



Горный институт
УрО РАН

Горное эхо

Научно-технический журнал
2024 № 1 (94)

ISSN 2658-5227

12+

Горное эхо

Научно-технический журнал
2024 № 1 (94)

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

Зам. главного редактора
д.г.-м.н. С.Г. Бычков

Ответственный секретарь
д.т.н. М.А. Семин

Редакционная коллегия:
д.т.н., проф С.С. Андрейко, д.г.н. О.И. Кадебская,
д.т.н. Л.Ю. Левин, д.г.н. А.П. Лепихин,
академик РАН, д.т.н., проф. В.П. Матвеевко,
д.т.н., проф. И.А. Санфиоров, д.г.-м.н. И.И. Чайковский

Издается с 2019 г.

Периодичность издания: 4 раза в год

Распространяется бесплатно

ISSN 2658-5227

© Горный институт УрО РАН

СОДЕРЖАНИЕ

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ,

ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

<i>Казанцева А.С.</i> Оценка микроклиматических изменений в Кунгурской Ледяной пещере	3
<i>Лепихин А.П., Опутин М.А.</i> Особенности гидрологического режима зоны выклинивания подпора Камского водохранилища и его влияние на устойчивость технического водоснабжения предприятий г. Березники	7
<i>Лучников А.И., Синцова Т.Н.</i> Опыт применения БПЛА для оценки скоростей дрейфовых течений в поверхностных водных объектах	12
<i>Сохин М.Ю.</i> Подземные полости у Турецкой крепости на реке Баканка в Краснодарском крае	19
<i>Трапезников Д.Е., Галинова О.И.</i> База данных разломов соликамской впадины	27

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

<i>Мальцев В.М., Аникин В.В.</i> Импульс скважинного рассредоточенного заряда с забойкой	36
<i>Поспелов Д.А., Токсаров В.Н., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А.</i> Результаты испытаний механических свойств песчаника на месторождении Жаман-Айбат	42

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

<i>Долгаль А.С.</i> Построение глобальной аналитической модели аномалий силы тяжести методом истокообразной аппроксимации	49
<i>Мурыськин А.С.</i> Определение добротности среды на территории рудников на примере Верхнекамского и Жезказганского месторождений	55
<i>Простолупов Г.В.</i> Применение метода «Полюс» полного градиента поля силы тяжести при мониторинговых исследованиях в районе техногенного озера	60
<i>Тайницкий А.А., Христенко Л.А.</i> Методы электрометрии при изучении деформационных процессов земной поверхности	64
<i>Ярославцев А.Г., Кузнецов И.Л.</i> Сейсмоакустический прогноз особенностей строения породного массива впереди забоя	70

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА**И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА**

Бублик С.А., Семин М.А., Паршаков О.С., Ольховский Д.В., Зайцев А.В.

Разработка математической модели гидравлической сети пожарного трубопровода подземного рудника	77
<i>Литвиновская Н.А.</i> Газоносность и газодинамические характеристики соляного породного массива I калийного горизонта при техногенном воздействии в условиях рудника ПРУ ОАО «Беларуськалий»	82
<i>Лялина Т.А.</i> Анализ геологических условий газовыделений и газодинамических явлений при бурении геологоразведочных скважин с поверхности на Верхнекамском месторождении калийных солей	87
<i>Пересторонин М.О., Накаряков Е.В.</i> Экспериментальные исследования газовыделений от работы погрузочно-доставочной машины Fambition FL14	91
<i>Семин М.А., Дунькина А.А.</i> Комплексная оценка энергоэффективности системы замораживания при строительстве шахтных стволов на примере скипового ствола калийного рудника в Республике Беларусь	96

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.44

DOI:10.7242/echo.2024.1.1

ОЦЕНКА МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРЕ

А.С. Казанцева

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Оценка изменения микроклиматических показателей в Кунгурской Ледяной пещере проводилась путем сравнения данных, полученных в периоды 1951-99 и 2000-23 гг. Устойчивое повышение температуры воздуха на поверхности, изменения в режиме проветривания в пещере в последнее двадцатилетие привело к изменению температуры воздуха в разных микроклиматических зонах пещеры. Изменились среднегодовые и среднемесячные многолетние температурные параметры в гротах пещеры, динамика этих изменений различна.

Ключевые слова: Кунгурская Ледяная пещера, микроклиматический мониторинг, среднегодовая многолетняя температура, среднемесячная многолетняя температура.

Климатические условия на поверхности оказывают определяющее влияние на микроклимат Кунгурской Ледяной пещеры, обуславливая характер распределения температуры по ходу пещеры, направление и интенсивность циркуляции воздушных потоков в зависимости от времени года. Основная цель микроклиматического мониторинга в Кунгурской Ледяной пещере – определение температурных характеристик воздуха в гротах, поскольку температура является одним из важных параметров, позволяющих отслеживать и контролировать температурные условия и изменения в разных микроклиматических зонах. Система выполняемых наблюдений за метеорологическими параметрами позволяет поддерживать пещеру в естественном состоянии.

Первые измерения температуры воздуха на поверхности и в пещере произвел в 1733 г. профессор Петербургской Академии Наук И.Г. Гмелин. Данные, представленные в его рукописи, являются результатом одних из первых наблюдений за климатическими параметрами в карстовых полостях в мире. Первые метеорологические посты в пещере были оборудованы в 1934 г. сотрудниками партии «Гидростройпроект», а в 1948 г. метеорологические наблюдения в тех же точках продолжили сотрудники Кунгурского стационара [3]. Имеется непрерывный ряд измерений [1] температуры воздуха в Кунгурской Ледяной пещере в периодах 1974-92 гг., затем 1993-98 гг. и 1999-2012 гг. с годичными интервалами между этими периодами и внутригодовыми перерывами. С 2013 г. по настоящее время замеры температуры воздуха в гротах пещеры ведутся постоянно. До конца 2016 г. показания температуры воздуха измеряли термометрами ТМ-08, а далее была организована система автоматической фиксации температуры воздуха. В гротах установлены логгеры HOBO Water Temp Pro v220 (USA), которые фиксируют температуру раз в 60 минут (периодичность измерений можно регулировать). В настоящий момент программа микроклиматического мониторинга в пещере включает замеры температуры воздуха в 31 гроте, из которых 8 точек замера находятся в заповедной части пещеры.

В данной статье оценены микроклиматические изменения в пещере в некоторых гротах за многолетний период. Для сравнительной характеристики использованы температурные показатели в тринадцати гротах, опубликованные в монографии 2005 г. (период замеров 1951-99 гг.) [4] и полученные в этих же гротах за период 2000-23 гг. Для двух рассматриваемых периодов определены среднегодовые многолет-

ние, среднемесячные многолетние, максимальные и минимальные температуры воздуха в гротах пещеры.

