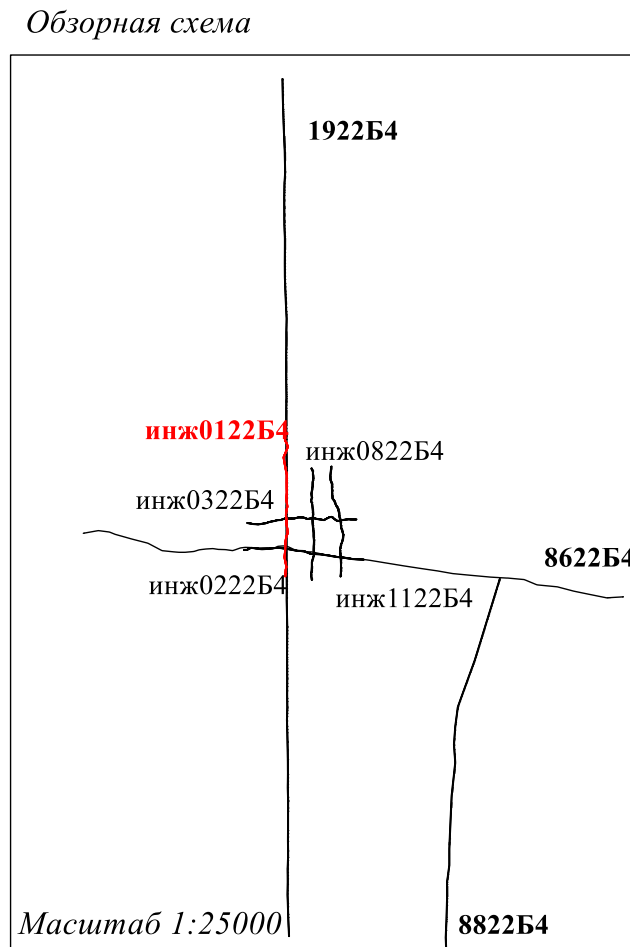
Процедура интерпретации инженерных сейсморазведочных данных традиционно включает: детальное рассмотрение качественных и количественных параметров волнового поля по линиям профилей; анализ площадного распределения структурно-физических параметров исследуемого интервала глубин.

Основными признаками предполагаемых осложнений геологического разреза обычно являются нарушение корреляции отражающих горизонтов, снижение значений эффективных и повышенное затухание сейсмической записи.

Анализ динамических характеристик отраженных волн сравнительно широко применяется в практике интерпретации сейсмических данных, особенно в условиях сложного строения геологического разреза. В нашей практике накоплен некоторый

опыт по изучению изменения амплитуды отраженных сейсмических волн с удалением от их источника при малоглубинных сейсморазведочных исследованиях [4]. В качестве исследуемого материала взяты данные сейсморазведочного мониторинга на потенциально-опасных участках нескольких рудников на территории ВКМКС. Рассчитаны и построены разрезы динамических атрибутов  $A$  (*AVO intercept*) и  $B$  (*AVO gradient*) (рис. 2б, в).

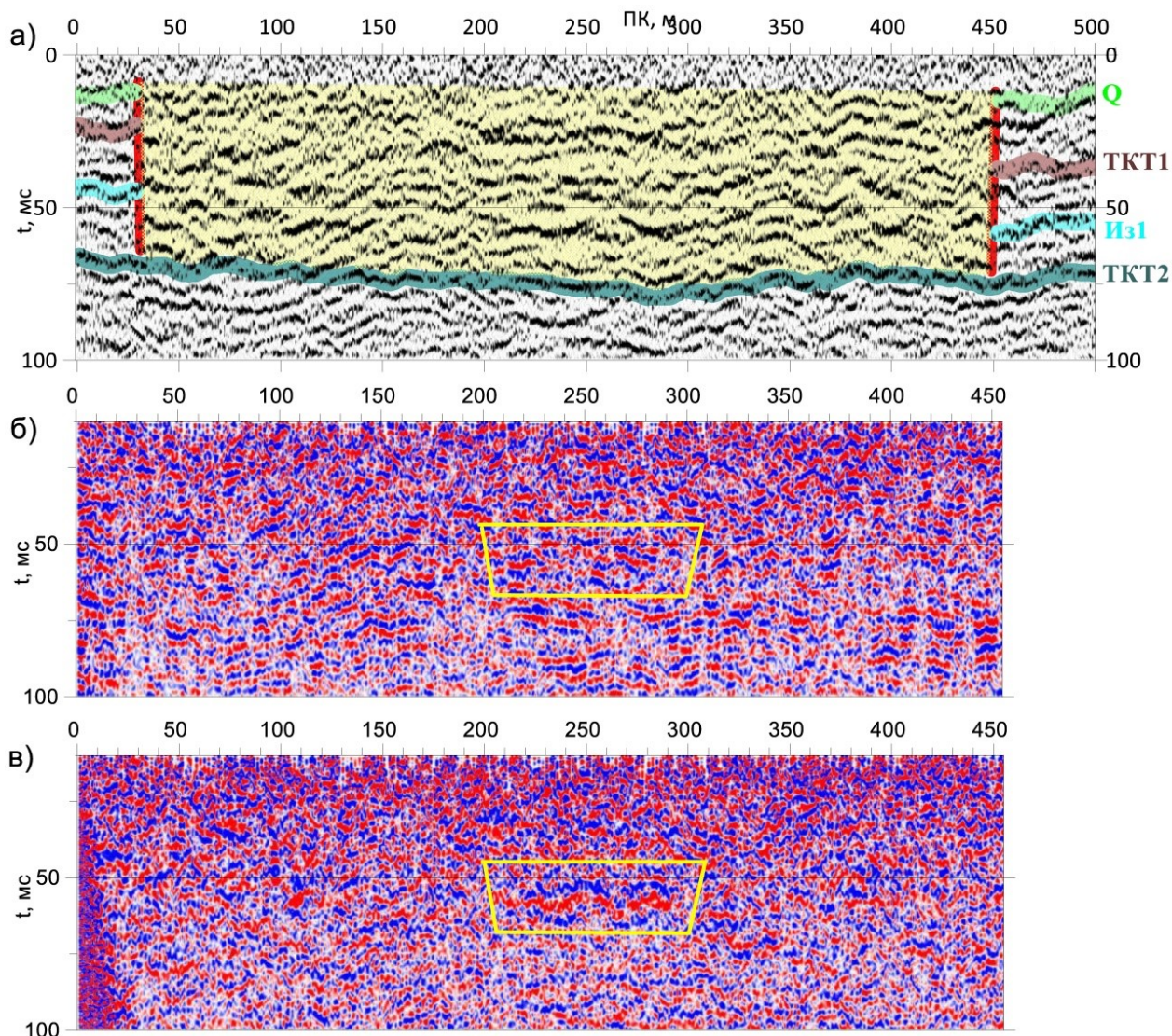
Сейсморазведочные исследования верхней части разреза сосредоточены в пределах наиболее выразительной зоны с участками осложнений волнового поля в интервале ВЗТ.



**Рис. 1.** Обзорная схема района работ

На основании негативных изменений параметров сейсмического волнового поля на профильных линиях для терригенно-карбонатной толщи выделен ряд участков. Эти участки, исходя из распределения структурно-физических параметров пластов ТКТ, разделяются на две зоны. В пределах первой зоны отмечается устойчивое снижение значений скоростей распространения упругих волн в интервале терригенно-карбонатной толщи. Данная низкоскоростная зона коррелируется пространственно с прогибом северо-западного простирания, также выраженным в отложениях ТКТ. Вторая зона приурочена к области градиентов как упругих свойств пластов ТКТ, так и их структурных отметок. Первая зона представлена в основном рыхлыми и разуплотненными отложениями, аккумулярованными в прогибе. Вторая зона, вероятней всего, связана с участками повышенной трещиноватости в карбонатных отложениях ТКТ.





**Рис. 2.** Сейсморазведочные исследования верхней части разреза:  
 а) временной разрез по профилю с выделенной аномалией волнового поля;  
 б) разрез атрибута А

В качестве примера рассмотрим инженерные исследования по профилю № инж0122, которые были проведены впервые в 2015 г. На текущем этапе линия инженерного профиля совпадает с линией, отработанной на предыдущем этапе исследований. Здесь выделяется низкоскоростная область в интервале ПК 150-400, в интервале глубин, соответствующих ТКТ (рис. 2а). По результатам обработки и интерпретации сейсморазведочных данных 2022 г. изменений относительно предыдущего этапа не выявлено. Участок с осложнениями волнового поля остался в тех же границах. На полученных разрезах *атрибутов А и В* выделяется зона, которую поведение градиента (А) и интерцепта (В) характеризует как газонаполненную трещиноватую область (ПК200-310 в интервале ТКТ1-Из1) (рис. 2б, в)

По результатам сейсморазведочных исследований выданы рекомендации на бурение инженерно-геологической скважины [1]. На основании анализа поверхностных условий бурение проведено для центральной части восточной зоны осложнений волнового поля. Результаты бурения полностью подтверждают предположение о наличии здесь существенно ослабленных карбонатных пород ТКТ.



Обработка сейсмических данных должна быть произведена таким образом, чтобы в полной мере использовать преимущества метода AVO. В этом случае, любое заметное изменение амплитуды в волновом поле будет являться исключительно результатом отражающих изменений, а не результатом погрешности обработки. Конечная цель обработки для AVO тогда состоит в том, чтобы отобразить сейсмограммы с изменением «истинной амплитуды» со смещением. Основное различие между традиционной обработкой и обработкой AVO заключается в том, что, помимо необходимости получения информации истинной амплитуды, при «обработке AVO» может быть обеспечено значительное повышение отношения сигнал/помеха.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ  
(рег. номер проекта 122012000401-7).*

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Геомеханическое заключение и прогноз состояния водозащитной толщи на основе комплексных геофизических исследований и инструментальных наблюдений на потенциально-опасном участке в районе скважины № 492 БКПРУ-4: Отчет о НИР. – Пермь, 2022. – (Фонды ГИ УрО РАН).
2. SCS-PC / под ред. Голярчук Н.А. Система обработки. – Норильск, 2014-2019.
3. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых: (Петрофизика). Справ. геофизика / под ред. Н.Б. Дортман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, – 1984. – 455 с.: ил.
4. Фатькин. К.Б. Локализация и идентификация физико-геологических неоднородностей соляной толщи методами сейсмического амплитудного анализа (на примере ВКМКС): автореф. дис. ... канд. техн. наук. 25.00.16: защищена 20.11.08 / Фатькин Константин Борисович. – Пермь, 2008. – 22 с.
5. Chopra S., Marfurt K.J. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. 2007.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2023.2.13

### **МОНИТОРИНГ ПОРОДНОГО МАССИВА В ПРЕДЕЛАХ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ г. БЕРЕЗНИКИ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ**

Л.А. Христенко

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** С целью локализации зон негативной техногенной изменчивости породного массива в пределах г. Березники были выполнены мониторинговые электрометрические исследования, включающие современную технологию изучения электросопротивления геологической среды – электрическую томографию. Полученные разрезы удельного электрического сопротивления позволили обнаружить ослабленные зоны, связанные с фильтрацией воды. Наблюдения в режиме мониторинга и использование относительного параметра  $\Delta\rho$ , отражающего изменения удельного сопротивления геологической среды за определенный период, позволили проследить динамику изменения со временем и выявить наиболее критические участки, требующие дальнейших наблюдений.

**Ключевые слова:** мониторинг, естественное поле, электротомография, удельное электрическое сопротивление, относительный параметр.

В местах усиленной фильтрации грунт имеет повышенную влажность, что отражается на его физических свойствах. В геофизике наиболее чувствительными к влажности пород являются электрометрические методы. Обычно исследования проводят методами электропрофилирования, естественного поля, электрических зондирований на постоянном и переменном токе, в том числе электротомографией (ЭТ).

Метод ЕП чувствителен непосредственно к движению грунтовых вод [2, 3]. Поток грунтовых вод, просачиваясь через пористую среду, создает электрическое поле на земной поверхности. ЕП практически единственный геофизический метод, который фиксирует аномальное поле, являющееся следствием потока или фильтрации грунтовых вод.

На разрезах кажущихся ( $\rho_k$ ) и удельных электрических сопротивлений (УЭС) определяются места пониженных сопротивлений грунта, связанные с обводненностью за счет фильтрации грунтовых вод или инфильтрации атмосферных осадков.

Особенностью электротомографии является многократное использование в качестве питающих и измерительных одних и тех же расстановок электродов, что приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности измерений, число которых обычно достигает первых тысяч. Методика электрической томографии позволяет в автоматическом режиме проводить разноглубинные измерения электрического сопротивления среды на постоянном токе.

Более достоверные данные о состоянии среды могут быть получены мониторинговыми исследованиями, проводимыми, в отличие от разовых измерений, с заданной частотой опроса (через интервалы времени). Система мониторинга включает в себя сбор с заданной частотой опроса и обработку экспериментальных данных [1, 4, 6].

Выщелачивание солей в пределах Верхнекамского месторождения существенно увеличивает скорость и объемы негативных процессов и, как следствие, ведет к образованию катастрофических последствий. С целью локализации и оценки потенциальной опасности зон негативной техногенной изменчивости породного массива, влияющей на устойчивость и состояние городской застройки, в пределах г. Березники, были выполнены комплексные геолого-геофизические мониторинговые исследования, включающие электрометрию. Наблюдения в режиме мониторинга позволяют отслеживать динамику изменения исследуемых параметров со временем, выявлять наиболее критические участки, требующие детальных исследований. Электрометрические наблюдения выполнялись методами естественного электрического поля (ЕП), электропрофилирования (ЭП) в модификации срединного градиента (СГ) и электротомографии. Результаты представлены для профиля, проходящего южнее эпицентра скоростей оседания земной поверхности, выявленного площадным мониторингом в пределах подработанной территории. По результатам опробования верхней части надсолевого разреза (отложения теригенно-карбонатной толщи) исследуемый участок приурочен к аномальной зоне. В скважинах зафиксированы зеркала скольжения, обусловленные субвертикальными разрывными нарушениями. Ослабленные зоны, фиксируемые по керну и кавернометрии, отмечаются в верхней части ТКТ на глубине 10.0-35.0 метров и в ее нижней части в интервале 50.0-70.0 метров. Мощность зоны аэрации составляет от 13 до 27 м.

Наблюдения методом ЕП выполнялись цифровым мультиметром APPA-107N с шагом 10 м способом градиентов потенциала с измерительной линией MN=10 м. По результатам ежемесячных измерений (с мая по октябрь месяц 2022 года) были построены графики изменения потенциала естественного поля  $U_{EP}$  (рис. 1) и выполнен их качественный анализ.

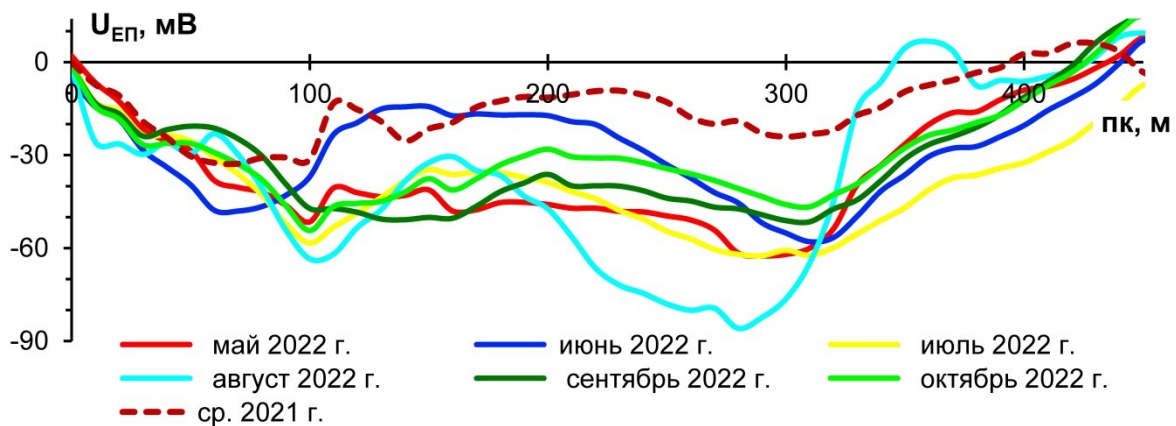


Рис. 1. Графики значений потенциала естественного поля

При выполнении ЭП-СГ использовалась аппаратура АМС-1, разности питающей линии АВ составляли 360 м. Измерения проводились приемной линией MN = 10 м с шагом 10 м в средней трети АВ (140 м) и позволили на качественном уровне получить первое представление об изучаемом объекте для выделения особенностей изменений в геологической среде. Для исключения высокочастотной составляющей, отражающей влияние близповерхностных неоднородностей, графики значений  $\rho_k$ , полученные в разные периоды наблюдений, осреднялись в скользящем окне по 3 точкам. Это позволило более четко выявить характерные особенности изменения кажущегося сопротивления (рис. 2). Интервалы пониженных значений (менее 20 Ом·м) на графике, построенном по осредненным за все периоды 2021 года значениям  $\rho_k$ , выделены между пикетами (ПК) 190-280, 330-430. Графики  $\rho_k$ , полученные по наблюдениям в 2022 году, хорошо согласуются с ним – интервалы пониженных значений  $\rho_k$  сохраняют свое положение.

Наблюдения ЭТ на исследуемом профиле были выполнены с использованием многоэлектродной 15-ти канальной электроразведочной аппаратуры «Скала 64К15». Измерения проводились комбинацией установок вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и дипольного осевого зондирования (ДОЗ). Минимальное расстояние между электродами составляло 3,5 метра. Обработка данных выполнена в программе «ZONDRES2D» предназначенной для 2.5-мерной интерпретации профильных данных электротомографии. По измеренным значениям были вычислены удельные электрические сопротивления и построены разрезы (рис. 3), которые позволяют проследить области пониженных электрических сопротивлений, отождествляемые с повышенной влажностью грунтов, на глубину.

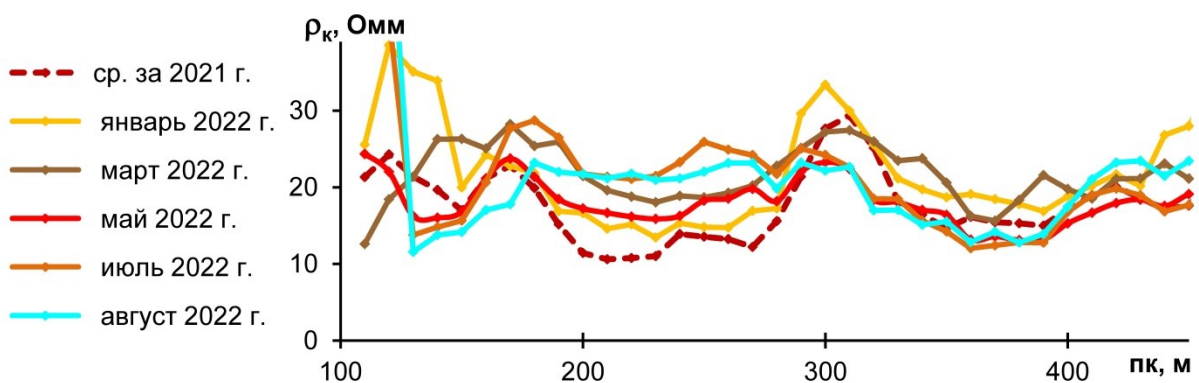


Рис. 2. Графики значений кажущегося сопротивления

Разрезы удельных сопротивлений, полученные по измерениям осенью 2021 года и по 4 этапам наблюдений в 2022 году, хорошо согласуются между собой. На всех разрезах выделяется протяженная область пониженного УЭС (5-15 Ом·м), вероятно, отвечающая водоносному горизонту в нижней части терригенно-карбонатной толщи (ТКТ) на глубине 50.0-70.0 м (рис. 3а). Выше по разрезу (глубина около 20 м) в интервалах между ПК 60-80, 140-160 и 310-330 прослеживаются локальные аномалии УЭС (около 20-40 Ом·м), вероятно, отражающие водонасыщенные субвертикальные трещины и зоны интенсивного дробления глинистых известняков, слагающих ТКТ.

В июне 2022 года (рис. 3б) было отмечено осложнение аномалии между ПК 310-330 с запада до ПК 280 (на 30 м) и смещение ее верхней кромки до поверхности наблюдений. На графике  $U_{\text{ЕП}}$  в интервалах 60-80 и 280-330 м отмечаются локальные понижения значений потенциала почти до -50 мВ, вероятно, отражающие фильтрацию по трещинам (рис. 1). В мае прослеживалось более плавное изменение потенциала, предположительно связанное с субгоризонтальным направлением фильтрации без ярко выраженных неоднородных участков. Поля, обусловленные фильтрационными процессами, обычно обладают амплитудой до 30 мВ. В данном случае, вероятнее всего, кроме фильтрационного потенциала, аномалии обусловлены диффузионно-адсорбционными процессами, проявляющимися в надсолевой и соляной толщах.

В сентябре на разрезе отмечалась лишь аномалия пониженных УЭС (около 20-40 Ом·м) между ПК 310-330 (рис. 3в). На графике  $U_{\text{ЕП}}$ , как в мае, отмечалась протяженная аномалия (ПК 40-400) отрицательного знака интенсивностью до -50 мВ, связанная с фильтрационным потоком (рис. 1).

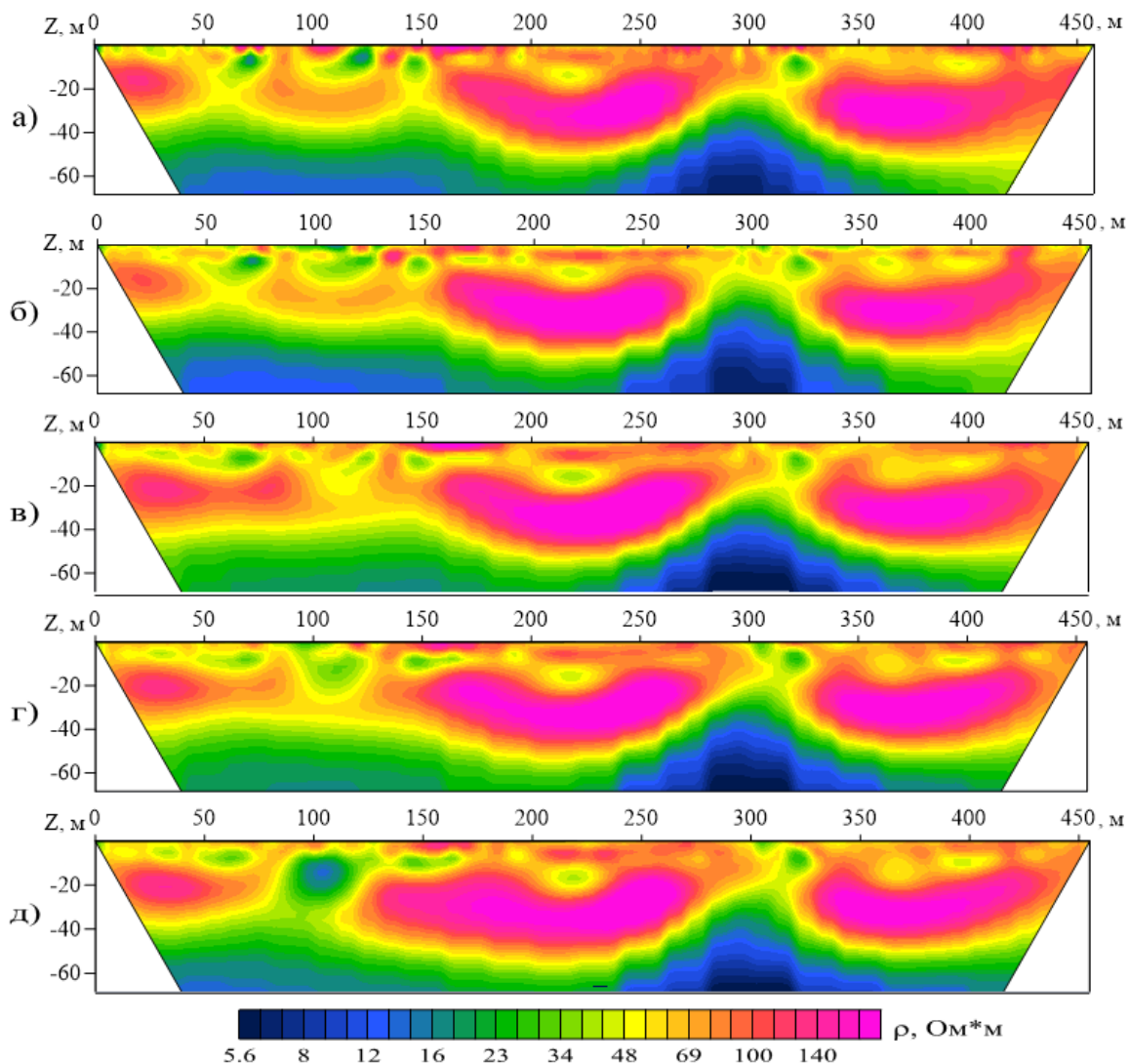
В октябре (рис. 3г) отмечалась близповерхностная локальная аномалия пониженного удельного сопротивления (около 20-40 Ом·м) между ПК 90-130. Аномалия между ПК 310-330 прослеживалась до поверхности наблюдений. На графике  $U_{\text{ЕП}}$  протяженная аномалия (ПК 40-400) отрицательного знака амплитудой около 30 мВ осложнена локальными понижениями до -50 мВ, пространственно отвечающими аномалиям пониженного УЭС между ПК 90-130 и 310-330. Такое сочетание признаков может быть вызвано вертикальными перетоками по ослабленным трещиноватым зонам.

В ноябре аномалия между ПК 310-330 сохраняла свое положение. Отмечалось увеличение аномалии между ПК 90-130 до области пониженных УЭС, отвечающей водоносному горизонту в нижней части ТКТ (рис. 3д).

Для более четкого выделения скрытых закономерностей изменения УЭС был использован относительным параметром  $\Delta\rho$ , который отражает изменения удельного сопротивления геологической среды за определенный период:  $\Delta\rho = ((\rho_2 - \rho_1) / \rho_2) \cdot 100 \% [6]$ .

На разрезе  $\Delta\rho$  за период с сентября 2021 г. по июнь 2022 г. (рис. 4а) отрицательные значения отмечаются ближе к поверхности (1-3 м) и указывают на проницаемые участки грунта. Это четвертичные отложения, представленные в основном насыпным грунтом до глубины 1.4 м, ниже – песком и суглинком. В интервалах 260-300 и 350-370 м до глубины 15-20 м локальные отрицательные аномалии указывают на усиление фильтрации воды и повышение степени увлажнения выветрелого, сильно трещиноватого глинистого известняка, слагающего верхнюю часть ТКТ. Усиление фильтрации в июне подтверждается наблюдениями естественного поля (рис. 1).

На разрезе  $\Delta\rho$  за период с июня 2022 г. по сентябрь 2022 г. (рис. 4б) локальные отрицательные аномалии отмечаются в интервале 200-230 м на глубине около 20 м.



**Рис. 3.** Разрезы удельного электрического сопротивления по данным электротомографии: сентябрь 2021 г (а); июнь 2022 г (б); сентябрь 2022 г (в); октябрь 2022 г (г); ноябрь 2022 г (д)

На разрезе  $\Delta\rho$  (рис. 4в) за период с сентября 2022 г. по октябрь 2022 г. локальные отрицательные аномалии отмечаются: ближе к поверхности, в интервалах 80-180 и 200-350 м; от поверхности до глубины 20 м в интервале 80-120 м; на глубине около 40 м в интервалах 230-270 и 370-440 м.

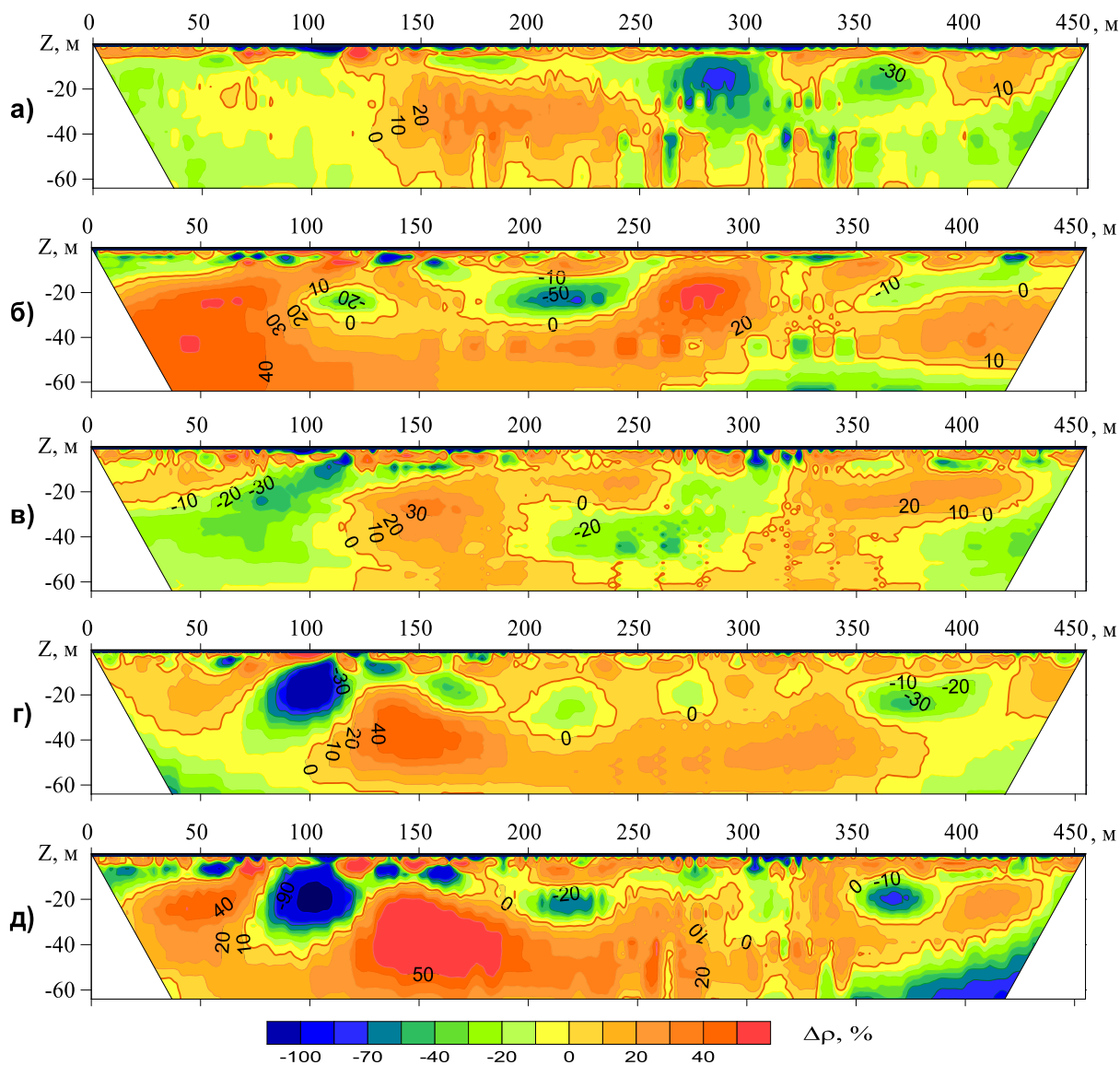
На разрезе  $\Delta\rho$  (рис. 4г) за период с октября 2022 г. по ноябрь 2022 г. локальные отрицательные аномалии отмечаются: от поверхности до глубины 40 м в интервале 80-120; на глубине от 10 до 30 м прерывистой цепочкой в интервалах 120-190, 200-240, 260-280 и 350-390 м.

На разрезе (рис. 4д)  $\Delta\rho$  за период с сентября 2021 г. по ноябрь 2022 года цепочкой контрастных локальных отрицательных аномалий прорисовалась динамика снижения сопротивления среды на уровне верхней-средней части ТКТ<sub>в+с.ч.</sub>, к которой приурочен водоносный горизонт (10-30 м). На разрезах относительного параметра  $\Delta\rho$  (рис. 4а, в, г) отражается динамика снижения сопротивления по вертикали в интервалах 70-120, 270-320 и 400-450.

Достоверность интерпретации можно повысить расширением анализируемого признакового пространства за счет формальных признаков, например, статистических характеристик самих наблюдаемых параметров. Имеется опыт их использования при ин-

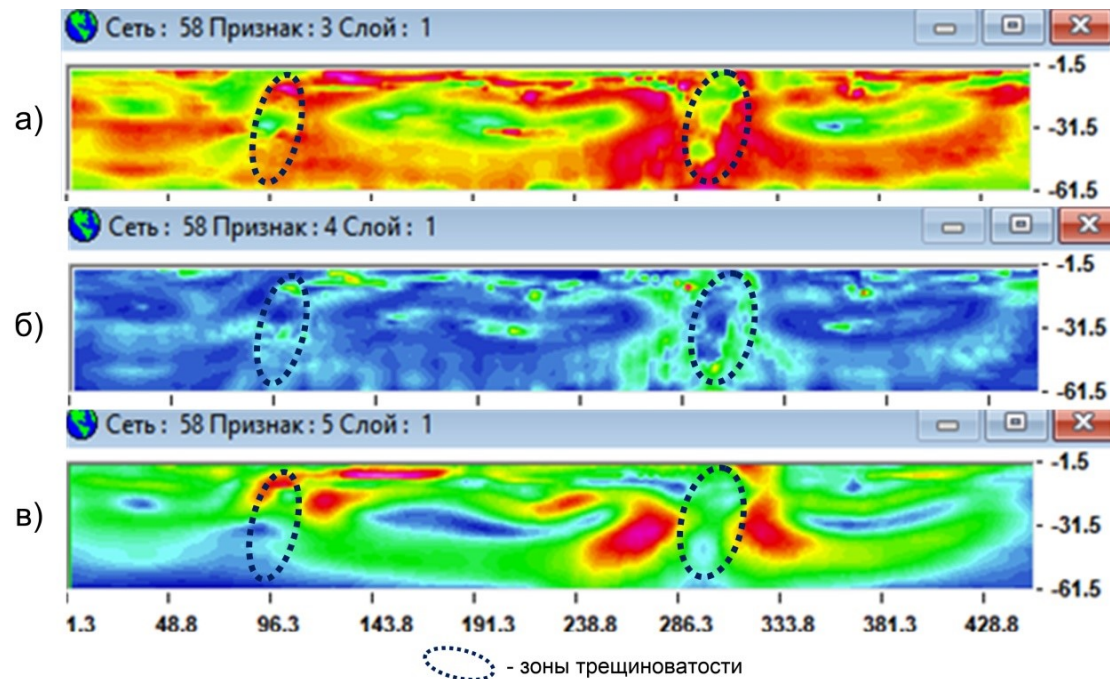


терпретации данных метода естественного поля и симметричного электропрофилирования, полученных в пределах исследуемой территории [8, 9]. В программном комплексе «КОСКАД 3D» [5] в скользящем окне рассчитывались статистические характеристики для разрезов УЭС. На рисунке 5 приведены асимметрия, эксцесс, коэффициент вариации для УЭС, полученных по наблюдениям ЭТ в ноябре 2022 г. Видно, что минимальные и максимальные значения статистик приурочены к границам аномалий и так же позволяют проследить выделенные на разрезах УЭС и относительного параметра  $\Delta\rho$  ослабленные зоны трещиноватого глинистого известняка слагающего терригенно-карбонатную толщу.



**Рис. 4.** Относительный параметр  $\Delta\rho$  изменений УЭС за периоды: сентябрь 2021 г. – июнь 2022 г. (а); июнь 2022 г. – сентябрь 2022 г. (б); сентябрь 2022 г. – октябрь 2022 г. (в); октябрь 2022 г. – ноябрь 2022 г. (г); сентябрь 2021 г. – сентябрь 2022 г. (д)

Таким образом, использование математических преобразований параметров, получаемых в результате измерений, помогает повысить достоверность локализации зон негативной техногенной изменчивости породного массива. А многократные измерения, выполненные к тому же в разные сезоны, позволяют выявить нестабильные участки и проследить динамику изменения их состояния.



**Рис. 5.** Статистические характеристики: асимметрия (а); эксцесс (б); коэффициент вариации (в) УЭС, полученных по результатам электротомографии в ноябре 2022 г.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ  
(рег. номер 122012000398-0).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зубрикова Е.С., Тайницкий А.А. Оценка результатов электроразведочных мониторинговых наблюдений // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 56-60. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.12.
2. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики: учебник для вузов / под ред. В.А. Богословского. – М.: Недра, 1990. – 501 с.: ил.
3. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л. Недра, 1980. – 446 с.: ил.
4. Тайницкий А.А., Степанов Ю.И., Зубрикова Е.С., Лучников М.С. Оценка результатов мониторинговых электроразведочных наблюдений надсолевых отложений Верхнекамского месторождения на участке техногенной нарушенности породного массива // Геофизика. – 2022. – № 5. – С. 27-33. – DOI 10.34926/geo.2022.68.30.001.
5. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации – КОСКАД 3D // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.
6. Федорова О.И., Горшков В.Ю. Геоэлектрический мониторинг при диагностике насыпных гидротехнических сооружений на примере изучения грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 11. – С. 45-51. – DOI: 10.34831/EP.2022.82.30.006.
7. Хмелевской В.К. Основной курс электроразведки. Ч. III. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. – 208 с.
8. Христенко Л.А. Результаты комплексной интерпретации данных электрометрических наблюдений // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 90-97. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.15.
9. Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основании железнодорожной насыпи // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПОЛНОВОЛНОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Г. Ярославцев, М.В. Тарантин  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** На результатах полноволнового моделирования рассмотрены особенности распространения волн в горных породах получены характеристики направленности упругих волн при возбуждении в некоторых типах пород, выявлены основные определяющие факторы, оценены относительные интенсивности продольных и поперечных волн, проведено сопоставление с реальными измерениями.

**Ключевые слова:** шахтная сейсморазведка, характеристики направленности, продольные волны, поперечные волны, горные выработки, полноволновое моделирование.

Основной объем шахтной сейсморазведки, применяемой в настоящее время в горных выработках при разработке различных месторождений твердых полезных ископаемых, связан с использованием волн различного типа (продольных и поперечных) [1-6]. Несмотря на очевидные плюсы использования разных типов волн, позволяющих на этапе интерпретации переходить к оценкам физико-механических свойств окружающего выработки породного массива, следует принимать во внимание сложные интерференционные процессы формирования регистрируемых в горных выработках волновых полей.

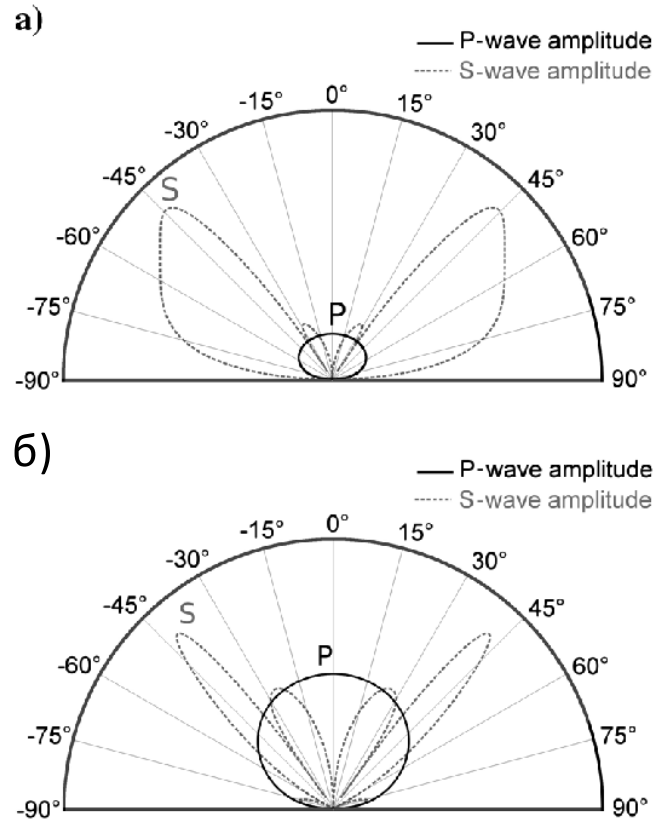
Как и при традиционной сейсморазведке, во внутренних точках среды ударными источниками на конуре выработки генерируются упругие колебания продольного и поперечного типов. Каждому из них соответствует своя характеристика направленности, определяющая область пространства распространения максимальной сейсмической энергии. Для любой целевой плоскости, пересекающей профильную линию (ось  $X$  вдоль выработки), характеристики направленности источников колебаний типа сосредоточенной силы должны быть близки к теоретическим [16, 17], рассчитанным для однородного полупространства (рис. 1).

Как показано в теоретических работах [9-13], характеристики направленности зависят только от  $\gamma = V_s/V_p$  или, иначе, от коэффициента Пуассона среды. Практически во всех случаях при возбуждении колебаний на границе полупространства основная энергия генерируемых поперечных волн заключена внутри углов  $30-60^\circ$ . В зависимости от значений коэффициента Пуассона меняется и соотношение интенсивностей возбуждаемых продольных и поперечных волн. Также отмечается, что для осадочных пород по мере уменьшения  $V_s/V_p$  интенсивность  $P$ -волн снижается, в то время как интенсивность  $S$ -волн сохраняется примерно на одном уровне. Однако в реальных данных этого не наблюдается [7, 8].

Кроме этого предполагается, что должна меняться и форма характеристик, так как с физических позиций особенность излучения источниками, действующими на свободной границе полупространства, состоит в том, что генерируемое волновое поле можно представить как сумму прямого излучения источника, находящегося в безграничном пространстве, и всех одновременно возникающих отраженных от свободной границы волн [14].

Эффективным инструментом для получения близких к реальным представлений об интенсивности упругих колебаний является математическое полноволновое моделирование [15]. В настоящей работе представлены результаты моделирования, выполненного в 2Д постановке в программном комплексе Tesserall Engineering

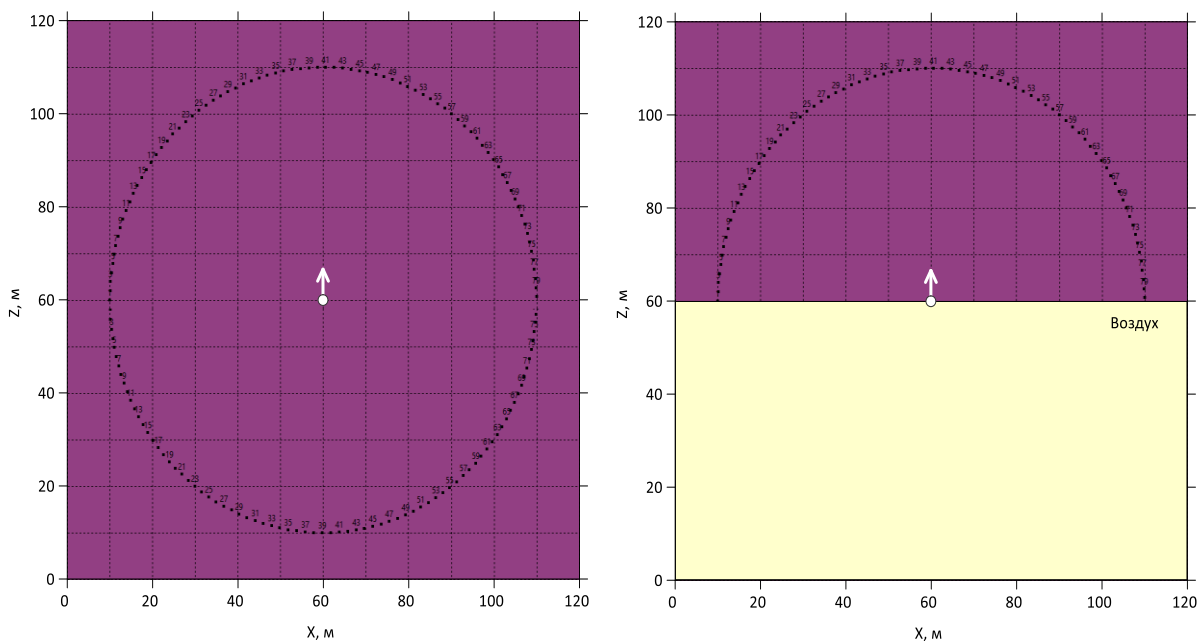
(www.tesseral-geo.com). В пакете Tesseral Engineering реализовано конечно-разностное численное моделирование, которое позволяет точно имитировать все сейсмические эффекты прохождения сейсмического волнового поля для мультипараметрической, гетерогенной и геологически реалистичной глубинной модели среды. Точность моделирования ограничивается только сложностью используемого дифференциального приближения волнового уравнения и техническим совершенством применяемых схем расчета.