Для пещеры характерны три микроклиматические зоны: зона постоянных отрицательных температур ($t_{\text{ср}} \leq -2 - -1^\circ\text{C}$), переходная зона ($t_{\text{ср}} \sim 0^\circ\text{C}$, в течение года температура изменяется от -2°C до $+2^\circ\text{C}$), и зона постоянных положительных температур ($t_{\text{ср}} \geq +2^\circ\text{C}$). В зоне постоянных отрицательных температур наблюдается неоднозначная ситуация (табл. 1): в гроте Бриллиантовый по данным 2000-23 гг. по сравнению с данными 2005 г. отмечено повышение температуры на $0,7^\circ\text{C}$, в то время как в гроте Данте температура воздуха стабильна. Среднегодовые значения температуры ($t_{\text{ср}}$) в гротах зоны постоянных отрицательных температур варьируют из-за изменения климатических и погодных условий на поверхности. Средняя многолетняя температура, рассчитанная по среднесуточным температурам метеостанции г. Кунгура за период с 1926 по 2002 гг., составляет $1,8^\circ\text{C}$ [2], по состоянию на 2013-23 гг. – $4,4^\circ\text{C}$. За последние десятилетия безморозных периодов стало больше, среднемноголетняя температура января повысилась на $2,5^\circ\text{C}$ (на период 1926-91 гг. она составляла $-14,8^\circ\text{C}$, 2013-23 гг. – $-12,3^\circ\text{C}$), среднемноголетняя температура июля за предшествующее время тоже повысилась на $2,3^\circ\text{C}$, (1926-91 гг. – $+18,2^\circ\text{C}$, 2013-23 гг. – $+20,3^\circ\text{C}$).

Таблица 1

Среднегодовая многолетняя температура воздуха
в Кунгурской Ледяной пещере в разные периоды, $^\circ\text{C}$

	По данным 2005 гг.	По данным 2000-23 гг.	Микроклиматическая зона
Бриллиантовый	-3,7	-3,0	постоянных отрицательных температур
Данте	-2,0	-2,0	
Крестовый	-0,3	-0,5	переходная зона
Руины	1,8	1,6	постоянных положительных температур
Скульптурный	3,1	2,6	
Коралловый	3,8	3,9	
Центральный	4,3	4,3	
Смелых	1,9	1,9	
Геологов	3,5	2,8	
Дружбы Народов	5,0	5,0	
Длинный	3,8	4,8	
Великан	2,4	4,0	
Вышка	-0,3	2,8	

Анализ изменения среднемесячных температурных показателей в отдельных гротах разных климатических зон (рис. 1) показал, что в зоне отрицательных температур (грот Бриллиантовый) в настоящее время в зимний период наблюдается понижение температуры воздуха, в то время как в весенний, летний и осенний периоды наблюдается тенденция незначительного увеличения температур. За счет этого и происходит внутригодовое перераспределение температуры воздуха и отмечается общая тенденция ее среднегодового повышения.

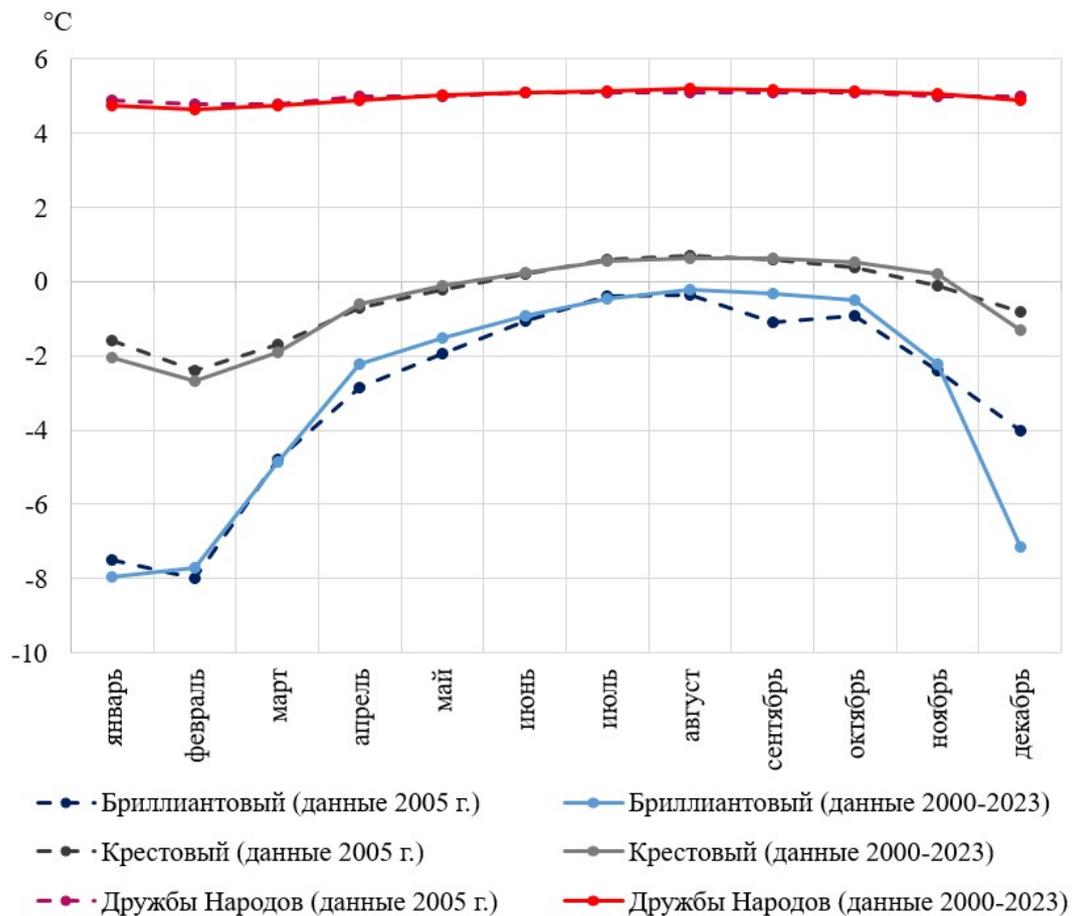


Рис. 1. Среднемесячные многолетние изменения температур в гротах разных микроклиматических зон

В переходной зоне и близких к ней гротах зоны постоянных положительных температур (гроты Крестовый, Руины, Скульптурный и Геологов) отмечен тренд понижения среднегодовых температур (табл. 1). В гроте Крестовый в зимне-весеннее время в период 2000-23 гг. фиксируются низкие значения температур по сравнению с предыдущим периодом исследований (рис. 1). В остальное время характер распределения температур неизменен.