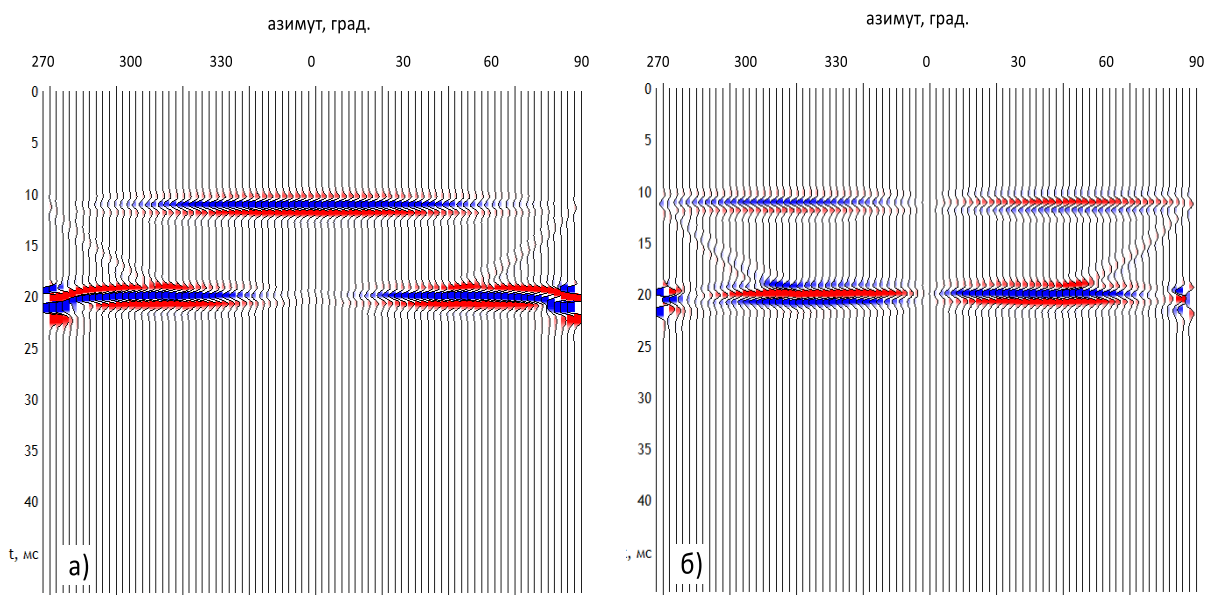
**Рис. 1.** Теоретические характеристики направленности источника типа сосредоточенной силы, приложенной к свободной поверхности, для двух отношений длины волны к диаметру поверхности источника: (а)  $\lambda/\varnothing = 50$ , (б)  $\lambda/\varnothing = 1,5$

С целью построения распределений динамических параметров волн в различных направлениях во входной модели (рис. 2) пункты приема расположены на воображаемой окружности и удалены от точки возбуждения колебаний на расстояние 50 м. Это обеспечивает прием в так называемой дальней зоне, где удаление значительно превышает длину регистрируемой волны. Для моделирования волн в полупространстве пункт возбуждения (вертикальный монополь) располагался на границе «породный массив – воздух». Использован простой симметричный импульс с частотой 700 Гц. Размер элемента в расчетной сетке – 0.25 м. Среда описывалась тремя параметрами: скоростями  $V_s$  и  $V_p$  волн и плотностью.

Результаты моделирования скомпонованы в две угловые сейсмограммы для вертикальной и горизонтальной компонент поля (рис. 3). Волновые поля имеют классический вид для изотропного полупространства. Кроме вступлений прямых волн продольного и поперечного типа, прослеживается поверхностная волна вблизи углов 270° и 90°, близких к прямым относительно направления удара (0°), а также коническая волна, которая образуется за счет отрыва на некотором расстоянии от источника фронтов Р- и S-волн друг от друга.



**Рис. 2.** Схема расположения приемников и источника в изотропном безграничном пространстве (а) и на границе полупространства (б)



**Рис. 3.** Модельные сейсмограммы для однородного полупространства: а) Z-компонента, б) X-компонента

Для оценки полного вектора смещений и построения диаграммы направленности продольной и поперечной волн написан специальный программный модуль. Модуль принимает получаемые при моделировании волновые файлы и с учетом геометрии расстановки выводит результат в виде угловых зависимостей амплитуд сигналов. Предполагается, что волновые сигналы любой компоненты регистрируются в одно время. Поэтому положение волновых форм для вычисления амплитуд определяется временным положением середины окна на трассе и его шириной. По имеющимся ортогональным компонентам вычисляется полная амплитуда сигнала для каждого времени в пределах окна анализа. Искомым результатом является максимальное значение полного сигнала в пределах окна.

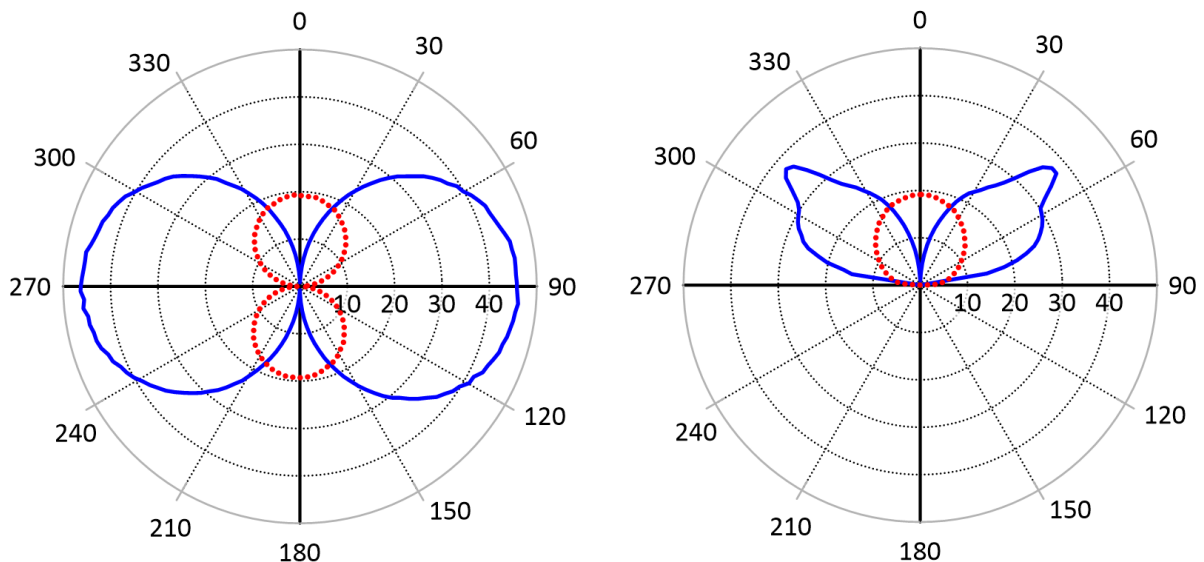


Алгоритм позволяет находить сразу характеристики продольных и поперечных волн, так как положение их сигналов на трассе определяется временем, которое легко вычислить по имеющейся геометрии расстановки.

Итоговым результатом исследований являются характеристики направленности для различных моделей среды. На рисунке 4 приведены результаты расчетов для однородной среды со свойствами каменной соли.

Из полученных диаграмм видно, что в безграничном соляном массиве интенсивность Р-волн в 2.5 раза превышает интенсивность S-волн. При размещении источника на границе свободной поверхности «порода-воздух» максимум энергии поперечных волн смещается на азимут  $48^\circ$ , а соотношение интенсивностей уменьшается до 1.9 раза. Что, очевидно, происходит за счет распределения энергии на образование других классов волн, связанных с наличием границы раздела сред.

Аналогичные расчеты характеристик направленности источника типа сосредоточенной силы, приложенной к свободной поверхности, для различных типов пород приведены в таблице 1.



**Рис. 4.** Вычисленные характеристики направленности источника типа сосредоточенной силы в однородном пространстве (а) и приложенной к свободной поверхности (б)

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

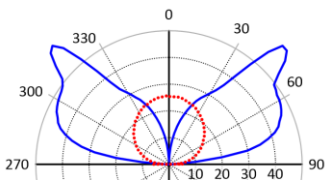
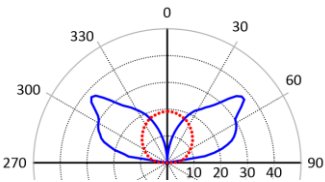
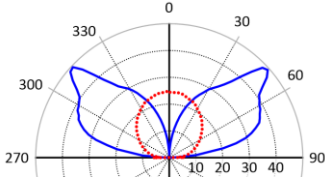
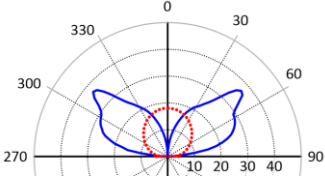
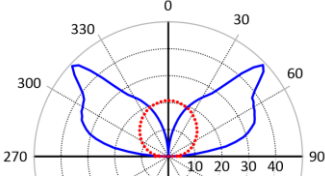
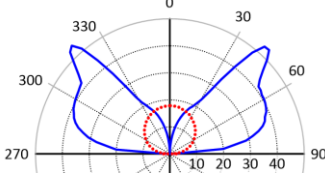
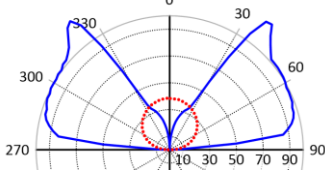
Для большинства пород, в которых могут проходить горные выработки, по результатам моделирования и при реальных измерениях амплитуды S-волн в 2-3 раза превосходят амплитуды Р-волн, а основная энергия поперечных волн сосредоточена между углами  $40-50^\circ$ .

Для осадочных пород по мере увеличения коэффициента Пуассона относительная интенсивность продольных волн падает, в то время как интенсивность поперечных может и увеличиваться, и уменьшаться.

Форма характеристик направленности для S-волн зависит от их скорости. Чем меньше скорость, тем меньше влияние волн, отраженных от свободной поверхности, и тем больше ширина основного лепестка.

Таблица 1

Свойства горных пород, принятые в модели,  
и результирующая характеристика направленности

Порода	$V_S$	$V_P$	$\gamma$	$\rho$	$\mu$	$\theta$	$A_S/A_P$	Характеристика направленности
Кимберлит	2000	4000	0.50	2700	0.233	44.0	2.5	
Каменная соль	2500	4500	0.56	2200	0.277	48.0	1.9	
Ангидрит	2200	4000	0.55	2500	0.283	48.5	2.0	
Гипс	2500	4500	0.56	2500	0.290	48.5	2.0	
Песчаник	2300	4500	0.51	2500	0.323	46.0	2.4	
Мергель	2000	4500	0.44	2800	0.377	44.0	3.0	
Глина	1200	3000	0.40	2400	0.405	39.0	3.2	

**Обозначения:**  $V_S$  – скорость поперечной волны;  $V_P$  – скорость продольной волны;  $\gamma$  – отношение  $V_S / V_P$ ;  $\rho$  – плотность горной породы ( $\text{кг/м}^3$ );  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\theta$  – угол между осью Z и направлением на точку приема;  $A_S/A_P$  – отношение максимума энергии S и P-волн

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Сальников А.П. Контроль состояния горного массива методами многоволновой шахтной сейсморазведки // Горн. вестн. – 1998. – № 6. – С. 94-99.
2. Вагин В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 186 с.: ил.
3. Бабкин, А.И., Санфиоров И.А. Практические примеры решения горнотехнических задач методами шахтной сейсмоакустики // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011 – № 4. – С.152-159.
4. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г. О перспективах изучения поперечных волн в горных выработках соляных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 7. – С. 45-63. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-45-63.
5. Кулагов Е.В., Хвесеня С.С., Иванов С.В., Богдан С.И. Сейсморазведка методом отраженных волн в подземных выработках Гремячинского месторождения калийных солей // Инженерная и рудная геофизика – 2023: сб. материалов 19-ой науч.-практ. конф. и выставки, 15-19 мая 2023 г. – СПб., 2023. – С.
6. Царев Р.И., Пригара А.М., Жуков А.А. Возможности шахтной сейсморазведки на поперечных волнах // Инженерная и рудная геофизика – 2019: 15-я юбилейная конф. и выставка, 22-26 апр. 2019. – Геленджик, 2019. – С.
7. Бабкин А.И. Изучение закономерностей формирования и распространения объемных сейсмических волн в породном массиве по данным трехкомпонентной записи в горных выработках // Горное эхо. – 2020. – № 4 (81). – С. 57-63. – DOI: 10.7242/echo.2020.4.12.
8. Бабкин А.И. Экспериментальное определение фактической направленности источника упругих колебаний типа сосредоточенной силы // Горное эхо. – 2021. – № 3(84). – С. 39-44. DOI: 10.7242/echo.2021.3.8.
9. Малиновская Л.Н. Методика построения теоретических сейсмограмм // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн: сб. науч. тр. – Л., 1957. – Т. 1. – С.
10. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 176 с.: ил. – С. 10, 29-30.
11. Огурцов К.И. Количественные исследования волновых процессов в упругом полупространстве при различных видах воздействий. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1956. – С. 148-219.
12. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. – Новосибирск: Изд-во СО РАН: ОИГГМ. – 1997. – 299 с.: ил. – С. 17-18, 63-64.
13. Рудаков А.Г., Цымбал Т.М. О некоторых экспериментальных исследованиях динамических характеристик ударного импульсного воздействия. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1959.
14. Сейсморазведка: Справ. геофизика / под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. – М.: Недра, 1981 – 464 с.: ил. – С. 9-16.
15. Санфиоров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. Изучение особенностей формирования поля отраженных волн при наблюдениях в горных выработках соляных рудников на основе полноволнового моделирования // Геофизика. – 2021. – № 5. – С. 4-11.
16. Bretaudeau F., Leparoux D., Durand O., Abraham O. Small-scale modeling of onshore seismic experiment: A tool to validate numerical modeling and seismic imaging methods // GEOPHYSICS. – 2011. – V. 76, № 5. – T101-T112. – DOI:10.1190/geo2010-0339.1 (2011).
17. Tang, X.M., Zhu Zhenya, Toksöz M.N. Radiation patterns of compressional and shear transducers at the surface of an elastic half space // Journal of the Acoustical Society of America. – 1994. – V. 95, № 1. – P. 71-76. – DOI: 10.1121/1.408299.

# РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.2.15

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ РАБОЧИХ ЗОН С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА

А.В. Зайцев, Н.А. Трушкова  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация.** В работе развита математическая модель стационарного газораспределения в рециркуляционном контуре, содержащем рабочие зоны с источниками газовой выделенности и без них с требованием обеспечения минимально допустимой скорости воздуха. Показано, что с точки зрения рециркуляционного проветривания рабочие зоны без газовой выделенности идентичны внутренним утечкам воздуха, а количество воздуха, подаваемое на их проветривание, может быть эффективно использовано для повышения эффективности применения рециркуляции. Для этого целесообразна система управления проветриванием рабочих зон, позволяющая перераспределять количество воздуха между рабочими зонами в рециркуляционном контуре. Приведены методические основы расчета количества воздуха при применении рециркуляционного проветривания.

**Ключевые слова:** горная выработка, рудничная вентиляция, математическое моделирование, газораспределение, внутренние утечки воздуха, рециркуляция, газовыделение, расчет количества воздуха.

### Введение

В связи с интенсивным развитием горнодобывающих предприятий остро стоит вопрос поиска эффективных технологий обеспечения проветривания все большего количества подземных рабочих зон. При этом современные предприятия зачастую имеют разветвленную развитую сеть горных выработок, характеризуются значительными внутренними утечками, но при этом имеют ограничения по подаче большего количества свежего воздуха с поверхности. В этих условиях одним из перспективных способов повышения эффективности систем вентиляции подземных рудников, уже зарекомендовавших себя на практике, является применение систем частичного повторного использования воздуха на основе организации рециркуляционного проветривания [1-3]. Рециркуляционное проветривание основано на повторном использовании исходящей струи воздуха в случае, если параметры воздушной среды удовлетворяют установленным нормативам.

При этом, рассматривая традиционные факторы газо-, тепло- и пылевыведения, по которым рассчитывается проветривание подземных рабочих зон, только фактор газовой выделенности представляет опасность с точки зрения накопления и ухудшения качества подаваемого воздуха. Так, формирование теплового режима вентиляционных выработок характеризуется в основном теплообменом воздуха с окружающим массивом горных пород, что приводит к отведению тепловыделений из рабочих зон в окружающий массив. Как правило, на расстоянии от 1,5 километров и более температура воздуха исходящей струи уже не отличается от температуры воздуха, подаваемого на проветривание. На этом основан один из горнотехнических способов регулирования теплового режима очистных выработок на основе рециркуляционного проветривания [4]. Аналогично фактор пыли характеризуется тем, что при движе-

нии по вентиляционным выработкам происходит процесс осаждения пыли, особенно явно выраженный при обводненности горных выработок. Таким образом, через некоторое расстояние исходящая струя имеет низкие концентрации пыли и может быть направлена на повторное использование [5]. Далее, такой фактор расчета количества воздуха, как обеспечение минимальной скорости движения воздушной среды, также не приводит к увеличению концентрации газа, что создает предпосылки для использования этого воздуха для повторного проветривания рабочих зон с газовыделениями.

Несмотря на большой объем работ, выполненных в области рециркуляционного проветривания [1-3, 6], отсутствуют исследования рециркуляционного проветривания рабочих зон при действии различных факторов расчета количества воздуха. В данной работе на основе ранее разработанной модели делается попытка анализа газораспределения в рециркуляционном контуре, включающем рабочие зоны с различными факторами, определяющими требуемое количество воздуха.

### Математическая модель

Решение поставленной задачи осуществляется на основе совершенствования математической модели газового баланса в рециркуляционном контуре, представленной в [7]. Для этого в модели рассматривается не одна рабочая зона с источником газовой выделенности, а две рабочие зоны, в одной из которых действует газовый фактор (присутствует источник газовой выделенности), а в другой есть требование по поддержанию минимально необходимого расхода воздуха (фактор минимальной скорости воздуха). Схема представлена на рисунке 1.

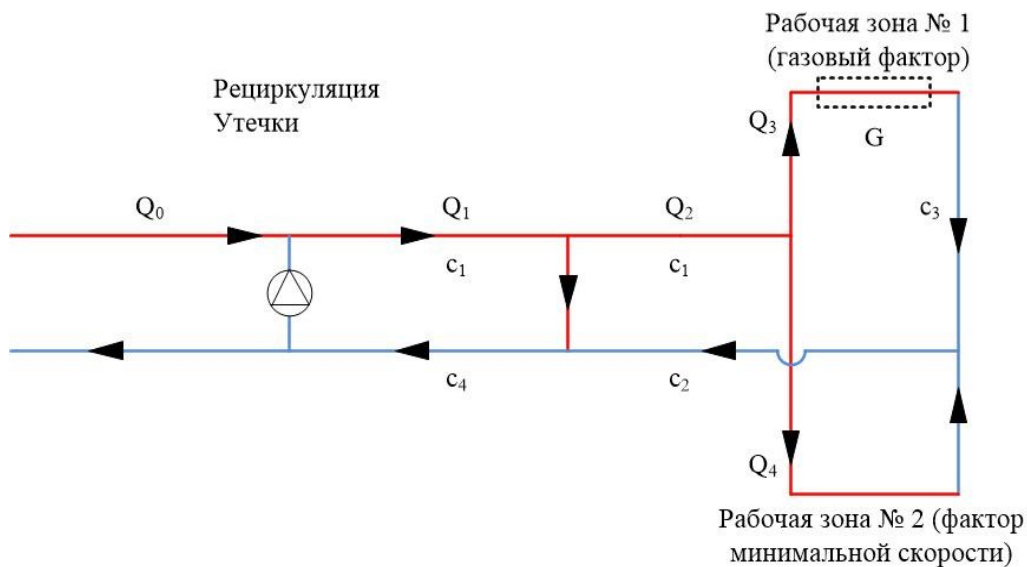


Рис. 1. Расчетная схема рециркуляционного контура с рабочими зонами разного типа

Считается, что распределение подачи свежего воздуха и интенсивности рециркуляционного проветривания не изменяется. Также предполагается, что концентрации газов малы, поэтому объемный расход воздуха в ветви определяется только воздушной средой. Для удобства вводятся следующие наименования рабочих зон: рабочая зона № 1 с действующим фактором газовой выделенности и рабочая зона № 2 с фактором минимального расхода воздуха.

Система уравнений, описывающая распределение газа в такой сети, будет иметь вид:



$$\begin{cases} c_1 \cdot Q_1 - c_4 \cdot (Q_1 - Q_0) = 0 \\ c_3 - c_1 - \frac{G}{Q_3} = 0 \\ c_3 \cdot Q_3 + c_1 \cdot Q_4 - c_2 \cdot Q_2 = 0 \\ c_1 \cdot (Q_1 - Q_2) + c_2 \cdot Q_2 - c_4 \cdot Q_1 = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $c_1$  – концентрация газа в свежей струе после рециркуляционной сбойки,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,  $c_2$  – концентрация в исходящей струе на выходе из рабочих зон,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,  $c_3$  – концентрация в исходящей струе рабочей зоны № 1,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,  $c_4$  – концентрация газа в исходящей струе после разбавления утечками воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ,  $Q_0$  – расход свежего воздуха, поступающего в рециркуляционный контур,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $Q_1$  – расход воздуха в рециркуляционном контуре,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $Q_2$  – расход воздуха, поступающего на проветривание рабочих зон,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $Q_4$  – расход воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны № 2,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $G$  – газообильность рабочей зоны № 1,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Решая приведенную систему уравнений (1) относительно искомым величин концентраций газа, получим следующее решение

$$\begin{aligned} c_1 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} \\ c_2 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} + \frac{G}{Q_3 + Q_4}, \\ c_3 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} + \frac{G}{Q_3} \\ c_4 &= \frac{G}{Q_0} \end{aligned} \quad (2)$$

Для удобства анализа введем коэффициенты коэффициент утечек  $K_{\text{ут}}$ , рециркуляции  $K_{\text{рец}}$  и коэффициент распределения воздуха между рабочими зонами

$$\begin{aligned} K_{\text{ут}} &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \\ K_{\text{рец}} &= \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1}, \\ K_{\text{рз}} &= \frac{Q_3}{Q_2} \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом введенных обозначений полученные решения для концентраций газа можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} c_1 &= K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} \\ c_2 &= \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} \cdot \frac{G}{Q_0}, \\ c_3 &= K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{\text{рз}} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0} \end{aligned} \quad (4)$$

Из полученного решения концентрации газов в исходящей струе рабочих зон определяются следующими выражениями:

$$c_{P31} = K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{P3} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0} , \quad (5)$$

$$c_{P32} = K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0}$$

Из вида полученных выражений следует, что концентрация газа на входе в рабочие зоны зависит только от суммарного газовыделения внутри рециркуляционного контура, количества свежего воздуха и коэффициента рециркуляции. В рабочей зоне с отсутствующим газовыделением концентрация газа не меняется. В рабочей зоне с газовыделением наблюдается ее прирост в зависимости от количества подаваемого в нее воздуха. Это количество определяется общим объемом свежего воздуха, коэффициентами рециркуляции и утечек, а также распределением воздуха между рабочими зонами.

Полученные выражения позволяют определить расчетные количества воздуха исходя из условий, что в рабочей зоне с фактором газовыделения не должно быть превышения концентрации газов на исходящей струе, а в рабочей зоне с фактором минимальной скорости должен обеспечиваться минимальный расход. То есть должны выполняться условия:

$$K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{P3} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0} \leq c_{\text{ПДК}} , \quad (6)$$

$$Q_4 \geq Q_{\text{min}}$$

### Анализ рециркуляционного проветривания рабочих зон

На основе выражений (4) и (6) возможно провести анализ изменения газораспределения в рабочих зонах при различных вариантах перераспределения воздуха, утечках и рециркуляции. Для расчета приняты следующие исходные данные: мощность газовыделения в рабочей зоне № 1 составляет 1 м<sup>3</sup>/с, предельно допустимая концентрация – 2%, минимально необходимый расход в рабочей зоне № 2 – 50 м<sup>3</sup>/с.

Далее для анализа рассмотрены следующие варианты распределения расходов для обеспечения заданных условий проветривания рабочих зон, при которых не наблюдается превышения предельно допустимой концентрации газов и обеспечивается расход не меньше минимального:

- 1) отсутствуют утечки воздуха и рециркуляционное проветривание;
- 2) присутствуют утечки воздуха в количестве 50%, но отсутствует рециркуляционное проветривание;
- 3) присутствуют утечки воздуха в количестве 50%, но есть рециркуляционное проветривание с коэффициентом 50%, при этом нет возможности перераспределения воздуха между рабочими зонами; регулирование осуществляется только за счет изменения подачи свежего воздуха;
- 4) присутствуют утечки воздуха в количестве 50%, но есть возможность регулировать количество рециркулируемого воздуха и перераспределение между рабочими зонами.

Результаты расчетов по данным вариантам представлены в таблице 1.

Таблица 1

## Внутренние утечки воздуха в подземных рудниках

Параметр	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	Вариант № 4
Расход свежего воздуха,	100	200	125	110
Расход рециркуляции, м <sup>3</sup> /с	0	0	125	125
Коэффициент рециркуляции, %	0	0	50	53
Коэффициент утечек, %	0	50	50	50
Объем утечек, м <sup>3</sup> /с	0	100	125	117,5
Концентрация на входе в рабочие зоны, %	0	0	0,4	0,5
Рабочая зона № 1				
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	50	50	62,5	66,97
Расчетный расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	50	50	62,5	66,5
Мощность выделения газа, м <sup>3</sup> /с	1	1	1	1
Концентрация на выходе	2	2	2	1,98
Рабочая зона № 2				
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	50	50	62,5	50,53
Расчетный расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	50	50	50	50
Концентрация на выходе %	0	0	0,4	0,4
Распределение между рабочими зонами	0,5	0,5	0,5	0,57

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что рабочие зоны несимметричны относительно влияния рециркуляционного проветривания. При возникновении рециркуляционного контура появляется возможность снизить подачу свежего воздуха за счет той части расходов, которая не участвует в разбавлении вредных примесей от источников. При этом подача воздуха на эту рабочую зону также увеличивается и возникает ситуация с подачей избыточного количества воздуха в эту рабочую зону. Таким образом, для большей эффективности рециркуляционного проветривания целесообразно перераспределить количества воздуха между рабочими зонами и большую часть подать на рабочую зону с рециркуляцией. Поэтому возникает задача поиска необходимого распределения расходов воздуха между рабочей зоной при действии различных фак-

торов. Для этого разрешим неравенство (6) относительно коэффициента распределения воздуха между рабочими зонами:

$$K_{PЗ} = \frac{G}{\left(c_{ПДК} - K_{рец} \cdot \frac{G}{Q_0}\right) Q_{min}} \quad , \quad (7)$$

Можно заметить, что полученное выражение есть отношение расчетных количеств воздуха по различным факторам с учетом того факта, что за счет рециркуляции воздух, подаваемый на проветривание рабочих зон, имеет начальную концентрацию газов.

Также можно отметить, что расход воздуха, проходящий через рабочую зону № 2, не участвует в разбавлении газов от источника непосредственно и с точки зрения газораспределения идентичен утечкам воздуха на схеме. В связи с этим для определения возможности снижения подачи свежего воздуха необходимо считать суммарное количество воздуха, не проходящего через источники газовыделения.

Полученные результаты можно расширить на общий случай, когда имеются несколько обособленно проветриваемых рабочих зон внутри рециркуляционного контура. У каждой рабочей зоны есть газообильность и минимально требуемое количество воздуха. Кроме того, есть общие утечки воздуха в пределах контура.

В таком случае полученное решение (4) и (5) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} c_1 &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0} \\ c_2 &= \frac{(1 - K_{рец} \cdot K_{ут}) \cdot \sum_{i=1}^N G_i}{(1 - K_{ут}) \cdot Q_0} \\ c_3 &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0} + \frac{(1 - K_{рец}) \cdot \sum_{i=1}^N G_i}{K_{PЗ} \cdot (1 - K_{ут}) \cdot Q_0} \quad , \\ c_{PЗi} &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0} + \frac{(1 - K_{рец}) \cdot G_i}{K_{PЗi} \cdot (1 - K_{ут}) \cdot Q_0} \end{aligned} \quad (8)$$

где  $K_{PЗi}$  – доля воздуха, поступающего на проветривание  $i$ -ой рабочей зоны.

Методика определения параметров рециркуляционного проветривания рабочих зон будет иметь следующий вид.

На начальном этапе в зависимости от общего количества газовыделения в рабочих зонах рассчитывается минимально требуемое количество воздуха из условия недопустимости превышения предельно допустимой концентрации на общей исходящей струе, то есть

$$Q_0 = \frac{(1 - K_{рец} \cdot K_{эф}) \cdot \sum_{i=1}^N G_i}{(1 - K_{эф}) \cdot c_{ПДК}} \quad , \quad (9)$$

Важно отметить, что в выражении использован эффективный коэффициент утечек  $K_{эф}$ , учитывающий не только тот объем воздуха, который не доходит до рабочих зон, но и воздух, проветривающий рабочие зоны, но не участвующий в разжижении газовых примесей

$$K_{\text{эф}} = \frac{Q_1 - Q_2 - \sum_{i=1}^N Q_{\text{min}}}{Q_1}, \quad (10)$$

При этом в каждую рабочую зону по газовому фактору должна обеспечиваться подача количества воздуха в объеме не менее

$$Q_{\text{РЗ}i} = \frac{G_i}{c_{\text{ПДК}} \cdot (1 - K_{\text{УТ}})}, \quad (11)$$

А по фактору минимальной скорости количество воздуха определяется аналогично тому, как это принято без учета рециркуляции

$$Q_{\text{РЗ}i} = S_i \cdot v_{\text{min}}, \quad (12)$$

Также необходимо отметить, каким образом следует определять коэффициент рециркуляции в выражении (9). Поскольку было установлено, что при увеличении коэффициента рециркуляции не происходит увеличение максимальных концентраций газа в сети горных выработок, фактор газовыделения в непосредственном виде не ограничивает коэффициент рециркуляции. С другой стороны, поскольку источник тяги в рециркуляционном контуре работает в параллели с вентиляторными установками общешахтного проветривания, увеличение его напора и интенсивности рециркуляции может привести к снижению подачи свежего воздуха к контуру, что создает риск создания потери устойчивости проветривания контура в целом вплоть до прекращения подачи свежего воздуха. Это создает риск неконтролируемой рециркуляции и накопления газовой примеси в контуре [5].

Таким образом, коэффициент рециркуляции должен быть ограничен из соображений обеспечения устойчивой подачи свежего воздуха к рециркуляционному контуру.

### Выводы

В работе развита модель газораспределения в рециркуляционном контуре при наличии множества рабочих зон с различными факторами проветривания. С ее помощью выполнен анализ требуемых расходов воздуха, подаваемых в рабочие зоны с различными факторами, при задействовании рециркуляционного проветривания. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- рециркуляционное проветривание оказывает влияние только на рабочие зоны с наличием фактором газовыделения; факторы обеспечения минимальной скорости движения воздуха, температуры и пыли не зависят от коэффициента рециркуляции и за счет этого обеспечивают повышение эффективности применения рециркуляционного проветривания;
- количества воздуха, подаваемые в рабочие зоны, но не задействованные в разжижении газовых примесей, с точки зрения рециркуляционного проветривания идентичны внутренним утечкам воздуха, что позволяет повышать использование их при организации рециркуляционного проветривания;
- повышение эффективности применения рециркуляционного проветривания может быть достигнуто за счет наличия системы управления проветриванием рабочих зон внутри рециркуляционного контура, позволяющей перераспределять большую часть рециркулируемого воздуха на проветривание рабочих зон с газовыделениями.

Таким образом, эффективность рециркуляционного проветривания может быть увеличена за счет задействования объема воздуха, проходящего через рабочие зоны, но не участвующего в разжижении газовых примесей.



*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000396-6).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников / УрО РАН. – Екатеринбург, 1992. – 244 с.: ил.
2. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников / УрО АН СССР. – Свердловск, 1990. – 251 с.: ил.
3. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра, 2007. – 324 с.: ил
4. 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.
5. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д.т.н.; 25.00.20 / Шалимов Андрей Владимирович. – Пермь, 2012. – 329 с.
6. Казаков Б.П., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Исследование устойчивости совместной работы подземных вентиляторов в калийном руднике при применении рециркуляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 2. – С. 108-119. – DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-108-119.
7. Зайцев А.В., Трушкова Н.А. Исследование рециркуляционного проветривания при наличии источника газовой выделенности в рабочей зоне и внутренних утечек воздуха // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 3. – С. 34-46. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_34.

УДК 622.831.322

DOI:10.7242/echo.2023.2.16

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОНОСНОСТИ ПО СВЯЗАННЫМ ГАЗАМ ПОРОД НА УЧАСТКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

О.В. Иванов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Представлены первые результаты количественной и качественной оценки газоносности по связанным газам калийно-магниевых солей и вмещающих пород в пределах Западно-Перелюбского, Восточно-Перелюбского, Западно-Целинного, Восточно-Целинного и Западно-Иванихинского, Центрально-Иванихинского лицензионных участков, расположенных в Саратовской области. Лабораторные исследования газоносности по связанным газам проводились на специальной лабораторной установке методом сухой механической дезинтеграции, заключающемся в измельчении породы определенной массы до частиц размерами в несколько микрон с постоянным контролем температуры и давления в процессе размала и последующим хроматографическим анализом компонентного состава выделившихся газов.

**Ключевые слова:** лицензионные участки, калийно-магниевые соли, вмещающие породы, газодинамические явления, газоносность пород, связанные газы, компонентный состав, газовый хроматограф.

### Введение

Газоносность пород включает в себя газоносность по свободным и газоносность по связанным газам. Многочисленными исследованиями по изучению газоносности соляных пород доказано, что газоносность пород по связанным газам составляет 10% от полной газоносности. Повышенная газоносность пород по связанным газам приводит к ослаблению физико-механических свойств пород и повышению вероятности возникно-

вения газодинамических явлений. Газоносность пород по связанным газам в пределах Западно-Перелюбского, Восточно-Перелюбского, Западно-Целинного, Восточно-Целинного и Западно-Иванихинского, Центрально-Иванихинского лицензионных участков в настоящее время не изучена. В этой связи изучение газоносности пород по связанным газам в пределах данных участков является актуальной задачей. С целью определения доли связанного газа в составе полной газоносности необходимо получить количественную оценку газоносности по связанным газам калийно-магниевых солей и вмещающих пород для возможной последующей корректировки объемов и параметров профилактических мероприятий при вскрытии и подготовке новых лицензионных участков.

### **Методика проведения исследований**

Комплекс оборудования для определения газоносности горных пород по связанным газам работает в следующем порядке [1-2]. Образцы пород вручную разрушают до размера 35 мм. Затем с помощью щековой дробилки ВВ 51 образцы породы размалываются до установленного размера (5-10 мм). Из размолотого материала отсеивается необходимая фракция. Заданный объем (100-300 мл) подготовленного материала загружается вместе с 20 мелющими шарами из нержавеющей стали диаметром 20 мм в размольный стакан планетарной шаровой мельницы РМ 100, на который герметично устанавливается специальная крышка с системой РМGrind-Control. Выбирается требуемый режим работы мельницы – скорость вращения, длительность измельчения и реверс. В процессе измельчения системой РМGrind-Control на персональный компьютер передаются данные давления и температуры в размольном стакане.

Подставляя известные и полученные в процессе размола значения давления и температуры в выражение объединенного газового закона с учетом термического коэффициента, рассчитывается объем выделившегося из породы газа. Соотношение объема выделившегося газа к объему породы является газоносностью пород по связанным газам [3-11].

После окончания размола с помощью пробоотборника через клапан из размольного стакана отбирается проба выделившегося из породы газа для анализа его компонентного состава. Анализ компонентного состава связанных газов, отобранных из горных пород, проводится в соответствии с ГОСТ 31371.6-2008 (ИСО 6974-6:2002) «Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределенности» Часть 6 «Определение водорода, гелия, кислорода, азота, диоксида углерода и углеводородов С1-С8 с использованием трех капиллярных колонок». Для проведения анализа компонентного состава газов используются современные газовые хроматографы 450-GC компании «Varian, Inc». Данные хроматографы предназначены для определения состава проб веществ и материалов при выполнении различных исследований и работ в области химии, нефтехимии, анализе природного газа, аналитическом контроле и экологических исследованиях. Данный тип хроматографов имеет сертификат об утверждении типа средств измерений под № 25231, зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 16499-06 и допущен к применению в Российской Федерации. Для определения компонентного состава газов в отобранных пробах используется метод абсолютной калибровки. Объемную долю компонентов газа вычисляют сравнением площадей, соответствующих компонентов на хроматограммах испытуемого газа и градуировочной газовой смеси, записанных при одинаковых условиях испытания.

### Результаты исследований

Исследования проводились на оборудовании ЦКП «Центр исследования свойств геоматериалов» ПНИПУ. Экспериментальные лабораторные исследования газоносности по связанным газам калийно-магниевых солей и вмещающих пород проводились на образцах, отобранных из керна поисково-оценочных скважин Западно-Перелюбского, Восточно-Перелюбского, Западно-Целинного, Восточно-Целинного, Западно-Иванихинского и Центрально-Иванихинского лицензионных участков.

По представленной выше методике определения газоносности пород по связанным газам способом сухой механической дезинтеграции экспериментальные лабораторные исследования проведены на 118 образцах пород. В таблице 1 представлены результаты определения газоносности по связанным газам по участкам.

Таблица 1

Газоносность пород по связанным газам  
по лицензионным участкам

№	Лицензионный участок	Кол-во образцов	Газоносность, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>		
			Мин.	Макс.	Средняя
1	Западно-Перелюбский	36	0,032	0,084	0,054
		12	0,037	0,073	0,055
2	Восточно-Перелюбский	27	0,042	0,080	0,057
		21	0,040	0,088	0,060
3	Западно-Иванихинский	27	0,043	0,114	0,077
4	Центрально-Иванихинский	31	0,043	0,143	0,079
5	Восточно-Целинный	29	0,048	0,118	0,082
6	Западно-Целинный	31	0,039	0,118	0,077
	<b>Всего</b>	<b>214</b>	<b>0,032</b>	<b>0,143</b>	<b>0,068</b>

После окончания размола образцов с помощью пробоотборника через клапан из размольного стакана отбирались пробы выделившегося из породы газа, компонентный состав которого анализировался на газовом хроматографе. В таблице 2 представлен средний компонентный состав связанных газов по лицензионным участкам.

Как видно из таблиц 1, 2, максимальная средняя газоносность пород по связанным газам в пределах исследуемых участков практически одинаковая и изменяется от 0,073 до 0,143 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Средняя газоносность пород по связанным газам также изменяется в малом диапазоне от 0,054 до 0,082 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, при среднем значении 0,068 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

В компонентном составе связанных газов в породах участков содержание метана изменяется от 6,84% (Западно-Целинный участок) до 25,02% (Восточно-Перелюбский участок) при среднем значении 10,18%.

Как видно из таблицы 1, по компонентному составу связанные газы в соляных породах метаново-азотные. Сильвинитовые и карналлитовые породы на всех участках отличаются более высоким содержанием метана. В таблице 3 представлены значения содержания метана (СН<sub>4</sub>), суммарного содержания углеводородов метанового ряда (С<sub>2</sub>-С<sub>5</sub>) и азота (N<sub>2</sub>) по породам и участкам.

Как видно из приведенных таблиц, наибольшее содержание метана зафиксировано в карналлитовых породах Восточно-Перелюбского участка. Также достаточно высоким содержанием метана в составе связанных газов обладают сильвин-карналлитовая и галит-сильвиновая породы Восточно-Целинного участка, 19,53% и 18,94%, соответ-

ственно. В составе связанных газов в образцах каменной соли и полигалитовой породы содержание метана не превышает 5%, за исключением каменной соли Западно-Иванихинского участка, которое составляет 7,33%.

Таблица 2

Компонентный состав связанных газов  
по лицензионным участкам (об. %)

№	Участок	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	i- C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 0	n- C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	i- C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> 2	n- C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
1	Западно-Перелюбский	13,10	3,37	0,672	0,180	0,050	0,103	0,068	0,052	82,27	0,13
		1,54	0,00	0,221	0,146	0,077	0,114	0,132	0,073	97,56	0,13
2	Восточно-Перелюбский	2,96	0,26	0,295	0,208	0,099	0,162	0,169	0,112	95,59	0,15
		25,02	6,19	0,946	0,147	0,017	0,090	0,025	0,051	67,37	0,14
3	Западно-Иванихинский	11,83	0,00	0,649	0,281	0,043	0,221	0,076	0,156	86,56	0,19
4	Центрально-Иванихинский	11,71	0,00	0,723	0,206	0,035	0,139	0,077	0,094	86,81	0,20
5	Восточно-Целинный	8,43	0,00	0,556	0,361	0,066	0,312	0,134	0,257	89,71	0,17
6	Западно-Целинный	6,84	0,00	0,352	0,135	0,031	0,115	0,053	0,090	92,22	0,16
	<b>Среднее</b>	10,18	1,23	0,552	0,208	0,052	0,157	0,092	0,111	87,26	0,16

Суммарное содержание углеводородов метанового ряда (C<sub>2</sub>-C<sub>5</sub>) в компонентном составе связанных газов колеблется от 0,484% (карналлит, Западно-Целинный участок) до 2,339% (сильвинит, Западно-Иванихинский участок), при среднем значении 1,227%.

Содержание азота в компонентном составе связанных газов соляных пород колеблется от 52,29% (карналлит, Восточно-Перелюбский участок) до 97,84% (каменная соль, Западно-Целинный участок), при среднем значении 86,95%.

На рисунках 1-4 представлены диаграммы распределения средних значений содержания метана, суммарного содержания углеводородов метанового ряда и содержания азота в составе связанных газов в породах по лицензионным участкам.

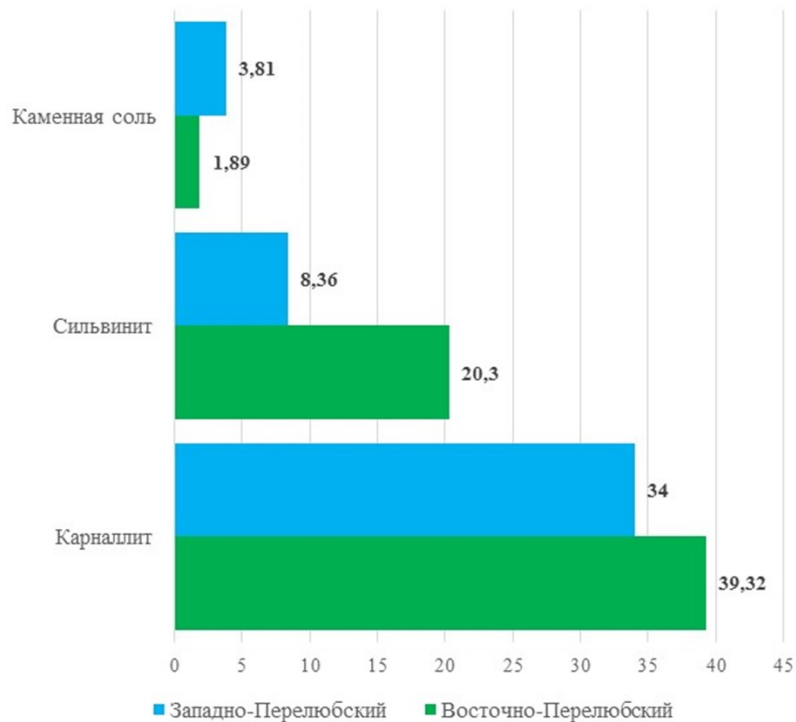
Как видно из представленных выше диаграмм, в целом по всем участкам среднее содержание метана в компонентном составе связанных газов изменяется в зависимости от типа пород. Так, в каменной соли и полигалитовой породе отмечается низкое содержание метана в компонентном составе связанных газов – до 7,33% в каменной соли Западно-Иванихинского участка и до 4,3% в полигалитовой породе Восточно-Целинного участка. Также низкое содержание метана зафиксировано в карналлит-галитовой породе Центрально-Иванихинского участка, из трех образцов которой содержание метана колеблется от 1,71% до 2,86%, в среднем составляя 2,25%. В данной породе отмечаются невысокие значения суммарного содержания углеводородов метанового ряда, от 0,348% до 0,975% при среднем – 0,593%.

Таблица 3

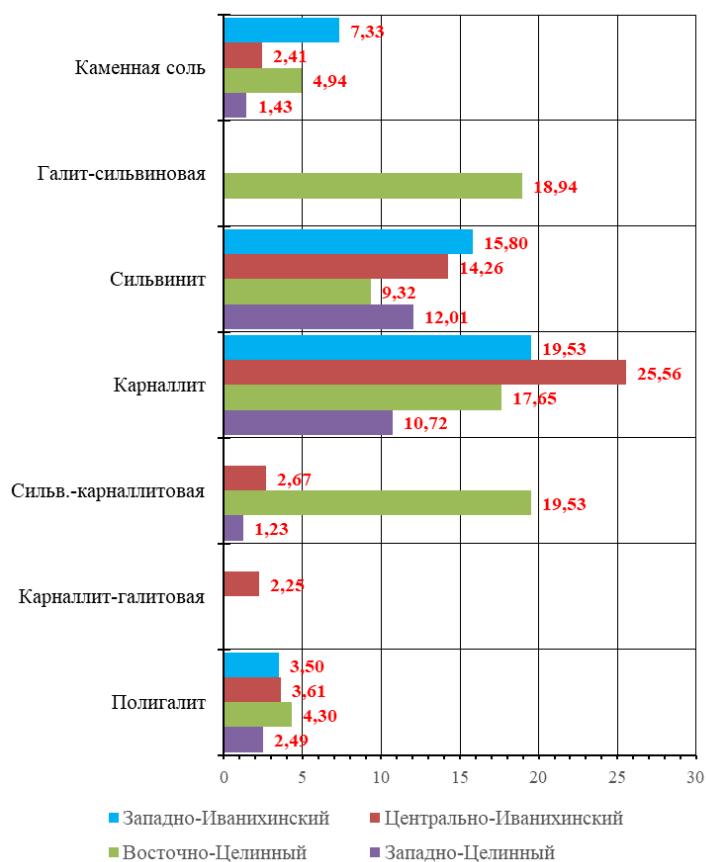
## Качественный состав связанных газов в породах (об. %)

№	Порода	Содержание метана	Сумма углеводородов	Содержание азота
<b>Западно-Перелюбский участок</b>				
1	Каменная соль	3,81	1,063	94,95
2	Сильвинит	8,36	0,757	90,76
3	Карналлит	34,00	1,070	64,83
<b>Восточно-Перелюбский участок</b>				
1	Каменная соль	1,89	1,067	96,89
2	Сильвинит	20,30	0,826	78,36
3	Карналлит	39,32	1,274	52,29
<b>Западно-Иванихинский участок</b>				
1	Каменная соль	7,33	2,222	90,24
2	Сильвинит	15,80	2,339	81,65
3	Карналлит	19,53	0,922	79,39
4	Полигалитовая порода	3,50	1,226	95,06
<b>Центрально-Иванихинский участок</b>				
1	Каменная соль	2,41	1,022	96,38
2	Сильвинит	14,26	2,180	83,31
3	Карналлит	25,56	1,467	72,76
4	Сильвин-карналлитовая порода	2,67	1,154	96,07
5	Карналлит-галитовая порода	2,25	0,593	96,96
6	Полигалитовая порода	3,61	1,005	95,19
<b>Восточно-Целинный участок</b>				
1	Каменная соль	4,94	0,766	94,10
2	Галит-сильвиновая порода	18,94	2,178	78,77
3	Сильвинит	9,32	1,437	89,09
4	Карналлит-сильвиновая порода	19,53	1,491	78,83
5	Карналлит	17,65	0,916	81,22
6	Галит-полигалитовая порода	4,30	2,089	93,44
<b>Западно-Целинный участок</b>				
1	Сильвин-карналлитовая порода	1,23	1,174	97,40
2	Каменная соль	1,43	0,585	97,84
3	Сильвинит	12,01	0,901	86,90
4	Карналлит	10,72	0,484	88,66
5	Полигалитовая порода	2,49	0,933	96,40