При движении к центральной части пещеры (гроты Коралловый, Центральный, Дружбы Народов, Смелых) среднегодовая температура воздуха за последние двадцать лет не изменилась, что также прослеживается по среднемесячным значениям. Ближе к выходу из пещеры в настоящее время в гротах Длинный, Великан и Вышка наблюдается значительное повышение температурных параметров, это обусловлено изменением режима вентиляции. Вплоть до 2013 г. выходной тоннель в зимнее время открывали для охлаждения и промораживания пещеры, часть холодного воздуха поступала через грот Вышка. Поэтому температура воздуха в близлежащих к выходу гротах опускалась до отрицательных температур (табл. 2). Так, в декабре 1976 г. ($-17,7^{\circ}\text{C}$) и феврале 2012 г. ($-4,0^{\circ}\text{C}$) в гроте Вышка зафиксированы минимальные значения температур.

В пещере прослеживаются периоды с наибольшими и наименьшими температурными показателями в гротах (табл. 2). Так в периоды 1984-87 гг., 2000-01 гг. и 2023 г. в гротах пещеры зафиксированы максимальные отметки температуры воздуха, в 1956 г., 1977 г., 2009 г. и 2017 г. – минимальные отметки.

Также произведена оценка температурных показателей за последний двадцатилетний период (2000-23 гг.). К сожалению, данные по температуре воздуха на территории

г. Кунгура оказались неполными, но в настоящее время наблюдается устойчивое среднегодовое понижение температуры (рис. 2). В микроклиматической зоне отрицательных температур в Кунгурской Ледяной пещере ситуация практически стабильная, резких трендов не наблюдается. В нейтральной зоне и зоне положительных температур отмечается тренд понижения температуры.

Таблица 2
Параметры температур воздуха в гротах Кунгурской Ледяной пещеры

	До 2005 г.						2000-2023 гг.					
	Максимум		Минимум		Амплитуда		Максимум		Минимум		Амплитуда	
	Т-ра	Дата	Т-ра	Дата	Макс.	Мин.	Т-ра	Дата	Т-ра	Дата	Макс.	Мин.
Брил.	+0,1	08.84	-23,9	02.80	23,5	2,6	+0,8	06.00	-22,8	12.09	22,6	4,8
Данте	+0,0	08.35	-18,1	02.79	17,6	3,2	+0,6	09.00-01	-11,0	12.09	11,1	2,8
Крестов.	+1,8	04.90	-5,5	02.77	5,6	1,8	+3,0	06.00	-5,1	02.14	6,2	1,2
Руины	+3,2	08.84	-0,6	02.77	2,5	1,7	+4,6	09.00	-0,6	02.14	3,6	1,8
Скульп.	+4,4	09.87	0,0	02.77	3,7	1,1	+4,9	09.00	-0,1	02.17	3,6	1,9
Корал.	+5,2	06.84	+1,6	02.77	1,8	0,6	+5,0	08.01;09.01; 11.01;04.02	+2,5	02.17	1,4	0,4
Центр.	+5,1	09.76	+2,7	02.56	1,3	0,3	+5,0	08.23	+3,9	02.17; 03.17;04.17	0,6	0,2
Смелых	+3,1	07.52	-1,4	04.56	2,7	0,4	+2,9	09.22	-0,1	02.17	2,1	0,7
Геол.	+4,8	09.77	+1,9	02.77	2,9	0,8	+4,6	08.23	+0,5	02.17	2,8	0,5
Др.Нар.	+5,4	09.85	+4,2	03.56	0,9	0,1	+5,8	08.04	+3,9	02.17	1,3	0,2
Велик.	+3,8	08.98	+0,2	02.77	2,4	0,9	+5,0	09.23	+2,1	02.01	1,7	0,3
Вышка	+4,8	07.87	-17,7	11.76	17,9	1,6	+4,4	09.23	-4,0	02.12	7,8	0,6

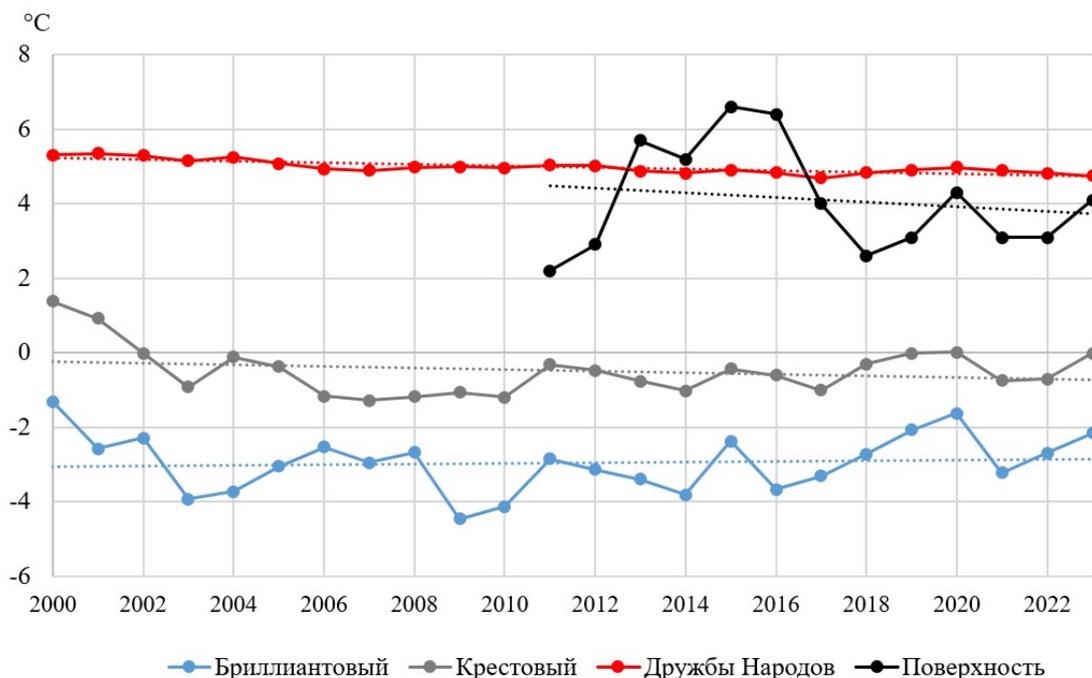


Рис. 2. Изменение среднегодовых температурных показателей в некоторых гротах и на поверхности за последние двадцать лет