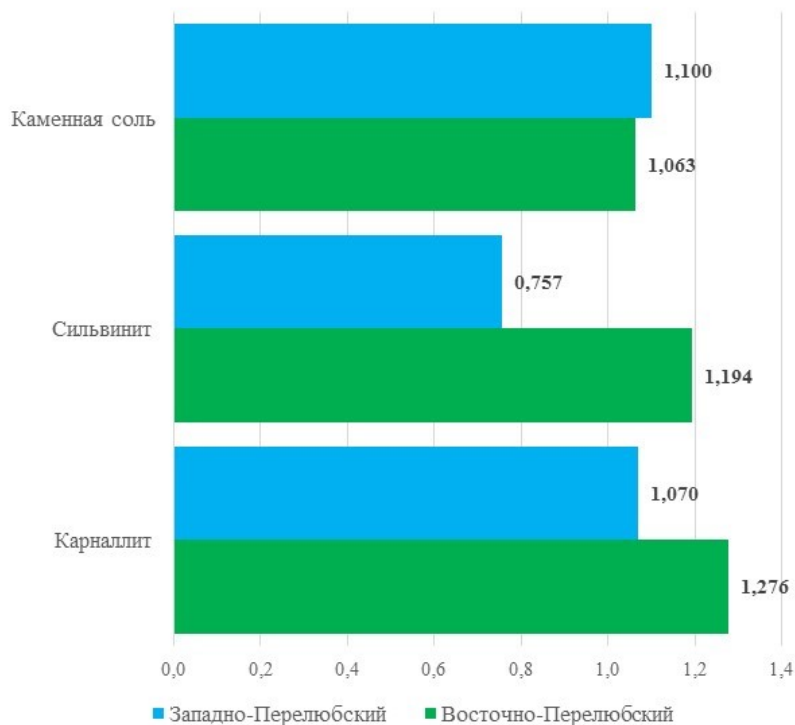




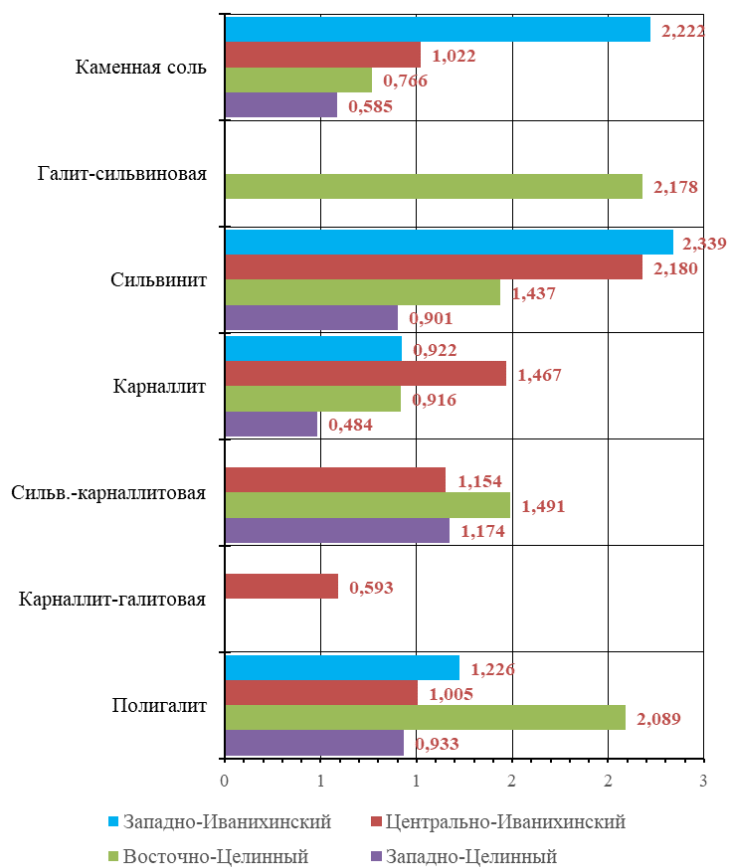
**Рис. 1.** Диаграмма распределения суммарного содержания горючих газов ( $CH_4+H_2$ ) в компонентном составе связанных газов в образцах пород на Западно- и Восточно-Перелюбских лицензионных участках



**Рис. 2.** Диаграмма распределения содержания метана ( $CH_4$ ) в компонентном составе связанных газов в породах на Иванихинских и Целинных лицензионных участках



**Рис. 3.** Диаграмма распределения суммарного содержания углеводородов метанового ряда ( $C_2-C_5$ ) в компонентном составе связанных газов в образцах пород на Западно- и Восточно-Перелубских лицензионных участках



**Рис. 4.** Диаграмма распределения суммарного содержания углеводородов метанового ряда ( $C_2-C_5$ ) в компонентном составе связанных газов в породах на Иванихинских и Целинных лицензионных участках

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ,  
проект № 20-45-596017 р\_НОЦ\_Пермский край

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванов О.В. Научно-учебный измерительный комплекс для изучения газоносности горных пород по связанным газам // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2012. – С. 223-225.
2. Инструкция по эксплуатации планетарных шаровых мельниц тип РМ100/РМ200. Retsch GmbH & Co. КГ, Наан, Germany, Doc.Nr. D 98.540/640.9999. –2004. –32 с.
3. Медведев И.И., Полянина Г.Д. Газовыделения на калийных рудниках. – М.: Недра, 1974. – 163 с.
4. 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.
5. 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.
6. Andreyko S.S., Lyalina T.A. Rockburst from floors // Soils and Rocks. – 2019. – V. 42, № 1. – P. 77-82. DOI: 10.28927/SR.421077.
7. Litvinovskaya N.A., Andreiko S.S. Modeling sudden failure of floor of underground excavations in under- mined salt rock mass // Eurasian mining. – 2015. – № 2 (24). – P. 15-17.
8. Береснев С.П., Сенюк В.В., Гончар В.И., Андрейко С.С., Литвиновская Н.А. Исследование меха- низма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.31-33.
9. 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. Нефтегазо- вое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 280-290. – DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.9.
10. Андрейко С.С., Бобров Д.А., Нестеров Е.А., Лукьянец Е.В. Оценка газоносности и газодинамиче- ских характеристик пород соляных и глинисто-карбонатных пачек на шахтном поле рудника второ- го рудоуправления ОАО «Беларуськалий» // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 270-279. – DOI:10.15593/2712-8008/2020.3.7.
11. Andreiko S.S. Statistical criteria and estimation results for regularities of gas-dynamic phenomenon distri- bution in potash deposits // Journal of Mining Science. – 2003. – V. 39, № 4. – P. 354-363.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.2.17

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ТЕХНИКИ С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

Е.Г. Кузьминых, Л.Ю. Левин, С.В. Мальцев  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В данной статье рассмотрен состав рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания. Приведены результаты исследования распространения ядовитых продуктов выхлопных газов в вентиляционной сети рудника в условия проветривания разрабатываемых горизонтов, а также преобразования монооксида азота до диоксида в рудничных условиях по тракту движения воздуха.

**Ключевые слова:** рудник, система вентиляции, техника с ДВС, выхлопные газы, оксиды азота, разрабатываемое месторождение.

#### Введение

Отработка месторождений полезных ископаемых сопровождается различными техно- логическими процессами, обеспечивающими извлечение полезного ископаемого из

недр на поверхность. Одним из процессов является транспортирование горной массы непосредственно от мест ее отбойки до мест загрузки для дальнейшей доставки на дневную поверхность. На многих рудниках, ведущих отработку рудных месторождений, для этих целей применяется самоходное оборудование с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Использование техники ДВС в вентиляционной сети формирует свои особенности рудничной атмосферы, а также напрямую влияет на безопасность ведения горных работ.

### Основная часть

В настоящее время требования к концентрациям ядовитых компонентов выхлопных газов, содержащихся в рудничной атмосфере, регламентируются Федеральными нормами и правилами [1]. В соответствии с требованиями п. 151 ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» концентрация кислорода в горных выработках должна составлять не менее 20%, а концентрации ядовитых газов (паров) не должны превышать значений, указанных в таблице 1.

Таблица 1

Предельно-допустимые концентрации ядовитых газов

Наименование	Формула	Предельно-допустимая концентрация газа в действующих шахтах	
		% по объему	мг/м <sup>3</sup>
Оксид углерода (оксид углерода)	CO	0,0017	20
Оксиды азота (оксиды азота) в пересчете на NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	0,00026	5
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	0,00038	10

Кроме того, требования к контролю концентраций выхлопных газов регламентированы следующими пунктами [1]:

372. Количество свежего воздуха, подаваемого в выработки, где работают машины с ДВС, должно обеспечить содержание кислорода в воздухе не менее 20% (по объему). Концентрация вредных продуктов, с учетом выхлопа машин в рудничной зоне, не должна превышать величин, указанных в Правилах.

375. Содержание окиси углерода и окислов азота в отработавших газах двигателей машин проверяется перед спуском в шахту, а также в процессе эксплуатации в подземных условиях в сроки, предусмотренные настоящими Правилами.

380. В период эксплуатации состав неразбавленных отработавших газов двигателя проверяется после газоочистки на режимах холостого хода не реже одного раза в месяц на окись углерода и окислы азота.

Запрещается эксплуатация машин в горных выработках объема воздуха, в которых недостаточно для разбавления выхлопных газов до предельно допустимых концентраций, установленных в таблице. Анализ состава выхлопных газов должен быть произведен перед началом эксплуатации машины в подземных условиях, после каждого ремонта, регулировки двигателя или продолжительного (более двух недель) перерыва в работе и при заправке топливом новой марки.

381. При работе машин с двигателями внутреннего сгорания объем подаваемого в выработки воздуха должен обеспечить снижение вредных примесей в исходящей струе ниже предельно допустимых концентраций. Состав рудничной атмосферы в местах рабо-

ты машин должен определяться на окись углерода и окислы азота (у кабины машиниста) не реже одного раза в неделю, а в шахтах, опасных по газу, в соответствии со специальными мероприятиями по ведению горных работ в условиях «газового режима».

В соответствии с данными требованиями в условиях одного медно-колчеданного рудника проведено исследование распространения продуктов выхлопных газов в шахтной вентиляционной сети. Объектом исследования является рудник с подземным способом добычи полезного ископаемого, находящийся в процессе одновременного строительства и отработки участка нового месторождения. Разрабатываемое месторождение вскрыто двумя наклонными съездами, пройденными с действующего рудника. Запасы действующего рудника в настоящее время отработаны, работы на данном участке не ведутся. На участке действующего рудника находятся клетевой, скиповой и вентиляционный стволы, а также штольня в борту отработанного карьера. На нижних горизонтах разрабатываемого месторождения ведутся горно-капитальные работы.

Свежий воздух поступает на участок разрабатываемого месторождения за счет работы подземной главной вентиляторной установки, расположенной на вентиляционном наклонном съезде. По вентиляционному наклонному съезду осуществляется движение воздуха до рабочих горизонтов разрабатываемого месторождения. Выдача исходящей струи воздуха осуществляется по транспортному наклонному съезду на поверхность через вентиляционный и скиповой ствол, расположенные на участке действующего рудника. Данный этап развития вентиляционной сети соответствует промежуточной стадии реализации проектной схемы вентиляции до момента проведения сбойки со строящимся стволом. Упрощенная схема проветривания объекта исследования представлена на рисунке 1.

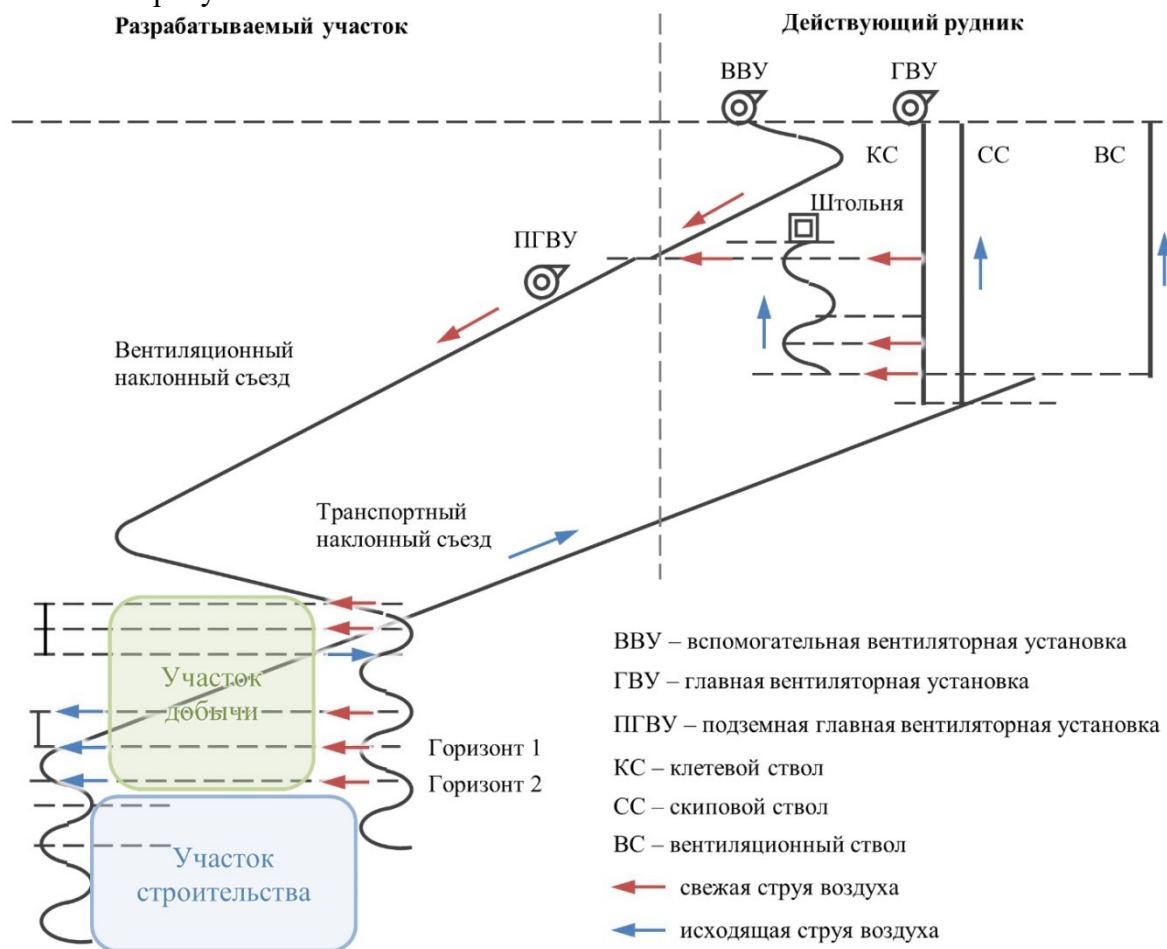


Рис. 1. Схема проветривания разрабатываемого месторождения

Загрузка породы и полезного ископаемого в шахтные самосвалы осуществляется погрузочно-доставочными машинами (ПДМ) с дизельными двигателями на участках ведения горных работ. Далее самосвалами производится транспортировка по двум трактам:

- 1) полезное ископаемое от очистных камер доставляется к комплексу загрузки скипов действующего рудника по транспортному наклонному съезду;
- 2) пустая порода доставляется на поверхность по вентиляционному наклонному съезду через штольню в борту отработанного карьера.

Основные типы техники с ДВС, занятой на подземных горных работах, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Применяемая самоходная техника  
с двигателями внутреннего сгорания

Марка техники	Тип техники	Мощность двигателя	Экологический стандарт токсичности двигателя
CAT AD-45	Самосвал	596 л.с.	U.S. EPA Tier 3
ТН-545	Самосвал	612 л.с.	U.S. EPA Tier 2
ЛН-514	Погрузочно-доставочная машина	348 л.с.	U.S. EPA Tier 2
ЛН-517	Погрузочно-доставочная машина	421 л.с.	U.S. EPA Tier 2

Экологический класс применяемой техники соответствует уровню Tier 2/Tier 3. В соответствии с данными стандартами токсичности производители устанавливают предельные нормы по выбросам ядовитых компонентов. Требования к норме выбросов для данных экологических классов двигателей приведены в таблице 3 [2].

Таблица 3

Предельные выбросы загрязняющих веществ  
в соответствии с экологическим классом

Название	Мощность двигателя	СО	NO <sub>x</sub>
Tier 2	101–175 л.с.	5,0 г/кВт ч	6,6 г/кВт ч
	176–750 л.с.	3,5 г/кВт ч	
Tier 3	101–175 л.с.	5,0 г/кВт ч	4,0 г/кВт ч
	176–750 л.с.	3,5 г/кВт ч	

Исходя из данных экологического класса применяемой техники с ДВС, преобладающим компонентом выхлопных газов являются оксиды азота в шахтной сети.

В период исследования газового состава скиповой ствол находился в ремонте, в связи с чем движение шахтных самосвалов осуществлялось на поверхность по вентиляционному наклонному съезду. В шахтной вентиляционной сети в работе находилось порядка 24 единиц техники, из которых 7 ПДМ находились в работе на добычных и гор-



но-капитальных работах и 14 единиц самосвалов осуществляли транспортировку горной породы на поверхность.

### Результаты исследования

Исследования газового состава рудничного воздуха на предмет распространения ядовитых компонентов выхлопных газов в шахтной вентиляционной сети проводились переносными газоанализаторами Drager. В качестве контролируемых газов приняты оксид углерода (CO) и окислы азота (NO и NO<sub>2</sub>) в соответствии с требованиями Правил безопасности [1].

Ввиду особенности текущего состояния вентиляционной сети выхлопные газы от техники с ДВС проходили через весь участок разрабатываемого месторождения. Результаты измерений представлены на рисунке 2.

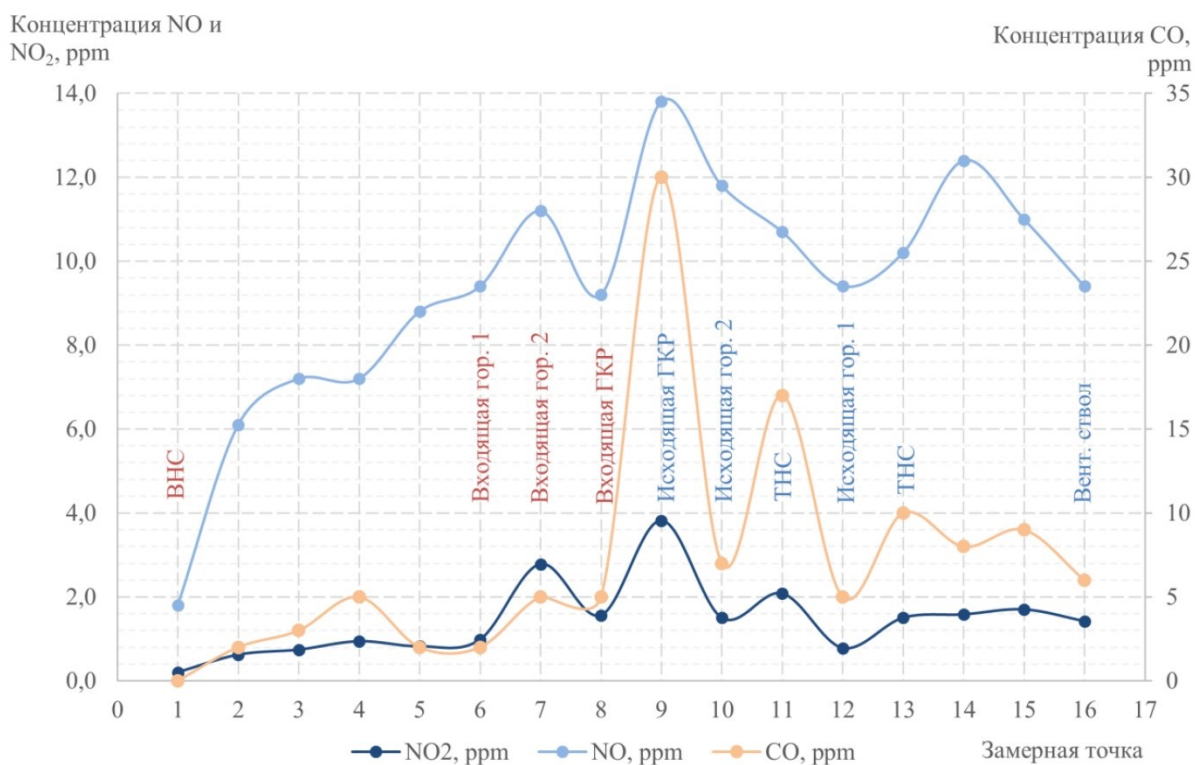


Рис. 2. Результаты измерений распределения концентраций выхлопных газов

Анализ данных, представленных на рисунке 2, показал, что можно выделить динамику накопления продуктов выхлопных газов в вентиляционной сети по тракту движения воздуха. На рисунке 2 можно выделить участок с повышенной концентрацией оксида углерода и окислов азота в точке 9 относительно начальной концентрации в точке 8, которая поступает на проветривание горно-капитальных работ. Прирост концентраций на данном участке вызван недостаточным уровнем проветривания горных работ, в связи с чем процесс выноса ядовитых продуктов взрывных работ и работы техники с ДВС значительно увеличивается во времени, что приводит к накоплению ядовитых газов на данном участке.

Далее по тракту движения исходящей струи воздуха происходит уменьшение концентраций ядовитых газов за счет разбавления утечками воздуха с вентиляционного наклонного съезда, а также исходящими струями воздуха с горизонтов. В целом можно отметить, что окислы азота в шахтной вентиляционной сети имеют схожий характер изменений по тракту движения вентиляционной струи.

Монооксид азота при взаимодействии с кислородом в атмосферных условиях вступает в реакцию окисления, в результате чего происходит его окисление до диоксида азота. [3] Проведенные экспериментальные измерения показывают, что в рудничной атмосфере исследуемого рудника данное преобразование не наблюдается в значительной мере.

Тракт движения воздуха по участку обрабатываемого месторождения составляет порядка 10 км, из которых 4 км приходится на движение исходящей струи по транспортному наклонному съезду до вентиляционного ствола. При поступлении выхлопных газов в вентиляционную сеть на вентиляционном наклонном съезде время нахождения ядовитых продуктов составляет более 2 часов по наиболее удаленному тракту. На рисунке 3 приведено процентное соотношение компонентов монооксида азота и диоксида азота по результатам измерений. В данном случае за единицу принималась сумма монооксида и диоксида азота без учета переводных коэффициентов.

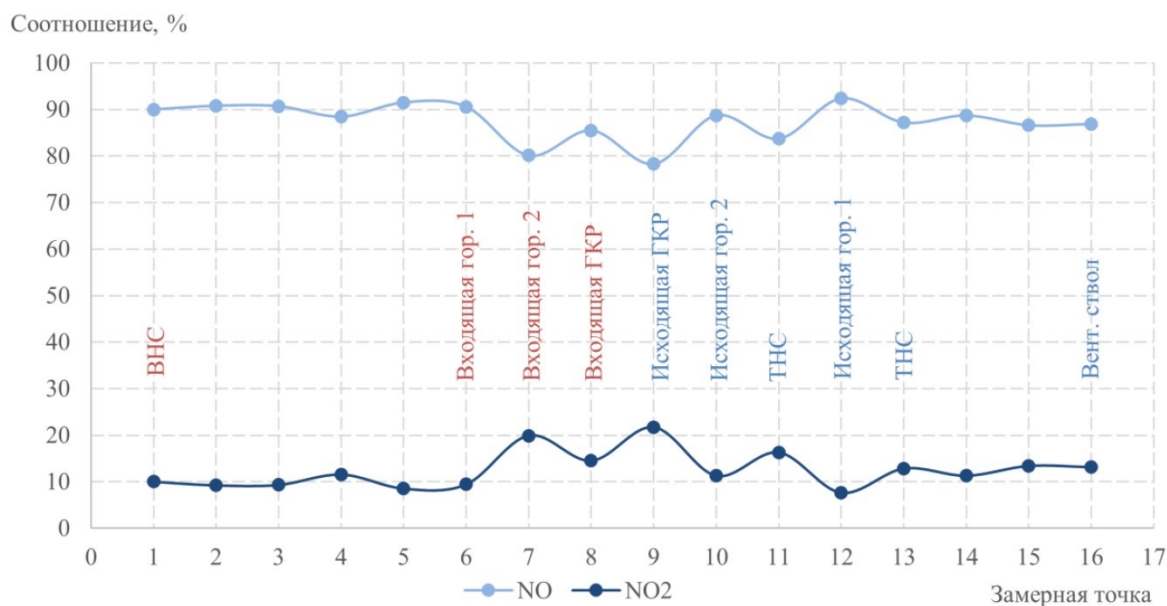


Рис. 3. Результаты измерений распределения концентраций выхлопных газов

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что изменение соотношения монооксида азота и диоксида азота от выхлопных газов в шахтной вентиляционной сети находятся в пределах 14%. При этом наибольшие изменения происходят непосредственно на рабочих горизонтах рудника, где присутствует разветвленная сеть выработок, приводящая к изменению газового состава от различных источников, а также меньшие объемы воздуха. На протяженных участках выработок в виде наклонных съездов данное соотношение составляет порядка 8%. В связи с этим можно сделать предположение о том, что в условиях исследуемого рудника окисление монооксида азота в диоксид не превышает 14%. Таким образом, преобразование монооксида азота в диоксид в рудничных условиях занимает достаточно продолжительный период времени, который превышает время нахождения газовой смеси в шахтной сети [4, 5].

В Санитарных правилах и нормах [6] отсутствуют требования к ПДК воздуха рабочих зон по компоненту NO, однако присутствует ПДК диоксида азота NO<sub>2</sub> (2 мг/м<sup>3</sup> = 1,0 ppm) и суммы оксидов азота в пересчете на NO<sub>2</sub> (5 мг/м<sup>3</sup> = 2,6 ppm). В связи с этим

возникает вопрос о подходе к определению суммы оксидов азота в пересчете на  $\text{NO}_2$  при проведении измерений отдельных компонентов.

В настоящее время зависимость определения суммы оксидов азота в пересчете на  $\text{NO}_2$  приведена в Методическом пособии по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух [7]:

$$M_{\text{NO}_x}(\text{в пересчете на } \text{NO}_2) = M_{\text{NO}_2} + 1,53 \cdot M_{\text{NO}},$$

где  $M_{\text{NO}_2}$  – мощность выброса компонента диоксида азота;  $M_{\text{NO}}$  – мощность выброса компонента монооксида азота;  $M_{\text{NO}_x}(\text{в пересчете на } \text{NO}_2)$  – мощность выброса суммы оксидов азота в пересчете на  $\text{NO}_2$ .

В данной зависимости учитывается полный пересчет  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$ . С учетом выполненных исследований выполнен расчет суммы оксидов азота с учетом частичной трансформации  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  пределах 14%. Сравнение рассчитанных концентраций суммы оксидов азота в пересчете на  $\text{NO}_2$  с учетом полного и частичного перехода представлены на рисунке 4.

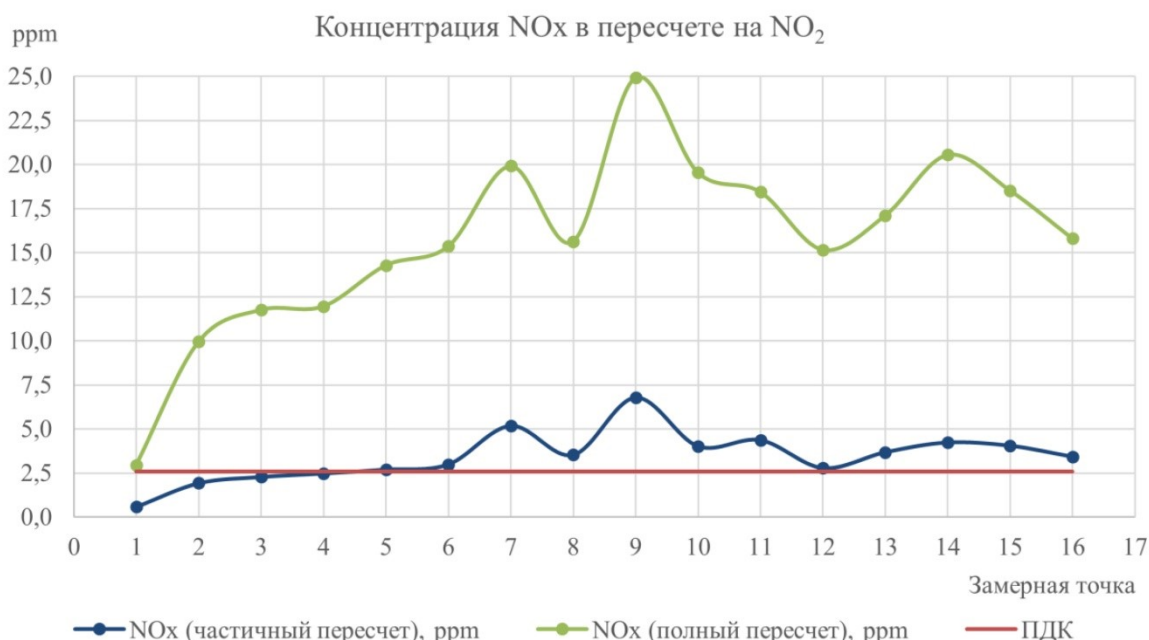


Рис. 4. Результаты расчета суммы оксидов азота в пересчете на  $\text{NO}_2$

При расчете суммы оксидов азота в пересчете на  $\text{NO}_2$  при полном превращения  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$  значения оказываются выше в среднем в 4,7 раза по сравнению с результатами частичного перехода. В результате рассчитанные значения при полном учете  $\text{NO}$  оказываются выше ПДК на всех замерных точках, включая свежую струю воздуха.

В связи с этим необходимо определить условия преобразования монооксида азота в диоксид в шахтных условиях и разработать подход к пересчету суммы окислов азота в на  $\text{NO}_2$ , как отмечают авторы статей [8-10].

### Выводы

Проведенные исследования распространения компонентов выхлопных газов в шахтной вентиляционной сети позволяют сделать следующие выводы.

1. При работе техники с ДВС экологических классов Tier 2/ Tier 3, либо аналогичных Stage 2/ Stage 3, в шахтную вентиляционную сеть поступают преимущественно оксиды азота. Монооксид азота в выхлопных газах составляет более 85%.
2. Монооксид азота в рудничных условиях исследуемого объекта окисляется до диоксида азота в пределах 14% за время нахождения в вентиляционной сети. Дальнейший процесс окисления происходит в атмосфере.
3. Полный пересчет монооксида азота до диоксида для условий рудника в соответствии с требованиями правил безопасности [1] приведет к завышенным значениям измеряемых концентраций. Кроме того, отсутствие ПДК для монооксида азота в санитарных правилах и нормах приводит к отсутствию возможности отдельного контроля данных параметров для воздуха рабочих зон.
4. Необходимо разработать способы определения суммы оксидов азота в пересчете на NO<sub>2</sub>, позволяющие учитывать скорость окисления монооксида азота до диоксида в зависимости от конкретных условий объекта.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения  
по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.  
(рег. номер 122012000396-6).*

## 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. Code of Federal Regulations, 40. Part 1039. 2012. – CONTROL OF EMISSIONS FROM NEW AND IN-USE NONROAD COMPRESSION-IGNITION ENGINES. – Текст электронный. – URL: <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?mc=true&node=pt40.36.1039&rgn=div5>. (Дата обращения 23.05.2023).
3. Карапетьянц М.Х., Дракин С.И. Общая и неорганическая химия. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1992. – 588 с.: ил.
4. Гришин Е.Л., Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г. Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляция в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 280-290. – DOI:10.15593/2712-8008/2020.3.8.
5. Накаряков Е.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Колесов Е.В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателями внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 5. – С. 41-47. – DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47.
6. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. гл. сан. врачом РФ 28.01.2021; зарегистрированы в Минюсте РФ 29.01.2021, № 62296. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115>. (с изменениями на 30 декабря 2022 года).
7. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. (доп. и перераб.) / ОАО «НИИ Атмосфера». – СПб., 2012. – 224 с.
8. Накаряков Е.В. Натурные исследования рудничной атмосферы при работе техники с двигателями внутреннего сгорания // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 113-118. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.22.
9. 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.
10. Серегин А. С., Фазылов И.Р., Прохорова Е.А. Обоснование безопасных условий работы горнотранспортных машин с двигателями внутреннего сгорания по фактору выделения загрязняющих веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 11. – С. 37-51. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_11\_0\_37.

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СКЛАДЧАТЫХ СТРУКТУР  
СИЛЬВИНИТОВОГО ПЛАСТА АБ,  
ОПАСНЫХ ПО ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ЯВЛЕНИЯМ,  
В УСЛОВИЯХ ШАХТНОГО ПОЛЯ РУДНИКА БКПРУ-2  
ПАО «УРАЛКАЛИЙ»**

Е.В. Лукьянец

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** Методы локального прогнозирования зон, опасных по газодинамическим явлениям, в настоящее время не учитывают структурно-тектоническое строение калийных пластов, элементы которого во многом определяют газодинамическую опасность калийных пластов и вмещающих пород. Поэтому целью данной работы стала оценка вероятности прогнозирования антиклинальных складок с помощью сети подготовительных выработок в меридиональном и широтном направлениях, а также выбор оптимального метода интерполяции структурно-тектонического строения сильвинитового пласта АБ. Для оценки геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки применяемой системой подготовительных выработок при панельно-блоковой схеме подготовки участков шахтного поля были произведены расчеты по методу вычисления для круглых и методу вычисления линейных целей при параллельной схеме поиска и субмеридианальном расположении антиклинальных складок. В процессе проведения исследований сформулированы гипотезы нахождения антиклинальной складки третьего порядка по классификации Б.М. Голубева. Произведен выбор метода пространственной интерполяции данных с целью прогнозирования складчатых структур, опасных по газодинамическим явлениям. На примере юго-восточной части шахтного поля рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» построена пространственная модель поверхности сильвинитового пласта АБ с помощью метода скользящего среднего. Полученные результаты будут использоваться при разработке метода локального прогнозирования газодинамических явлений, основанного структурно-тектоническом анализе строения калийных пластов.

**Ключевые слова:** калийный пласт, геометрическая вероятность, антиклинальная складка, пространственная интерполяция, очаг газодинамического явления, поверхность пласта сильвинитового пласта АБ, подготовительные выработки, складчатость, газодинамическое явление.

### **Введение**

Статистический анализ геологических условий проявления газодинамических явлений при отработке сильвинитового пласта АБ показал, что к антиклинальным складкам третьего порядка по классификации к.г.-м.н. Б.М. Голубева приурочено более 70% от их общего числа [1-4]. Так, при ведении подготовительных и очистных работ в области распространения антиклинальной складки комбайн попадает в зону с двумя потенциальными очагами газодинамических явлений. Во-первых, осуществляется подрезка в кровле выработки пласта каменной соли Б-В (подрезка на величину более 0,4 м является предупредительным признаком газодинамического явления, а на величину более 0,6 м – предвестником газодинамического явления) и вскрытие карналлитового пласта В, наиболее газоносного и опасного по газодинамическим явлениям. Во-вторых, горной выработкой происходит пересечение совокупности трещин и расслоений, образовавшихся в пределах сформировавшейся складчатой структуры и заполненных свободным газом под давлением, представляющих собой потенциальный очаг газодинамического явления, сформировавшийся в соляном породном массиве [6-12].

### **Оценка вероятности прогнозирования антиклинальной складки с помощью сети подготовительных выработок в меридиональном и широтном направлениях**

Для оценки геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки были использованы два метода: метод вычисления для круглых и линейных целей при па-



раллельной схеме поиска [14-16]. При использовании метода для круглых целей предполагается, что цель, которую нужно найти, является эллипсом. В нашем случае эллипсом будет являться область распространения антиклинальной складки с размерами по ширине 20-100 м, по длине 100-300 м (рис. 1).

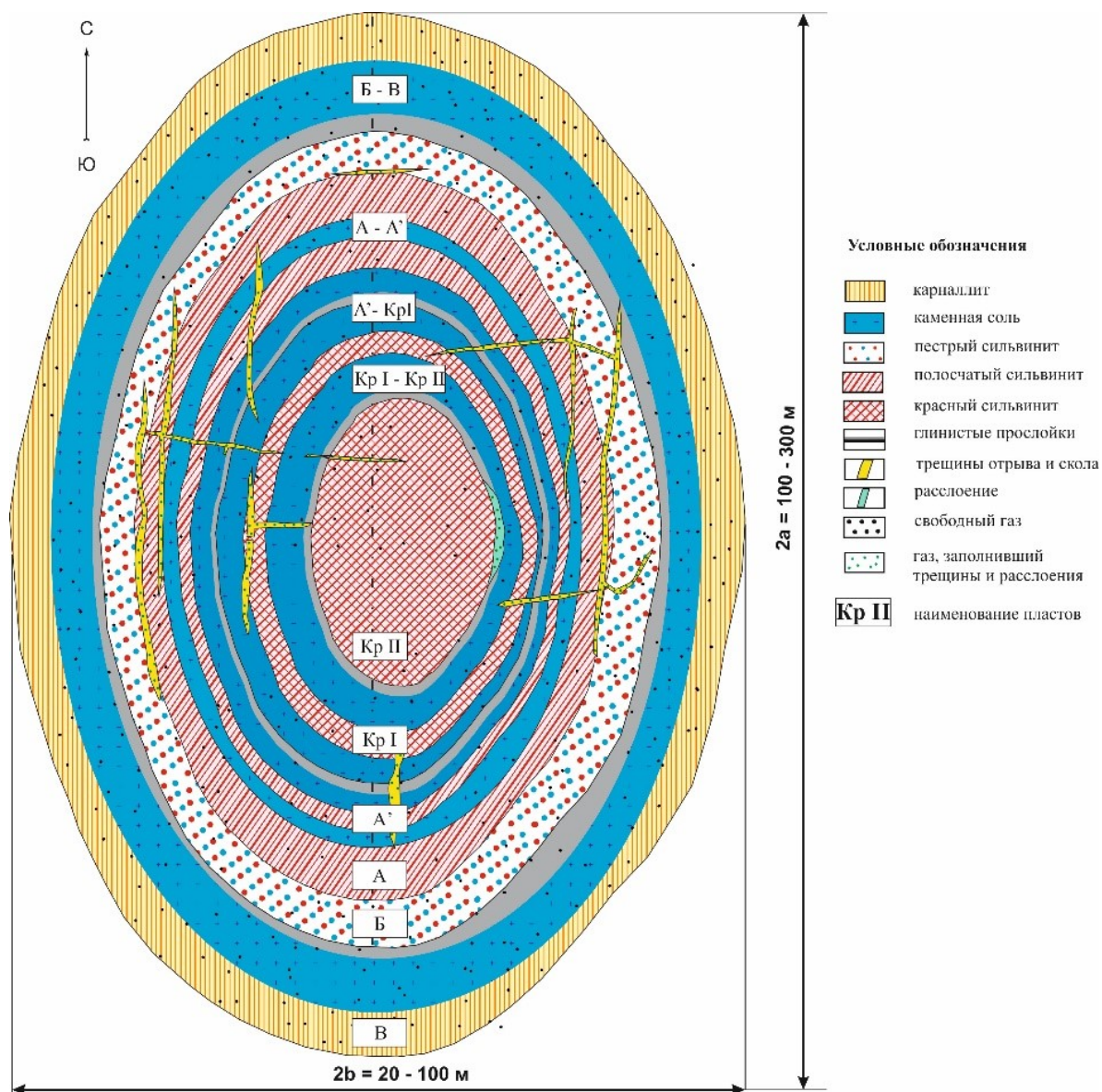


Рис. 1. Горизонтальный разрез антиклинальной складки третьего порядка

Схема поиска в данном случае состоит в проведении серии параллельных прямых на расстоянии D – в нашем случае серии подготовительных выработок на расстоянии 200 м и 800 м (при панельно-блоковой схеме подготовки участков шахтного поля). Вероятность того, что антиклинальная складка (меньшая, чем расстояние между профилями) будет пересечена некоторой линией определяется выражением:

$$P = \frac{p}{\pi D},$$

где D – расстояние между профилями (200 и 800 м); p – периметр эллиптической цели, рассчитываемый по формуле:



$$p = 2\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}},$$

где  $a$  и  $b$  – значения полуосей эллипса (половины значений ширины и длины антиклинальной складки (рис. 1).

Метод для линейных целей при расчете геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки используется, если одна из осей эллипса может быть настолько короткой, что цель становится случайно ориентированной линией. В нашем случае длина антиклинальной складки преобладает над шириной, поэтому вероятность того, что антиклинальная складка длиной  $2a$ , брошенная на множество параллельных прямых (профилей горных выработок), расположенных на расстоянии  $D$  (200 м и 800 м) друг от друга, пересечет хотя бы одну из этих прямых будет определяться выражением:

$$P = \frac{4 \times a}{\pi \times D}.$$

### Результаты расчета геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки

Результаты расчета геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки методом вычисления для круглых целей (параллельная схема поиска и субмеридиональном направлении складки) приведены на графиках, представленных на рисунке 2.

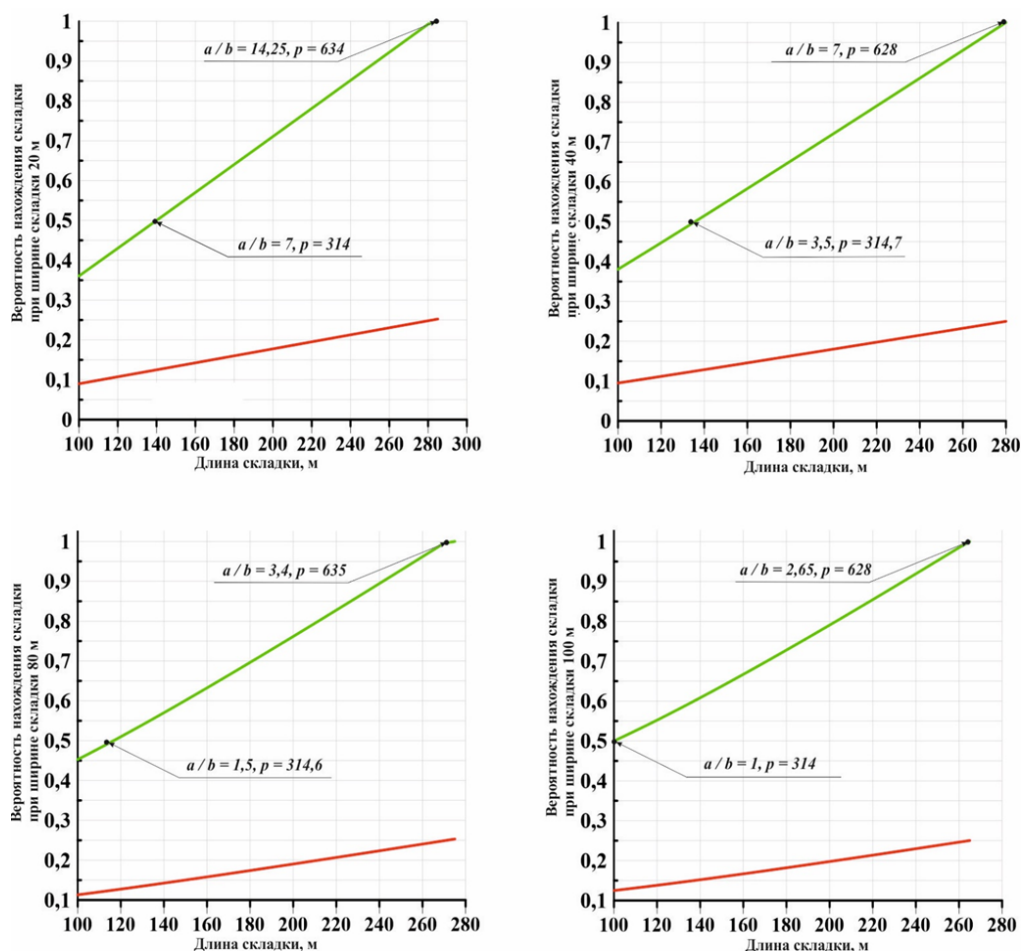


Рис. 2. Результаты расчета геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки методом вычисления для круглых целей (параллельная схема поиска и субмеридиональном направлении складки)

Красной линией на графиках (рис. 2) отображена геометрическая вероятность нахождения антиклинальной складки при расстоянии между профилями горных выработок 800 м. Геометрическая вероятность при этом будет изменяться от 0,09 (при ширине складки 20 м и длине 100 м) и достигнет максимального значения 0,25 при длине складки от 270 м и любой ширине складки. При расстоянии между профилями 200 м (зеленые линии на графиках на рис. 2) равновероятностная гипотеза прогнозирования антиклинальной складки третьего порядка характеризуется периметром складки 314 м, что соответствует отношению параметров длины  $2a$  к ширине  $2b$  складки:  $a/b = 7$  - при ширине складки 20 м,  $a/b = 3,5$  - при 40 м,  $a/b = 2,1$  - при 60 м,  $a/b = 1,5$  - при 80 м,  $a/b = 1$  - при 100 м. При увеличении отношения параметров длины к ширине при любой ширине складки геометрическая вероятность нахождения антиклинальной складки стремится к 1, и достигает вероятности, равной единице, при следующих параметрах складки:

- при ширине складки 20 м –  $a/b = 14,25$ ,  $p = 634$  м;
- при ширине складки 40 м –  $a/b = 7$ ,  $p = 628$  м;
- при ширине складки 60 м –  $a/b = 4,67$ ,  $p = 635$  м;
- при ширине складки 80 м –  $a/b = 3,4$ ,  $p = 635$  м;
- при ширине складки 100 м –  $a/b = 2,65$ ,  $p = 628$  м.

Результаты расчета геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки методом вычисления для линейных целей (параллельная схема поиска и субмеридиональное направление складки) представлены в таблице 1.