Проведенный анализ температурных данных за два периода (1951-99 гг. и 2000-23 гг.) показал, что в настоящее время наблюдается устойчивое повышение среднегодовой многолетней температуры воздуха на территории г. Кунгура, это не могло не отразиться на изменении микроклимата Кунгурской Ледяной пещеры. Из-за особенностей циркуляции воздуха, использования разных режимов проветривания наибольшее влияние на изменение среднегодовых температурных показателей за последние двадцать лет испытали гроты привходовой и выходной части пещеры. И хотя за последние десятилетия безморозных периодов стало больше и среднемноголетняя температура января повысилась на 2,5°C, в зимний период во всех зонах отмечается понижение среднемесячных температур по сравнению с предыдущим периодом исследований (1951-99 гг.). В то же время, при анализе последних данных (2000-23 гг.) отмечен тренд понижения среднегодовых температур в гротах зоны переходных температур и зоны постоянных положительных температур.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России
в рамках государственного задания
(регистрационный номер НИОКТР 1022040500583-2-1.5.6).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кадебская О.И. Геоэкологическое состояние Кунгурской Ледяной пещеры и прилегающей территории, ее охрана и рациональное использование: автореф. дис. ...канд. геогр. наук. 25.00.36: защищена 02.12.04 / Кадебская Ольга Ивановна. – Пермь, 2004. – 27 с.
2. Катаев В.Н., Кадебская О.И. Геология и карст города Кунгура: монография. / ПГУ, ГИ УрО РАН. – Пермь, 2010. – 249 с.: ил.
3. Красиков А.В., Казанцева А.С., Богомаз М.В. Многопрофильный мониторинг в Кунгурской Ледяной пещере // Горн. журн. – 2018. – № 6. – С. 60-64.
4. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянско-го; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – 376 с.: ил.

УДК 556.5.07

DOI:10.7242/echo.2024.1.2

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЗОНЫ ВЫКЛИНИВАНИЯ ПОДПОРА КАМСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ г. БЕРЕЗНИКИ

А.П. Лепихин, М.А. Опутин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Показаны особенности влияния гидрологического режима Камского водохранилища на устойчивость систем технического водоснабжения г. Березники. Так как наблюдаемые характеристики уровня режима по гидропостам пгт. Тюлькино и г. Березники не отражают действительное распределение уклонов водной поверхности на изучаемом участке, было проведено соответствующее численное гидрологическое моделирование. В качестве рабочего инструмента для оценки распределения уклонов была использована модель в HEC-RAS. Представлены расчеты для различных сценариев, в том числе тех, при которых наблюдается вертикальная стратификация водных масс на водозаборе АО «БСЗ», изменения притока и уровней воды на Камском водохранилище. Показаны условия, при которых возможны наблюдаемые «залповые» повышения концентрации хлоридов в забираемых на водозаборах водных массах.

Ключевые слова: водохранилище, подпор, расход воды, неоднородность водных масс, вертикальная стратификация, гидрологические модели.

Введение

Водоснабжение промышленных предприятий Соликамско-Березниковского промузла в значительной мере осуществляется из поверхностных водных объектов, в первую очередь из р. Камы (Камского водохранилища). Характерной особенностью гидрохимического режима р. Камы (Камского водохранилища) в районе г. Березники является наблюдаемая в теплый период значительная вертикальная неоднородность водных масс. Поскольку водозаборы предприятий располагаются в придонном слое, в частности, водозабор АО «БСЗ», проблема скопления высокоминерализованных рассолов в данных слоях, вследствие вертикальной стратификации, является острой. Как показано в [1-2], механизм формирования вертикальной стратифицированной водной массы обусловлен гидрологическими особенностями рассматриваемого участка Камского водохранилища, а именно расположением участка в зоне переменного подпора, для которого характерны существенные изменения высотных отметок и уклонов водной поверхности. Также важным фактором, определяющим особенности гидрохимического режима, является его расположение в зоне активного техногенеза, наличие существенных фильтрационных разгрузок, обусловленных комплексом естественных и техногенных факторов [3]. Гидрологические особенности зоны переменного подпора на Камском водохранилище рассматривались в работе [4], однако только с феноменологических позиций. Поэтому есть необходимость в более детальном изучении особенностей формирования гидродинамического режима рассматриваемого участка водохранилища, установление условий, при которых возникает переменный подпор, и неоднородное распределение уклонов по длине водоема.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использовались материалы наблюдений за уровнями и расходами воды на гидрологических постах пгт. Тюлькино, г. Березники и КамГЭС. Ключевую роль при оценке состоятельности рабочих гипотез играет анализ исходных данных. Наблюдается значительное различие в частоте проведения гидрологических и гидрохимических наблюдений. В настоящее время измерения содержания хлоридов проводятся с частотой $\nu = 6/\text{сут}$, действующие автоматические системы позволяют осуществлять контроль забираемой воды с частотой измерений $72/\text{сут}$. В то же время на ближайших гидрологических постах пгт. Тюлькино и г. Березники измерения проводятся только 1 раз в сутки – в 8 часов утра.

В связи со значительными внутригодовыми колебаниями уровней воды на Камском водохранилище (4-7 м), водозаборные окна предприятий расположены в глубинной части. Поэтому особенности вертикальной стратификации водных масс играют принципиальную роль в обеспечении устойчивости водопользования.

Как следует из рис. 1, наблюдается значительная асинхронность колебаний содержания хлоридов в воде в районе водозабора АО «БСЗ» и уклона водной поверхности. Максимальные концентрации хлоридов наблюдаются при минимальных уклонах. В период летней межени на Камском водохранилище наблюдаются небольшие расходы на основных притоках, в том числе по р. Каме. Вследствие этого на исследуемом участке наблюдаются небольшие уклоны водной поверхности, что в свою очередь определяет условия для формирования вертикальной неоднородности водных масс. В 2023 г. в связи с низкой водностью р. Камы и необходимостью поддержания уровня воды на отметках, близких НПУ (108.5 м БС), минимальные уклоны наблюдались весьма продолжительный период.



Рис. 1. График изменения концентрации хлоридов и уклона водной поверхности на участке от пгт. Тюлькино до г. Березники

Для оценки устойчивости стратификации водных масс в прикладных исследованиях, как правило, используется плотностное число Фруда Fr_p и непосредственно связанное с ним число Ричардсона. Впервые число Ричардсона для оценки устойчивости водных масс на рассматриваемой территории было применено Г.И. Куликовым [5]. Как показано в [1, 2, 5, 6], при значениях плотностных чисел $Fr_p \sim 1,0$ наблюдается стратификация водных масс, т.е. в водном потоке не создаются кинетические условия для межслойного перемешивания:

$$Fr_p = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \times H_n \times g}}, \quad (1)$$

где H_n – толщина нижнего слоя с повышенной минерализацией, V – средняя скорость течения, $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ – относительное различие плотностей рассматриваемых водных масс, g – ускорение свободного падения.