**Таблица 1**

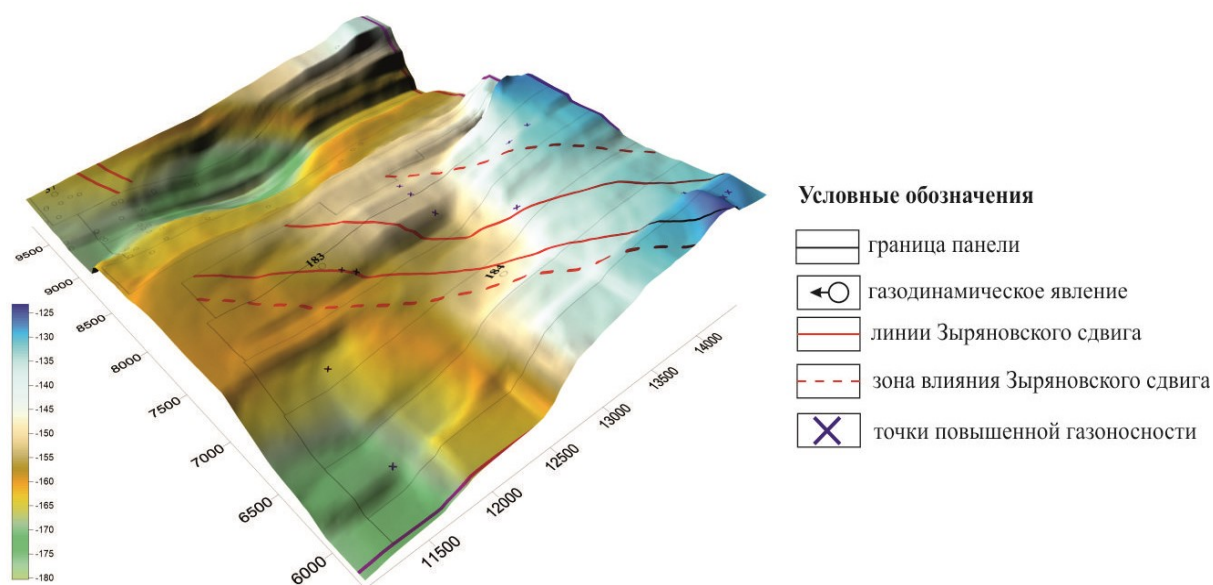
Результаты расчета геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки методом вычисления для линейных целей (параллельная схема поиска и субмеридиональном направлении складки)

Длина антиклинальной складки, м	Геометрическая вероятность нахождения антиклинальной складки при расстоянии между профилей		Периметр складки, м
	200 м	800 м	
100	0,32	0,0003	226 - 314
120	0,38	0,0003	270-347
140	0,45	0,0004	314-382
156	0,50	0,0004	349-411
160	0,51	0,0004	358-419
180	0,57	0,0005	402-457
200	0,64	0,0005	446-496
220	0,70	0,0006	490-537
240	0,76	0,0006	535-577
260	0,83	0,0007	579-619
280	0,89	0,0007	623-660
300	0,96	0,0008	668-702

По результатам расчета геометрической вероятности нахождения антиклинальной складки методом вычисления для линейных целей, представленных в таблице 1, можно увидеть, что при расстоянии между профилями 800 м вероятность будет ничтожно мала и не превысит 0,008. Равновероятностная гипотеза поиска антиклинальной складки при расстоянии между профилями 200 м будет соответствовать длине складки 156 м (при этом периметр складки может находиться в пределах 349-411 м) и стремиться к 1 с увеличением длины.

### Выбор метода пространственной интерполяции структурно-тектонического строения сильвинитового пласта АБ

Методы пространственной интерполяции позволяют оценить положение пласта АБ в точках, где не известны его координаты. Известными координатами считаются глубинная координата  $Z$  кровли сильвинитового пласта АБ, координаты точек исследования кровли сильвинитового пласта АБ на плоскости  $XY$ . Перечисленные координаты были получены путем снятия точек с геологических профилей горных выработок, которые рисуются геологами на рудниках ПАО «Уралкалия» вручную. Для выбора метода пространственной интерполяции используется программный комплекс SURFER, который предлагает 12 методов пространственной интерполяции. Для оценки рассеяния возможных значений случайной величины вокруг ее среднего значения рассмотрено среднее квадратическое отклонение [13]. Выбор метода интерполяции производится с целью прогнозирования складчатых структур, опасных по газодинамическим явлениям. Поэтому при вводе параметров интерполяции необходимо учитывать параметры складчатых структур, а именно, антиклинальных складок третьего порядка, амплитуда которых начинается от 3 м и может достигать 12 м, ширина от 20 до 100 м, длина до 300 м [13, 17]. Наименьшее значение среднеквадратического отклонения (12,64) было получено при использовании метода скользящего среднего. В результате построена пространственная модель сильвинитового пласта АБ юго-восточной части шахтного поля рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий», основанная на интерпретации данных с помощью метода скользящего среднего (рис. 3).



**Рис. 3.** Пространственная модель сильвинитового пласта АБ юго-восточной части шахтного поля рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий», основанная на интерпретации данных с помощью метода скользящего среднего

Результаты пространственной интерполяции с помощью метода скользящего среднего можно использовать для местонахождения антиклинальных складок третьего порядка, в пределах которых произошло около 70% от общего количества газодинамических явлений в условиях рудника БКПРУ-2. Полученные результаты будут использоваться при разработке метода локального прогнозирования газодинамических явлений, основанного на структурно-тектоническом анализе строения калийных пластов.

### Выводы

Результаты оценки возможности прогнозирования складчатых структур сильвинитового пласта АБ, опасных по газодинамическим явлениям, в условиях шахтного поля рудника БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» позволяют сделать следующие выводы.

1. При проходке подготовительных выработок и очистных камер в пределах антиклинальных складок третьего порядка проходческо-очистной комбайн пересекает область с двумя потенциальными очагами газодинамических явлений: осуществляется подрезка в кровле выработки пласта каменной соли Б-В, выполняющего функцию «защитной пачки» и вскрытие карналлитового пласта В; пересечение совокупности трещин и расслоений, заполненных свободным газом под давлением, в пределах самой складчатой структуры.

2. Прогнозирование складчатых структур – антиклинальных складок третьего порядка является возможным при расстоянии между профилями подготовительных горных выработок 200 м и размерами складки по ширине 20-100 м, по длине 100-300 м. При этом равновероятностная гипотеза прогнозирования антиклинальной складки третьего порядка реализуется для периметра складки 314 м, что соответствует отношению параметров длины  $a$  к ширине  $b$  складки:  $a/b = 7$  – при ширине складки 20 м,  $a/b = 3,5$  – при 40 м,  $a/b = 2,1$  – при 60 м,  $a/b = 1,5$  – при 80 м,  $a/b = 1$  – при 100 м. При увеличении отношения параметров  $a/b$  при любой ширине складки вероятность прогнозирования антиклинальной складки стремится к 1.

3. Результаты пространственной интерполяции данных о гипсометрии пласта АБ с помощью метода скользящего среднего можно использовать для прогнозирования антиклинальных складок третьего порядка. Результаты пространственной интерполяции данных могут быть использованы для разработки локального метода прогнозирования газодинамических явлений, основанного структурно-тектоническом анализе строения калийных пластов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голубев Б.М. Морфологические особенности складок внутри калийной толщи Верхнекамского месторождения и условия их формирования // Докл. АН СССР. – 1972. – Т. 204, № 3. – С. 671-673.
2. Голубев Б.М. О несогласном залегании пород внутри соляной толщи Верхнекамского месторождения // Геология и гидрогеология соляных месторождений. – Л., 1972. – С. 8-12. – (ВНИИГ. Вып. 56).
3. Голубев Б.М. Строение соляной толщи Верхнекамского месторождения: автореф. дис. ... к.г.-м.н. / Голубев Борис Михайлович. – Пермь: 1972. – 31 с.
4. Голубев Б.М. Особенности внутреннего строения соляной толщи Верхнекамского месторождения // Проблемы соленакпления: сб. / Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР. – Новосибирск, 1977. – Т. 2. – С. 115-118.
5. 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.

6. 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.
7. 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.
8. Andreyko S.S., Lyalina T.A. Rockburst from floors // Soils and Rocks. – 2019. – V. 42, 1. – P. 77-82. – DOI: 10.28927/SR.421077.
9. Андрейко С.С. Современное состояние проблемы газодинамических явлений на Верхнекамском месторождении калийных солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2009 г. – Пермь, 2010. – С. 211-213.
10. Андрейко С.С. Мониторинг газодинамической опасности при ведении подземных горных работ на рудниках ОАО «Уралкалий»: современное состояние и направления совершенствования // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 9. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2011. – С. 254-256.
11. Андрейко С.С. Анализ структурно-тектонических условий проявления газодинамических явлений в надвиговых и сдвиговых зонах на шахтных полях рудников БКПРУ-2 и БКПРУ-4 // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 225-228.
12. Андрейко С.С. Геологический механизм дегазации карналлитового пласта Б на участках распространения смешанных солей // Горное эхо. – 2022. – № 3 (88). – С. 55-60. – DOI: 10.7242/echo.2022.3.9.
13. Лукьянец Е.В., Бобров Д.А. Механизм образования очагов газодинамических явлений в складчатых структурах калийных пластов // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 106-114. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.21.
14. Дэвис Дж. Статистический анализ данных в геологии: Пер. с англ. в 2 кн. / Пер. В.А. Голубевой; Под ред Д.А. Родионова. – М.: Недра. 1990. – Кн.1. – 319 с.
15. Дэвис Д.С. Статистический анализ данных в геологии. В 2 кн. / Пер. с англ. В.А. Голубевой; Под ред Д.А. Родионова. – М.: Недра. 1990. – Кн.2. – 427 с.
16. Боровко Н.Н. Статистический анализ пространственных геологических закономерностей – Л.: Недра, 1971. – 174 с.
17. Андрейко С.С., Лукьянец Е.В. Пространственные модели пласта АБ на шахтном поле БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий» // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2023. – №. 1. – С. 523-531.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.2.19

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЙ ТЕХНИКИ С ДВС НА ПРОВЕТРИВАНИЕ ТУПИКОВЫХ КАМЕРООБРАЗНЫХ ВЫРАБОТОК

Е.В. Накаряков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе представлены результаты многопараметрического численного моделирования процесса проветривания тупиковых очистных камер с учетом тепловыделений техники, работающей в очистном пространстве. Произведена оценка влияния тепловой конвекции на распределение скоростей воздуха и концентраций. Показано, что при расчетном количестве воздуха, подаваемом на проветривание тупиковой выработки, концентрация вредных компонентов выхлопных газов в устье выработки имеет одинаковый характер возрастания и асимптоту как с учетом тепловыделений, так и без их учета. При учете теплового расширения выхлопных газов тепловыделениями в пределах очистного пространства для решения задачи эффективности проветривания тупиковых очистных камер можно пренебречь.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, двигатель внутреннего сгорания, выхлопные газы, ядовитые газы, расход воздуха, расчет количества воздуха.

## Введение

В российской нормативной документации [1] отсутствуют требования по проветриванию тупиковых камерообразных выработок, образующихся за счет расширения нарезной выработки до камерообразной при обратном порядке отработки. В связи с недостаточностью требований нормативной документации возникает необходимость исследования эффективности выноса ядовитых примесей выхлопных газов погрузочно-доставочных машин (далее по тексту – ПДМ) с двигателем внутреннего сгорания (далее по тексту – ДВС) из камерного пространства.

Исследованиями состава рудничной атмосферы при работе техники с ДВС занимались многие исследователи, в том числе имеются диссертационные работы [2, 3]. Исследования [2] показали, что реверсирование вентиляционной струи позволяет нормализовать санитарно-гигиенические условия труда в основном участке тупиковой выработки при работе техники с ДВС без увеличения расхода воздуха на проветривание. В продолжение выше описанных исследований в работе [3] на основании математического моделирования доказано, что увеличение объема призабойной зоны за счет использования вентилятора-турбулизатора и проветривания ее двумя последовательными свободными струями обеспечивает нормализацию санитарно-гигиенических условий труда в тупиковой выработке при работе погрузочно-доставочной машины с ДВС без увеличения расхода воздуха на проветривание.

В работах [4-8] рассматривались вопросы проветривания подобного типа горных выработок. Для исследований применялось численное моделирование процесса выноса газов. При численном моделировании немаловажным фактором является параметризация модели.

Настоящая работа является продолжением работ [4-8] и направлена на параметризацию численной модели с точки зрения термодинамической составляющей процесса смешивания горячих выхлопных газов от техники с ДВС с более холодным шахтным воздухом.

## Численная модель

Для моделирования процесса накопления и выноса вредных компонентов, образующихся при работе машин с двигателем внутреннего сгорания ( $\text{CO}$  и  $\text{NO}_x$ ) из камерного пространства вследствие работы в тупиковых горных выработках ПДМ с ДВС использован модуль CFX программного комплекса ANSYS. Задача решается методом RANS, используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса, в частности, уравнение неразрывности, уравнение сохранения импульса и уравнение сохранения энергии. При учете турбулентности потока используется standard k-epsilon модель. Интенсивность турбулентности на входе в расчетную область составляет 2%, масштаб вихрей – 20 см.

В модуле SpaceClaim программного комплекса ANSYS построена модель обобщенной очистной камеры. Геометрические параметры, использованные в модели, соответствуют геометрическим параметрам очистных тупиковых горных выработок подземных рудников Талнахского рудного узла. Для учета теплового потока с поверхности ПДМ построена реальная геометрия машины (см. рис. 1).

На входе в расчетную область задаются массовые расходы воздуха и концентрации газа. На выходе задается нулевое статическое давление. На стенках задается прилипание потока с учетом шероховатости стенки. Расчет пограничного слоя осуществляется с учетом повышенной шероховатости стенок горных выработок, равной 0.03 м.



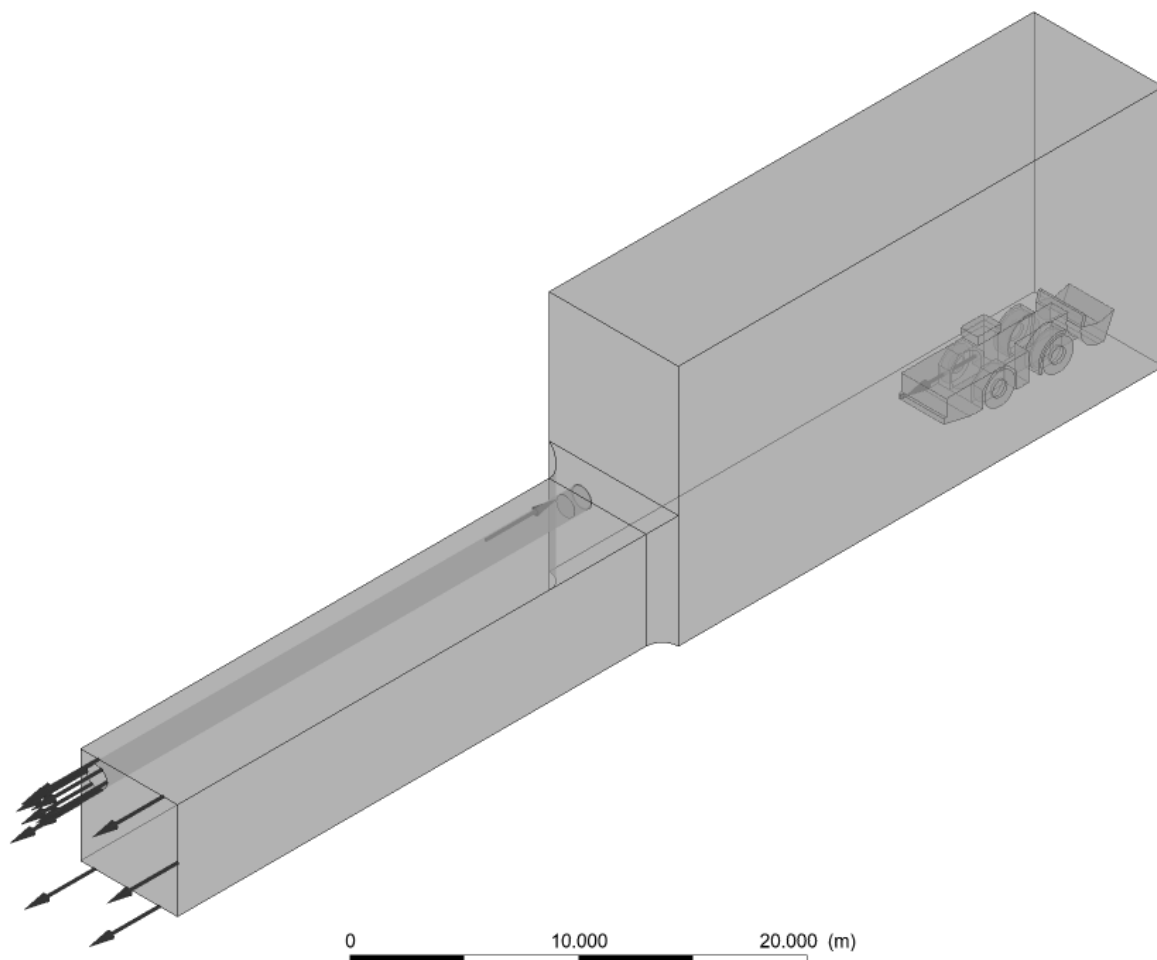


Рис. 1. Расчетная область

### Исходные данные о газовыделениях и тепловыделениях

Источниками тепловыделений в камерном пространстве являются выхлопные газы и поверхность ПДМ. ГОСТом «Оборудование горно-шахтное. Машины погрузочно-доставочные шахтные. Требования безопасности и методы испытаний» регламентируется максимальная температура выхлопных газов, она составляет 70 градусов. Количество выхлопных газов определяется из технической характеристики двигателя с учетом его четырехтактной работы по формуле [9]:

$$g_{\text{вых}} = k \frac{V \cdot n}{2}, \text{ м}^3/\text{с}$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий давление избытка;  $V$  – суммарный рабочий объем цилиндров,  $\text{м}^3$ ;  $n$  – скорость вращения коленчатого вала,  $\text{об}/\text{с}$ .

Для задания равномерного по площади тепловыделения поверхности ПДМ использованы результаты тепловизионной и температурной съемок в шахтных условиях, описанных в работе [10]. В работе приращение температуры воздуха составило 6,5 градусов при работе ПДМ AtlasCopco ST-1030, что соответствует выделению 177 кВт теплоты.

Эти параметры использованы при моделировании в качестве граничных условий входа в расчетную область выхлопных газов и теплового потока с поверхности ПДМ при моделировании.

### Результаты моделирования

По результатам моделирования построены поля распределения температуры в поперечном сечении исследуемой области. Как видно из рисунка (см. рис. 2), температура в очистном пространстве составляет от 30 до 35 градусов. Также на рисунке видно, что в очистном пространстве отсутствует вертикальное расслоение. Таким образом, вынужденная конвекция, создаваемая потоком воздуха, выходящего из трубопровода, преобладает над естественной тепловой конвекцией.

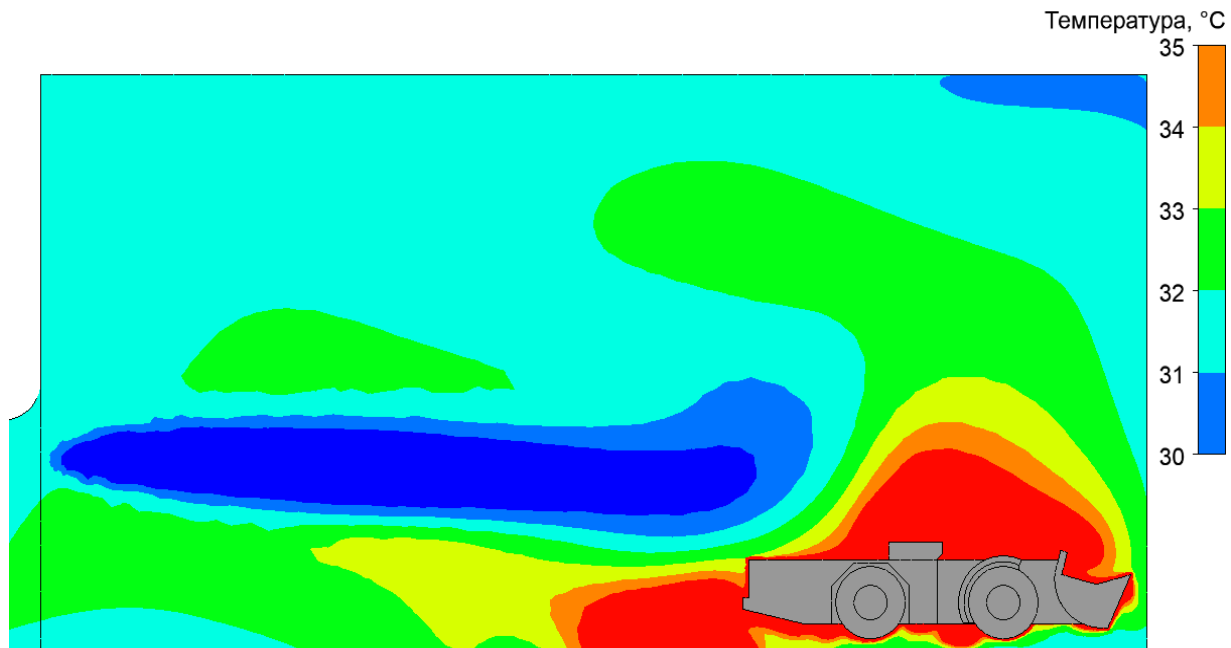


Рис. 2. Распределения температур в срединном вертикальном срезе

Произведена оценка влияния тепловыделений в очистном пространстве на поля распределения скоростей воздуха в нарезной выработке, в которой расположено рабочее место машиниста ПДМ. На рисунках представлены результаты моделирования четырех случаев: 1) без учета тепловыделений; 2) с учетом температуры выхлопных газов; 3) с учетом выхлопных газов и поверхности ПДМ, заданной тепловым потоком; 4) с учетом выхлопных газов и поверхности ПДМ, заданной статической температурой.

Как видно из рис. 3, способ задания тепловыделений в пределах очистного пространства существенно влияет на распределение скоростей воздуха в нарезной выработке. Различия в количестве приносимой в атмосферу выработки теплоты и в местах ее образования обуславливают формирование различных конвективных вихревых структур в очистной и нарезной выработках. С учетом полученного результата интересно исследовать, как меняется концентрация вредных примесей в нарезной выработке в зависимости от способа задания тепловыделений.

Для задачи проветривания очистного пространства и нарезной выработки при отгрузке руды наиболее важным является параметр концентрации газа на рабочем месте машиниста ПДМ. На графике (см. рис. 4) представлены результаты непрерывной работы ПДМ в очистном пространстве в течение 5 минут. Как видно из графика, при всех рассмотренных вариантах моделирования асимптота графиков одинакова, присутствует незначительная разница во временных колебаниях концентрации, однако она исчезает после усреднения по времени.

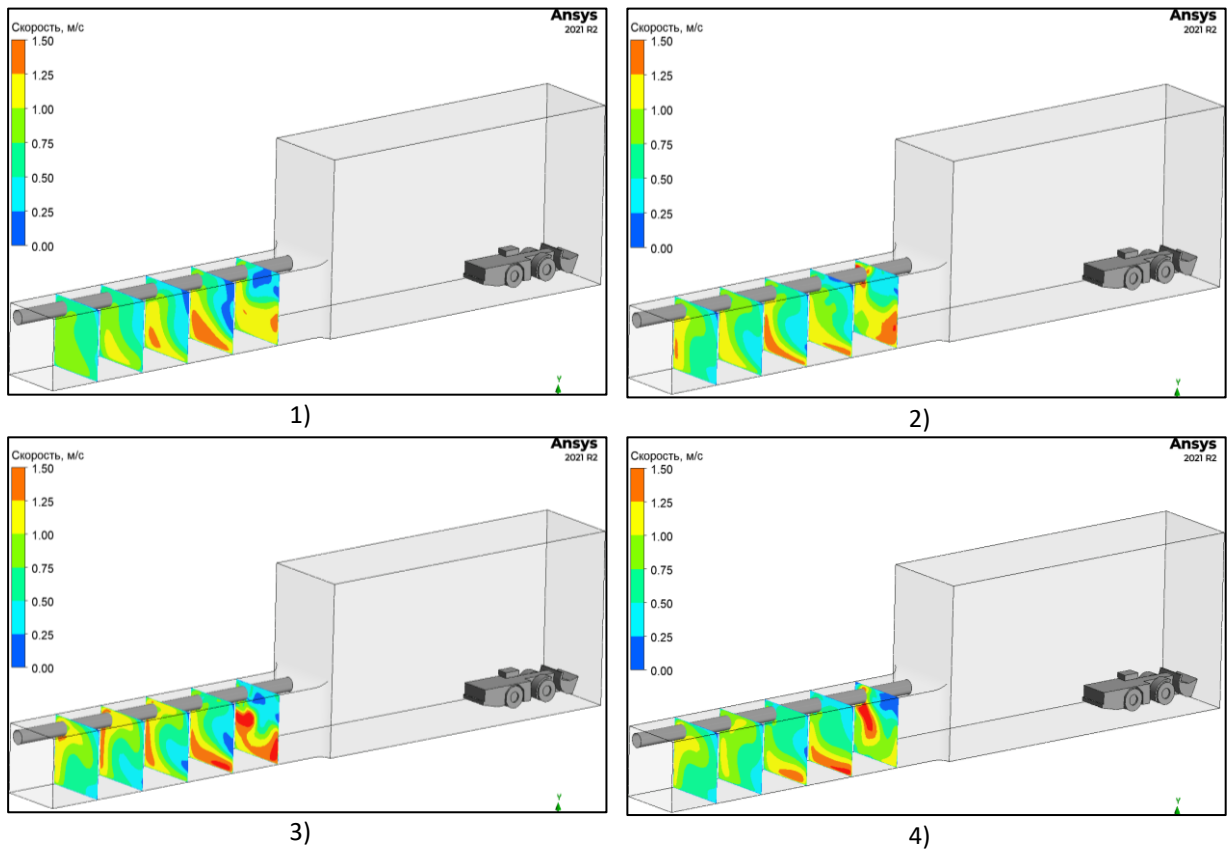


Рис. 3. Поля скоростей движения воздуха

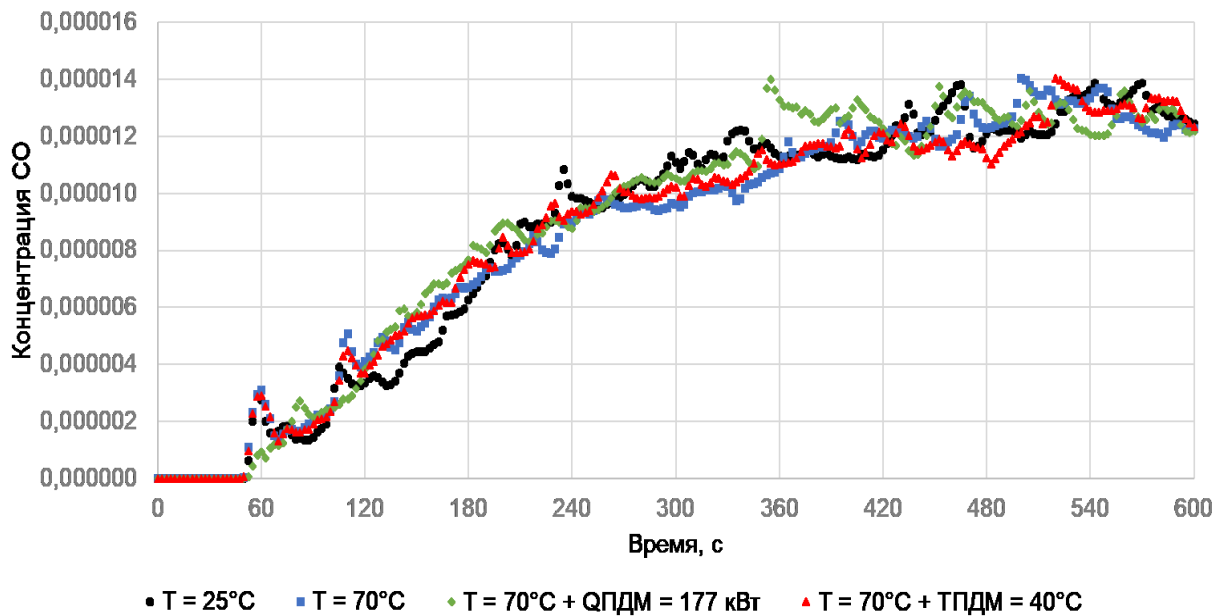


Рис. 4. График возрастания концентрации угарного газа на рабочем месте машиниста ПДМ

Характер возрастания кривых также аналогичен, что свидетельствует о том, что при учете теплового расширения выхлопных газов тепловыделениями в пределах очистного пространства для решения задачи эффективности проветривания тупиковых очистных камер можно пренебречь.

## Выводы

По результатам моделирования сделаны следующие выводы (все результаты справедливы при подаче расчетного количества воздуха).

1. При проветривании очистных тупиковых камер большого сечения отсутствует существенное вертикальное расслоение температур, а вынужденная конвекция, создаваемая потоком воздуха, выходящего из трубопровода, преобладает над естественной тепловой конвекцией.

2. Тепловыделения погрузочно-доставочной машины в пределах очистного пространства ощутимо влияют на поле распределения скорости в поперечном сечении нарезной выработки, при этом количественно средняя величина скорости неизменна.

3. Тепловыделения погрузочно-доставочной машины в пределах очистного пространства не влияют на величину концентрации вредных компонентов выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания на рабочем месте машиниста погрузочно-доставочной машины.

Таким образом, при учете теплового расширения выхлопных газов (задание массового расхода выхлопных газов при моделировании) тепловыделениями в пределах очистного пространства для решения задачи эффективности проветривания тупиковых очистных камер можно пренебречь.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке  
Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000396-6).*

## 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 «НТИЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
2. Пьянников В.П. Повышение эффективности проветривания тупиковых горных выработок при работе погрузочно-доставочных (транспортных) машин с двигателями внутреннего сгорания: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.20 / Пьянников Валерий Павлович. – Екатеринбург, 2005. – 198 с.
3. Росляков А.С. Оптимизация проветривания тупиковой выработки при работе в ней машин с двигателями внутреннего сгорания: дис. ... канд. техн. наук. 25.00.20 / Росляков Александр Станиславович. – Екатеринбург, 2012. – 172 с.: ил.
4. Накаряков Е.В., Гришин Е.Л. Исследование условий проветривания протяженных тупиковых очистных камер при работе в них погрузочно-доставочных машин с двигателем внутреннего сгорания // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6, № 3. – С. 105-111.
5. Накаряков Е.В. Анализ влияния геометрических параметров поперечного сечения очистной тупиковой камеры на эффективность ее проветривания // Горное эхо. – 2019. – Т. 76, № 3. – С. 76-79. – DOI: 10.7242/echo.2019.3.21.
6. Накаряков Е.В., Гришин Е.Л. Анализ влияния производственного цикла работы погрузочно-доставочной машины в очистной тупиковой камере на эффективность проветривания // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 120-123. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.23.
7. Накаряков Е.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Колесов Е.В. Анализ закономерностей накопления и выноса выхлопных газов от машин с двигателями внутреннего сгорания в тупиковых камерообразных горных выработках // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 5. – С. 41-47. – DOI: 10.24000/0409-2961-2021-5-41-47.
8. Гришин Е.Л., Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г. Обеспечение безопасных условий деятельности сотрудников по фактору вентиляция в подземных рудниках при работе техники, оснащенной двигателями внутреннего сгорания // Недропользование. – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 280-290. – DOI:10.15593/2712-8008/2020.3.8.
9. Рудничная вентиляция: справ. / под ред. К.З. Ушакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1988. – 440 с.: ил.
10. 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.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ГАЗОНОСНОСТИ ПОРОД УДАЧНИНСКОЙ СВИТЫ В УСЛОВИЯХ РУДНИКА «УДАЧНЫЙ»

Е.А. Нестеров

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье изложены результаты исследования газоносности и газодинамических характеристик пород, представленных известняками Удачинской свиты. Кратко дана геология вмещающих пород, по которым ведется проходка горных выработок. В результате исследования выявлены различные значения газоносности пород как по количественной, так и качественной составляющей в зоне межтрубного пространства и за его пределами. Выявлено, что известняки в межтрубном пространстве, где отмечались выбросы породы и газа, содержат большее количество свободного газа, чем за его пределами.

**Ключевые слова:** газоносность, начальная скорость газовыделения, давления газа в массиве, известняки, подготовительные выработки, буровзрывные работы.

### Введение

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 [1-9].

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.

Проходка транспортного и конвейерного ортов в отметках -630 м осуществляется по породам Удачинской свиты, сложенным мраморизованными известняками светло-серого до грязно-белого окраса с редким, неотчетливыми, невыдержанными, мало-мощными, субгоризонтальными прослоями темно-зеленых и коричневато-серых известняков [10-17]. 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 натеки на бортах и в кровле выработки (рис. 1).

Анализ выбросов известняков и газа, зафиксированных при проходке подготовительных выработок, позволяет отметить следующие особенности: наличие полостей произвольной формы, часто овальных; характер разрушения известняков (наличие листообразных или чешуеобразных пластин, оконтуривающих полость, наличие раздробленной породы; характерная радиально-концентрическая трещиноватость на стенках полости), повышенное газовыделение (рис. 2). При проходке выработок буровзрывным способом при выбросах породы и газа величина коэффициента использования шпуров, как правило, превышает единицу. Выбросы известняков и газа стали отмечаться с приближением подготовительных выработок к межтрубному пространству рудных тел.

Одной из основных количественных характеристик газового фактора является газоносность пород, а ее изучение позволяет понять закономерности распределения при-

родных газов по геологическому разрезу и площади месторождения, выделять участки с повышенными значениями и в дальнейшем предлагать обоснованные способы борьбы с газодинамическими явлениями.

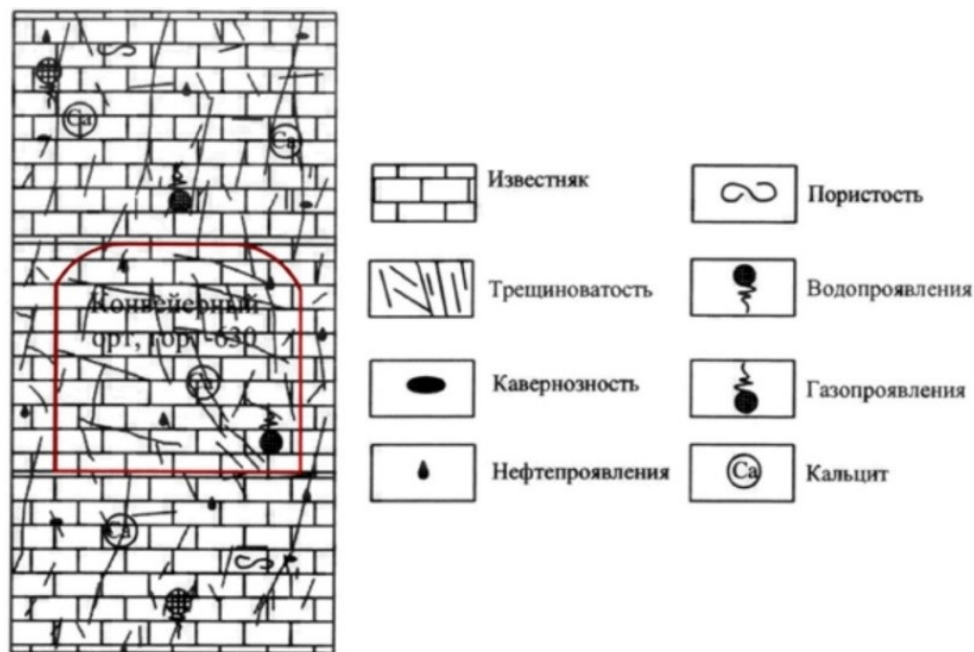


Рис. 1. Породы Удачинской свиты



Рис. 2. Характерные особенности выбросов известняков и газа

### Методика проведения исследований

Исследования газоносности и газодинамических характеристик пород подготовительных горных выработок в проводились в транспортном и конвейерном ортах. Учитывая тот факт, что выбросы известняков и газа стали интенсивно проявляться при подходе выработок к межтрубному пространству рудных тел кимберлитовой трубки, исследования выполнялись как в межтрубном пространстве, так и на удалении от него (Рис. 3).

Исследования проводились посредством герметизации исследовательских шпуров, замеров начальной скорости газовыделения и давления свободных газов в породах горных выработок с отбором проб свободного газа [18]. Исследование проб свободного газа на компонентный состав проводились на газовом хроматографе 450-GC компании «Varian, Inc».

### Результаты исследований

В зоне межтрубного пространства газоносность пород конвейерного орта изменяется от 0,05 до 4,37 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при среднем значении 2,53 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Максимальное



начальное давление свободных газов в массиве составило 0,246 МПа, начальная скорость газовыделения при этом составила 5,9 л/мин. Средний компонентный состав свободных газов в породах:  $\text{CH}_4$  – 63,22 %;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 17,45 %;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 13,47 %;  $i\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 2,32 %;  $n\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 3,02 %;  $i\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 0,24 %;  $n\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 0,21 %;  $\text{N}_2$  – 0,03 %;  $\text{CO}_2$  и другие газы – 0,04 %.

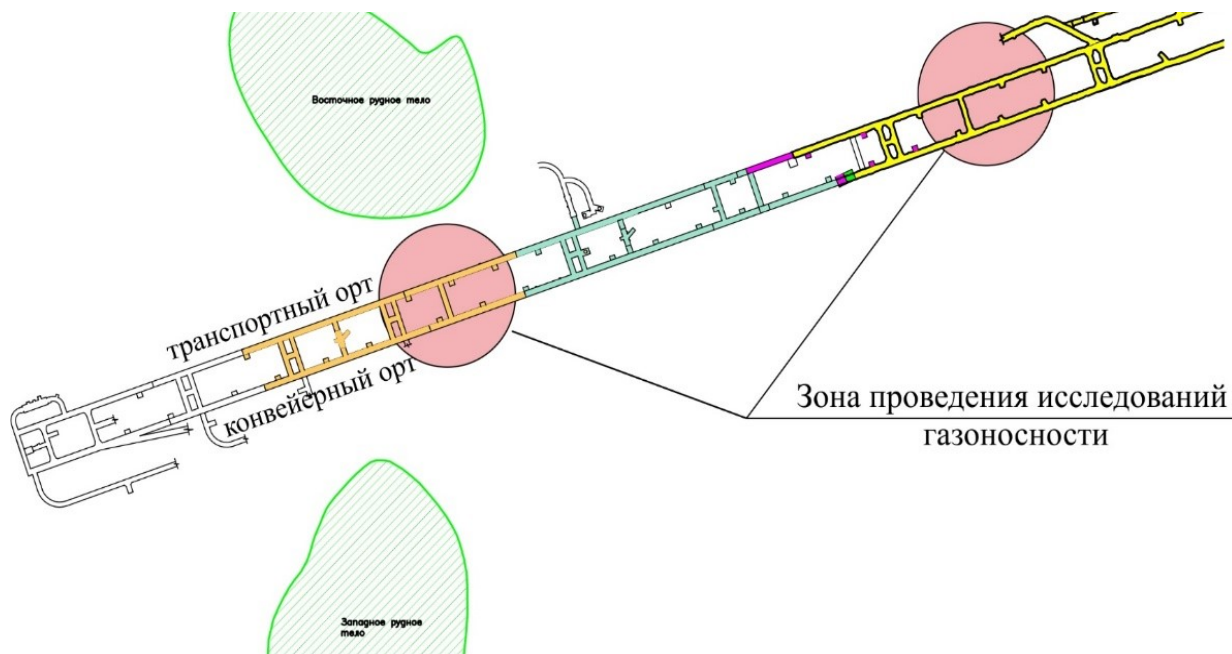


Рис. 3. Зоны изучения газоносности известняков по свободным газам

За пределами межтрубного пространства исследования газоносность пород транспортного уклона изменяется от 0,05 до 1,08  $\text{м}^3/\text{м}^3$  при среднем значении 0,46  $\text{м}^3/\text{м}^3$ . Максимальное начальное давление свободных газов в массиве составило 0,202 МПа, начальная скорость газовыделения при этом составила 1,08 л/мин. Средний компонентный состав свободных газов в породах:  $\text{CH}_4$  – 71,06%;  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 6,87%;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 2,43%;  $i\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,30%;  $n\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0,30%;  $i\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 0,03%;  $n\text{C}_5\text{H}_{12}$  – 0,02%;  $\text{N}_2$  – 18,80%;  $\text{CO}_2$  и другие газы – 0,21%. Диаграммы компонентного состава свободных газов представлены на рисунке 4.

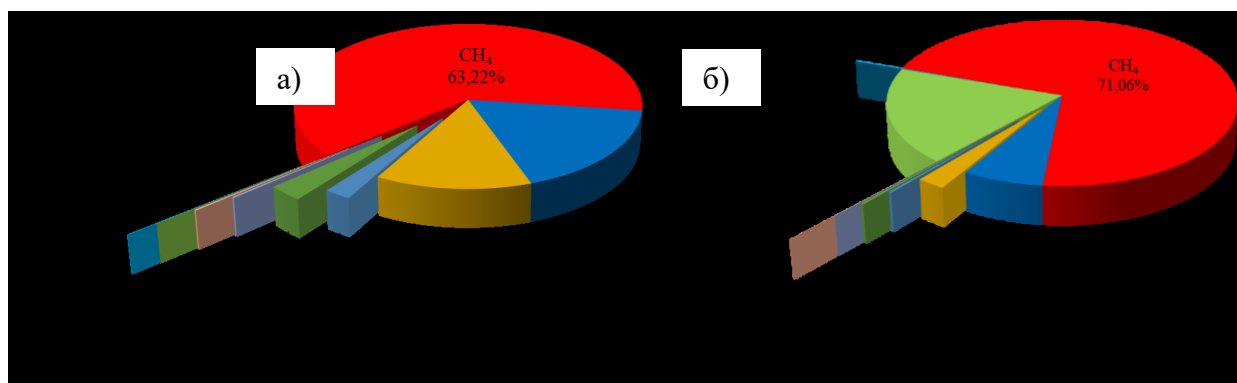


Рис. 4. Диаграммы компонентного состава газов: а – в межтрубном пространстве, б – за пределами межтрубного пространства

### Заключение

В результате выполнения экспериментальных исследований газоносности пород по свободным газам можно сделать следующие выводы.

1. Газоносность пород по свободным газам в межтрубном пространстве изменяется от 0,05 до 4,37 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при среднем значении 2,53 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Максимальное начальное давление свободных газов в массиве составило 0,246 МПа, начальная скорость газовой выделенности при этом – 5,9 л/мин. Компонентный состав газов имеет высокое содержание метана (СН<sub>4</sub>) – 63,22%; содержание тяжелых углеводородных газов (С<sub>2</sub>-С<sub>5</sub>) – 36,71%.

2. Газоносность пород по свободным газам за пределами межтрубного пространства изменяется от 0,05 до 1,08 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при среднем значении 0,46 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Максимальное начальное давление свободных газов в массиве составило 0,202 МПа, начальная скорость газовой выделенности при этом – 1,08 л/мин. Компонентный состав газов имеет высокое содержание метана (СН<sub>4</sub>) – 71,06%; содержание тяжелых углеводородных газов (С<sub>2</sub>-С<sub>5</sub>) – 9,94%.

3. При анализе компонентного состава свободных газов установлено, что содержание метана имеет близкие значения, а суммарное содержание горючих газов в межтрубном пространстве практически в 4 раза превышает значения за пределами межтрубного пространства.

4. Повышенные значения газоносности известняков по свободным газам в межтрубном пространстве относительно газоносности за его пределами позволяют предположить, что при формировании месторождения в области внедрения магматических пород образовывались газонасыщенные зоны, при прохождении которых горными работами происходят газодинамические явления в виде инициированных буровзрывными работами выбросов известняков и газа.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра. – 1983.–280 с.
2. Прогноз и предотвращение выбросов пород и газа/ В.Н. Потураев [и др.]. – Киев: Наук. Думка. – 1986.–160 с.
3. Шевелев Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа. – Киев: Наук. думка. – 1989.–156 с.
4. Айруни А.Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. – М.: Наука. – 1987. –310 с.
5. Проскуряков Н.М. Управление состоянием массива горных пород. – М.: Недра. – 1991. – 368 с.
6. Христианович С.А., Салганик Р.Л. Внезапные выбросы угля (породы) и газа. Напряжения и деформации. – М., 1980. – 87с. – (Препринт / Акад. наук СССР, Ин-т проблем механики; № 153).
7. Николин В.И., Недвига С.Н. Выбросы породы и борьба с ними // Безопасность труда в промышленности. – 1968. – № 8. – С.35-36.
8. Андрейко С.С. Предотвращение газодинамических явлений при проведении уклонов, вскрывающих IV калийный горизонт, в условиях Старобинского месторождения калийных солей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 12 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2014. – С. 227-229.
9. Андрейко С.С. Газодинамические явления при проходке подготовительных выработок во вмещающих породах на руднике «Интернациональный» АК «Алроса» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 304-307.
10. Дроздов А.В. Влияние природной газоносности трубки «Удачная» на ход строительства алмазного рудника // Горный журнал. – 2009. – № 6. – С. 44-48.
11. Шепелева Н.Н., Краевский В.И., Федоров В.И. Взаимосвязь битумо- и газонасыщенности осадочной толщи пород Далдыно-Алакитского района // Геологические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа: Экспресс-информация / ВИЭМС. – М., 1984. – Вып. 6. – С. 15-25.
12. 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.

13. 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.
14. Матвиенко Н.Г. Газобезопасность освоения рудных месторождений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №7. – С.31-34.
15. Матвиенко Н.Г., Зимаков Б.М. Основы безопасного освоения газоносных рудных месторождений // Горн. журн. – 2005. – № 4. – С. 78-80.
16. 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.
17. Специальные мероприятия газового режима при ведении горных работ на подземном руднике «Удачный» в условиях газонефтепроявлений. (вып. 6) / АК «Алроса» (ПАО). – Мирный: «Якутни-проалмаз», 2022. – 113 с.
18. Иванов О.В. Методика, оборудование и результаты исследований по изучению газоносности продуктивных пластов на вновь вводимых в эксплуатацию участках шахтных полей калийных рудников // Материалы научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2000 г. – Пермь, 2001. – С. 88-91.