При возникновении вертикальной стратификации водных масс граница расслоения близка, как правило, к половине глубины потока [6]. Оценка для этих условий критического значения уклона водной поверхности, ниже которой может возникать устойчивая стратификация, рассматривается далее. Для этих целей можно воспользоваться в первом приближении соотношением Шези:

$$V = C\sqrt{R * I}, \quad (2)$$

где V – средняя скорость течения C – коэффициент Шези, R – гидравлический радиус, I – уклон водной поверхности.

В свою очередь, коэффициент Шези C определяется как:

$$C = \frac{1}{n} * R^{1/6}, \quad (3)$$

где n – коэффициент шероховатости, R – гидравлический радиус.

Подставляя соотношения (2, 3) в (1), имеем:

$$Fr_p = \frac{C\sqrt{H*I}}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} \times (\frac{H}{2}) \times g}}. \quad (4)$$

Соответственно, для оценки критического значения уклона из соотношения (4), принимая, что начало формирования устойчивых стратификаций наблюдается при $Fr_p \sim 1$, имеем:

$$i_{кр} = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{Fr_p^2 \left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right)^2 * 2}. \quad (5)$$

Принимая для р. Камы (Камского водохранилища) в районе г. Березники $\left(\frac{C}{\sqrt{g}}\right) \sim 20$, получаем $i_{кр} \sim 1.25 * 10^{-6}$. При таких уклонах может формироваться стратификация водных масс, негативно влияющих на качество забираемой воды предприятиями, в частности, АО «БСЗ». При этом возникает принципиальный вопрос, в чем причина несогласуемости данной оценки критических значений уклонов водной поверхности с результатами, представленными на рис. 1.

Обсуждение результатов

Значения уклонов водной поверхности, полученные на основе анализа фактических данных и представленные на рис. 1, к сожалению, не отражают реальную картину распределения уклонов на всем участке от пгт. Тюлькино до г. Березники. Так как данный участок водохранилища находится в зоне переменного подпора, на нем возможен достаточно сложный характер как распределения гидравлических уклонов по протяженности рассматриваемого участка, так и его связи со скоростями течения.

Поэтому с целью получения объективной оценки фактических распределений уклонов водной поверхности между пгт. Тюлькино и г. Березники, были проведены гидравлические расчеты в 1D постановке с использованием программного продукта HEC-RAS 5.0 [7]. Для решения рассматриваемой задачи – оценки динамики распределения уровней воды на исследуемом участке водохранилища – данная постановка является оптимальной. В общем случае можно выделить несколько уровней решения гидродинамических задач сопряжения гидравлических уклонов со скоростным режимом водотока:

- 0-мерный (формула Шези), требующий минимальных вычислительных ресурсов;
- 1-мерный (HEC-RAS), характерное время расчетов современных вычислительных средств – 1 минута;
- 2-мерный (SMS), характерное время расчетов современных вычислительных средств – 2 часа;
- 3-мерный (Flow3D), характерное время расчетов современных вычислительных средств – 1 сутки.

Поскольку на рассматриваемом участке р. Кама (Камского водохранилища) изменение уклонов по ширине водного объекта незначительно, а также время расчётов моделей, создаваемых в HEC-RAS, минимально, применение гидродинамических моделей в 1-мерной постановке лучшим образом подходит для решения рассматриваемых в работе задач.

Расчеты были выполнены для следующих сценарных условий, наблюдаемых на изучаемом участке.

1. Стабильный поддерживаемый уровень НПУ (108.5 м БС) при постоянных значениях расхода притока.

2. Наблюдается суточное снижение притока воды на $50 \text{ м}^3/\text{сек}$ при уровне воды на КамГЭС $\sim 105.35 \text{ м БС}$. Данный сценарий отражает гидрологические условия, при которых наблюдались резкие колебания содержания хлоридов в забираемой воде в октябре и ноябре 2023 г., представленные на рис. 1.
3. Стабильный уровень воды на отметке 105.35 м БС и постоянном притоке. Так как зимний период характеризуется низкими уровнями воды и устойчивыми зимними расходами воды, данный сценарий относится к холодному периоду.
4. Снижение притока на $100 \text{ м}^3/\text{с}$ при относительно резких колебаниях уровней воды на 0.15 м/сут относительно НПУ (108.5 м БС). Данный сценарий охватывает летний период 2023 г., когда при эпизодическом снижении уклонов воды наблюдалось резкое повышение содержания хлоридов.

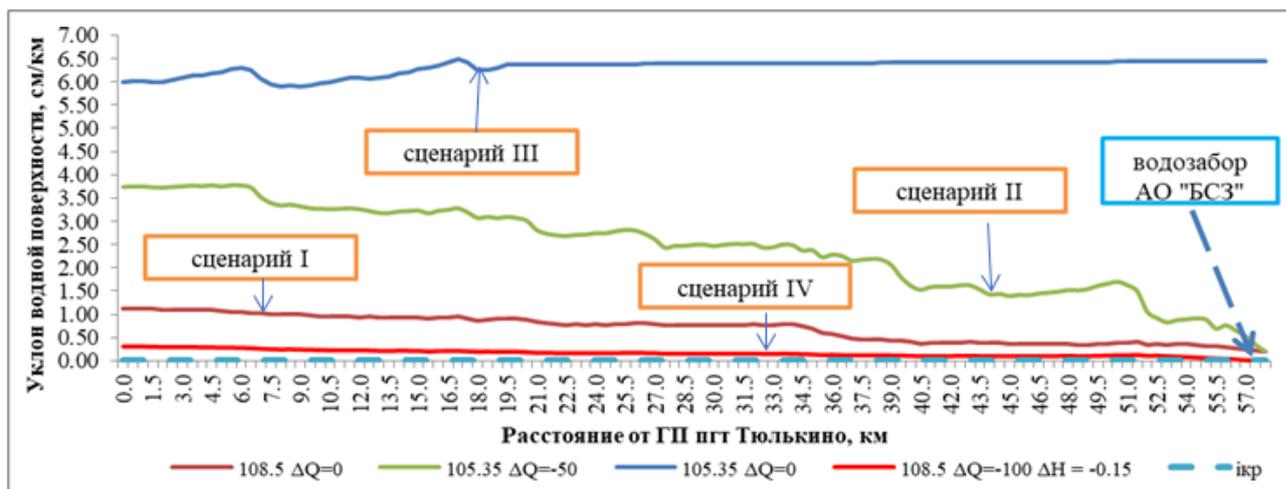


Рис. 2. График изменения уклона водной поверхности на участке от пгт. Тюлькино до г. Березники при реализации различных сценариев гидрологического режима

Критически низкие уклоны водной поверхности, при которых формируется вертикальная стратификация водных масс, определяются сочетанием двух факторов: уровнем воды, поддерживаемым на КамГЭС, и его межсуточными колебаниями. При одновременном снижении притока по р. Каме и снижении уровня воды КамГЭС наблюдаются минимальные уклоны.

Заключение

Проведенные исследования показали, что оценка гидравлических уклонов как разницы отметок уровней воды на двух смежных гидрометрических постах зоны выклинивания подпора Камского водохранилища некорректно. В рамках данного исследования с целью получения более объективных оценок распределению уклонов на участке р. Камы (Камского водохранилища) пгт. Тюлькино – г. Березники проведено численное моделирование на основе использования HEC-RAS. Модель применялась для установления условий формирования критических уклонов водной поверхности, при которых возможна вертикальная стратификация водных масс, значительно влияющих на устойчивость технического водоснабжения. Были рассмотрены и проанализированы четыре наиболее актуальных сценария изменения гидрологической ситуации на изучаемой акватории. Показано, что критические уклоны могут формироваться не только при уровнях воды, близких к НПУ 108.5 м БС , но и при более низких

уровнях, даже на 3 м. При этом определяющим фактором выступает снижение расходов притока воды по р. Каме.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лепихин А.П., Веницианов Е.В., Любимова Т.П., Тиунов А.А., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Влияние вертикальной неоднородности водных масс на устойчивость промышленного водоснабжения в зонах высокой техногенной нагрузки // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2021. – № 4. – С. 53-63. – DOI: 10.17076/Lim1419.
2. Любимова Т.П., Лепихин А.П., Паршакова Я.Н., Богомолов А.В., Ляхин Ю.С., Исахов А. Особенности гидродинамики водоемов с вертикальной плотностной неоднородностью водных масс в условиях активного техногенеза // Вычислительная механика сплошных сред. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 115-124. – DOI: 10.7242/1999-6691/2023.16.1.9.
3. Лепихин А.П., Возняк А.А., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Ляхин Ю.С., Богомолов А.В. Исследование особенностей формирования и масштабов диффузного загрязнения, сформированного крупными промышленными комплексами, на примере Соликамского-Березниковского промузла // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 5. – С. 560-566. – DOI: 10.31857/S0321059620050120.
4. Шайдулина А.А., Двинских С.А. Режим скоростей течения в районе переменного подпора Камского водохранилища // Географический вестник. – 2017. – №. 3 (42). – С. 61-70. – DOI: 10.17072/2079-7877-2017-3-61-70.
5. Куликов Г.И. Влияние сброса химической промышленности на минерализацию воды Камского водохранилища в районе г. Березники // Материалы всесоюзного совещания по вопросам эксплуатации Камского водохранилища. – Пермь, 1959. – Вып. 2. – С. 1-13.
6. Богомолов А.В., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Гребенева М.Г. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в период летней межени в районе г. Березники // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 3-11. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.1.
7. HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 6.2 (CPD-69) / Gary W. Brunner. – December 2022. – 464 p.

УДК 504.054; 504.064.3

DOI:10.7242/echo.2024.1.3

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТЕЙ ДРЕЙФОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ

А.И. Лучников, Т.Н. Синцова
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Малые и средние водохранилища широко используются в нашей стране для обеспечения питьевых, промышленных и сельскохозяйственных нужд. Анализ возможных последствий загрязнения таких водных объектов вследствие залповых выбросов или аварийных ситуаций требует оценки скоростей распространения поллютантов и в первую очередь поверхностных скоростей течений. Как правило, доминирующим фактором в формировании поверхностных течений выступают ветровые нагрузки. Использование БПЛА открывает новые возможности оценки скоростей на таких водных объектах в Лагранжевой постановке. Представлены результаты таких оценок на примере Верхне-Зырянского водохранилища, активно используемого для технического водоснабжения промышленными предприятиями г. Березники.

Ключевые слова: скорость дрейфового течения, скорость ветра, беспилотные летательные аппараты, водохранилище, водопользование.

Введение

Для решения широкого круга задач, связанных с охраной и рациональным использованием водных объектов, необходимы оценка и задание характерных значений скоростей течений, соответствующих определенным комплексам гидрологических и метеорологических параметров.

Существуют два принципиально различных подхода к описанию гидродинамических процессов: Эйлера и Лагранжа. При подходе Эйлера измерение и описание строятся по некоторой фиксированной точке пространства, при подходе Лагранжа исследуется движение, перемещение некоторого маркера, при этом переменными во времени являются координаты такого маркера. Эти два подхода очень тесно связаны между собой, но в тоже время в зависимости от характера решаемой задачи, морфометрических и гидрологических особенностей рассматриваемых водных объектов их эффективность может очень существенно различаться.

Постановка задачи

Механизм формирования течений также в значительной мере определяет методы и технологии способов оценки скоростей течений. Стоковые течения традиционно исследуются по технологии с подходами Эйлера. Если ставится задача измерения расходов воды на некотором бесприточном участке водотока, то использование подхода Эйлера является наиболее эффективным, и традиционные гидрометрические методы ориентированы на использование этого подхода. Традиционно измерения скоростных характеристик потока проводились с использованием различного типа гидрометрических вертушек [1], в настоящее время в измерителях скоростей течений используется широкий спектр физических процессов [2]. В то же время если ставится задача оценки распределения скоростей дрейфовых течений в целом по акватории водного объекта или его достаточно крупного участка, а также оценка коэффициентов горизонтальной диффузии, то подход Лагранжа становится единственно возможным. Такие задачи в первую очередь возникают при оценке зон распространения загрязнения при различных техногенных воздействиях.

Подход Лагранжа строится на основе оценки и последующего анализа перемещающихся в водном объекте маркеров, поэтому ключевое значение в данной технологии имеет способ эффективной фиксации их положения в процессе перемещения по акватории водного объекта. При этом могут использоваться как химические, так и физические маркеры. Выбор оптимальных параметров маркера должен решаться в едином комплексе с используемой системой отслеживания перемещения маркеров (ее возможностей). Традиционно в качестве маркеров наиболее часто используются различные типы поплавков [1, 4], а также фиксируемые изменения физических свойств воды (цвет, удельная электропроводность и т.д.).

Наиболее сложной задачей при исследованиях на основе подхода Лагранжа является эффективное обеспечение фиксации маркеров в пространстве и времени. Использование традиционных геодезических методов на достаточно крупных водных объектах весьма затруднено из-за малых значений углов заложений при фиксации положения маркеров с точки наблюдения, а на малых объектах (водотоках), где они могут быть эффективны, такие задачи не актуальны. Дистанционные методы на основе космоснимков не позволяют оперативно проводить требуемые оценки ввиду низкого разрешения, частоты обновления снимков и стоимости их приобретения. Однако в настоящее время открываются широкие возможности оценки скоростей течений по подходу Лагранжа благодаря развитию технологий на основе использования БПЛА. Первый определенный опыт применения данной технологии в гидрологии при обследовании состояния береговых полос дается в [3]. Применение БПЛА для решения таких специ-

фических задач, как оценка скоростей поверхностных течений и оценка коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии, рассматривается в [4].

Простейшей задачей, на решении которой эффективно можно проиллюстрировать возможности использования технологии БПЛА, является оценка скоростей дрейфовых течений. Согласно многочисленным экспериментальным данным и теоретическим оценкам [5-9], при решении практических задач, как правило, принимается линейное приближение зависимости скорости дрейфового течения (V) от скорости ветра (W), т.е.:

$$V = k_{\text{ветер}} \cdot W, \quad (1)$$

где V – скорость дрейфового течения, м/с; $k_{\text{ветер}}$ – ветровой коэффициент; W – скорость ветра, м/с.

При этом первые достаточно строгие оценки были получены в океанологии [5-9] с допущением, что ветер постоянен как по скорости, так и направлению, а водный объект имеет неограниченную глубину. Особое внимание было уделено оценке изменения направления течения с глубиной по отношению к направлению ветра вследствие эффекта Кориолиса. Данный эффект имеет принципиальное значение для больших глубоких водных объектов, а на небольших мелких водоемах он не может значительно проявляться. В тоже время на этих объектах (небольших, мелких водоемах) принципиальное значение имеют такие характеристики, как морфометрия, вертикальная плотностная стратификация, температура воздуха и воды, пространственная и временная изменчивость ветра.

Как показывают многочисленные экспериментальные данные, полученные на различных водных объектах, наблюдается очень широкий диапазон изменения ветрового коэффициента $0,008 \leq k_{\text{ветер}} \leq 0,06$ [5, 7-9] при задании параметров V и W одной размерности. В чем причина такого широко разброса значений коэффициентов $k_{\text{ветер}}$ для относительно небольших однородных по морфометрическим характеристикам водных объектов?

В [10, 11] на основе достаточно строгого анализа формирования дрейфовых течений в водных объектах было показано, что ветровой коэффициент в соотношении (1) определяется следующим комплексом параметров:

$$k_{\text{ветер}} = \frac{\mu_a}{\mu_w} * \frac{\delta_w}{\delta_a}, \quad (2)$$

где μ_w , μ_a – коэффициенты динамической вязкости, соответственно, воды и воздуха; δ_w , δ_a – толщина вязкого ламинарного подслоя, соответственно, для воды и воздуха.

Учитывая, что динамическая вязкость воды при повышении ее температуры снижается значительно сильнее, чем динамическая вязкость воздуха, отношение $\frac{\mu_{\text{воздух}}}{\mu_{\text{вода}}}$ должно существенно возрастет с увеличением температуры. В то же время, как показано в работах [10, 11], величины параметров δ_w , δ_a определяются скоростью ветра. При этом, как показано в [10], при скорости ветра $W = 1$ м/с отношение $\frac{\delta_w}{\delta_a} = 1,16$, при $W = 2$ м/с $\frac{\delta_w}{\delta_a} = 1,35$, а при $W \geq 3$ м/с $\frac{\delta_w}{\delta_a} = 2,35$.

Таким образом, при оценке ветрового коэффициента $k_{\text{ветер}}$ определяющими параметрами выступают в первую очередь температура воды и скорость ветра.

Поскольку натурные измерения могут выполняться в значительных диапазонах значений температуры воды и скоростей ветра, данные факторы достаточно хорошо объясняют наблюдаемый широкий диапазон экспериментальных оценок коэффициента $k_{\text{ветер}}$. Для удобства оценки данного коэффициента на рис. 1 представлена его

зависимость от температуры при различных скоростях ветра. Так как динамическая вязкость воздуха не очень существенно изменяется в зависимости от температуры, то ее значение принимается при температуре воздуха, соответствующей температуре воды.

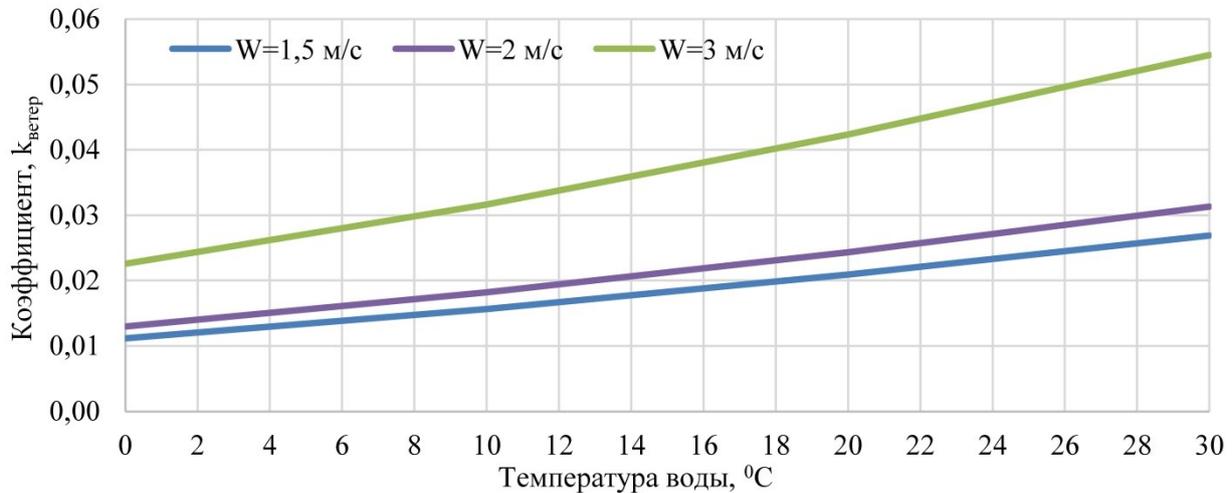


Рис. 1. График изменения $k_{\text{ветер}}$ в зависимости от температуры воды при различных скоростях ветра

Как следует из рис. 1, значения данного коэффициента при температуре воды и воздуха 25°C более чем в 2 раза больше, чем при 5°C .

Данные оценки были получены на лабораторных установках для некоторых модельных условий. В связи с этим принципиальный интерес представляет оценка эффективности этих соотношений на конкретных водных объектах.

Материалы и методы

Отработка технологии оценки скоростей дрейфовых течений с использованием БПЛА была проведена на акватории Верхне-Зырянского водохранилища, которое является важным источником технического водоснабжения предприятий г. Березники. Его морфометрические и гидрологические характеристики даны в [4, 12].

При проведении натуральных экспериментов предварительно на акватории Верхне-Зырянского водохранилища было закреплено 8 контрольных буйев из сверхлегких плавучих материалов (экструзионный пенополистирол) в виде ярких квадратных планшетов $0,6 \times 0,6$ м. Для стабилизации их положения на акватории и минимизации влияния ветра каждый буй закреплялся на 3 разнонаправленных ($\sim 110-130^{\circ}$) растяжки. Размеры, форма и цвет поплавков (маркеров) был выбран так, чтобы обеспечивалось их безошибочное обнаружение на фотографиях с БПЛА при высоте съемки до 400 м. Плановые координаты буйев были определены с помощью ГНСС-приемника в режиме RTK от сети постоянно действующих референчных базовых станций.

В качестве поплавков использовались круглые планшеты диаметром $\sim 0,6$ м (OSB-плита), окрашенные в различные цвета (8 шт.).

Для фиксации параметров метеорологических условий использовалась портативная метеостанция Kestrel, позволяющая в автоматическом режиме записывать данные наблюдений с осреднением в 1 минуту. Установка метеостанции выполнена на одном из центральных буйев на треноге, на высоте 0,5 м от поверхности воды.

Аэрофотосъемка выполнялась с помощью квадрокоптеров DJI Phantom 4 Pro (2 комплекта) с дополнительными АКБ и возможностью их зарядки в полевых условиях.

По завершению подготовительных работ осуществлялся взлет, позиционирование и зависание квадрокоптера над центром акватории в месте планируемого спуска поплавков. Фотофиксация осуществлялась с наклоном камеры в надир (угол съемки 90°) с интервалом 1 минута. Параллельно выполнялись работы по спуску поплавков на акваторию с плавсредства (с наветренного борта). Далее каждые 18-20 минут на высоту зависания «снимающего» квадрокоптера выводился второй БПЛА. Выполнялось его позиционирование, настройка камеры и перевод в режим интервальной съемки. Только после этого первый квадрокоптер возвращался на точку взлета для замены аккумуляторной батареи. Общее время эксперимента составило 280 минут.

За время эксперимента выполнено 3 цикла наблюдений при различных метеорологических условиях. Стартовая зона поплавков (место спуска) была единой для всех 3-х запусков. Непрерывное время интервальной съемки 3-х циклов составило 248 минут. Средняя температура воды в поверхностном слое составила 25°C .

Обработка материалов и расчеты

Все фотоматериалы на начальном этапе обработки поочередно были точно ориентированы и масштабированы в пространстве по фактическим координатам буюв и их отображению на снимках в программной среде ГИС «ArcMap» в единой системе координат (WGS 1984 / UTM Zone 40N). Пространственное разрешение фотоснимков позволяло безошибочно дешифровать каждый поплавок и фиксировать точку его центра. Далее была проведена оцифровка местоположений поплавков со всех снимков и вычислены их плановые координаты для каждого момента времени фотофиксации. Основные параметры метеорологических условий (скорость и направление ветра) были импортированы и представлены в табличной форме. В результате обработки сформированы 3 блока данных с плановыми координатами для 8 поплавков за 78, 110 и 60 минут. В плановом виде фиксированное перемещение поплавков при проведении натуральных экспериментов представлено на рисунке 2.



Рис. 2. Картограмма перемещений поплавков по результатам обработки 3 циклов наблюдений

Обсуждение результатов эксперимента

Как следует из анализа хронологических графиков перемещения маркеров, представленных на рис. 3, в первые 10 минут наблюдений из-за инерционности рассматриваемого процесса отсутствуют связи между направлением ветра и направлением перемещения поплавков. При этом продолжительность данного адаптационного периода зависит от скорости ветра. При достаточно резком усилении ветра до 3-6 м/с уже за первый 6-минутный интервал происходит синхронизация перемещения поплавков с направлением ветра.

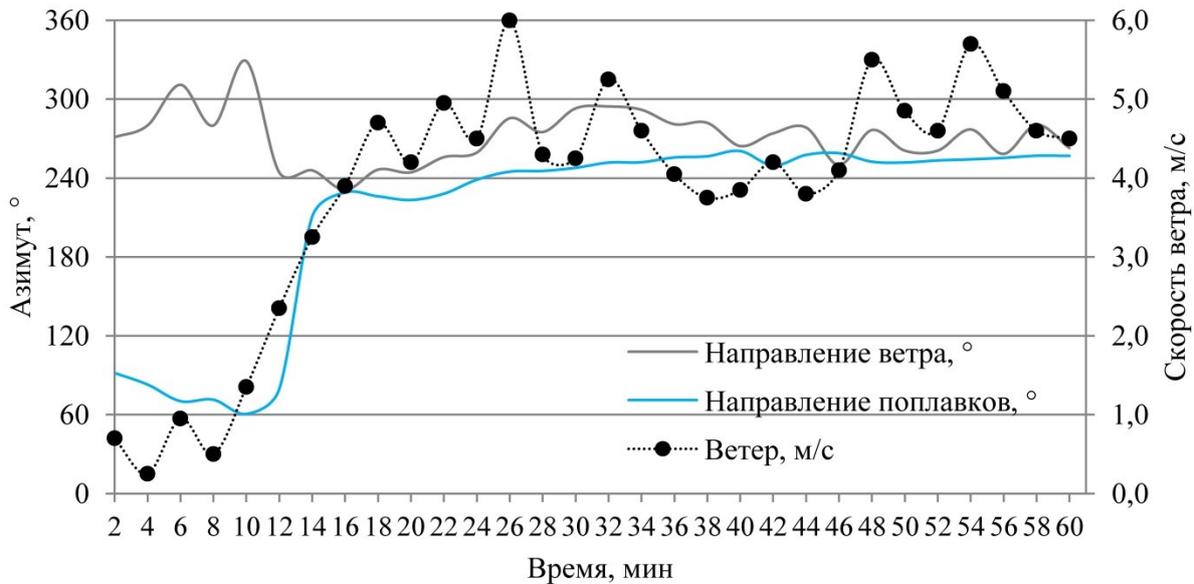


Рис. 3. Хронологические графики изменения скорости ветра и скорости перемещения поверхностных поплавков

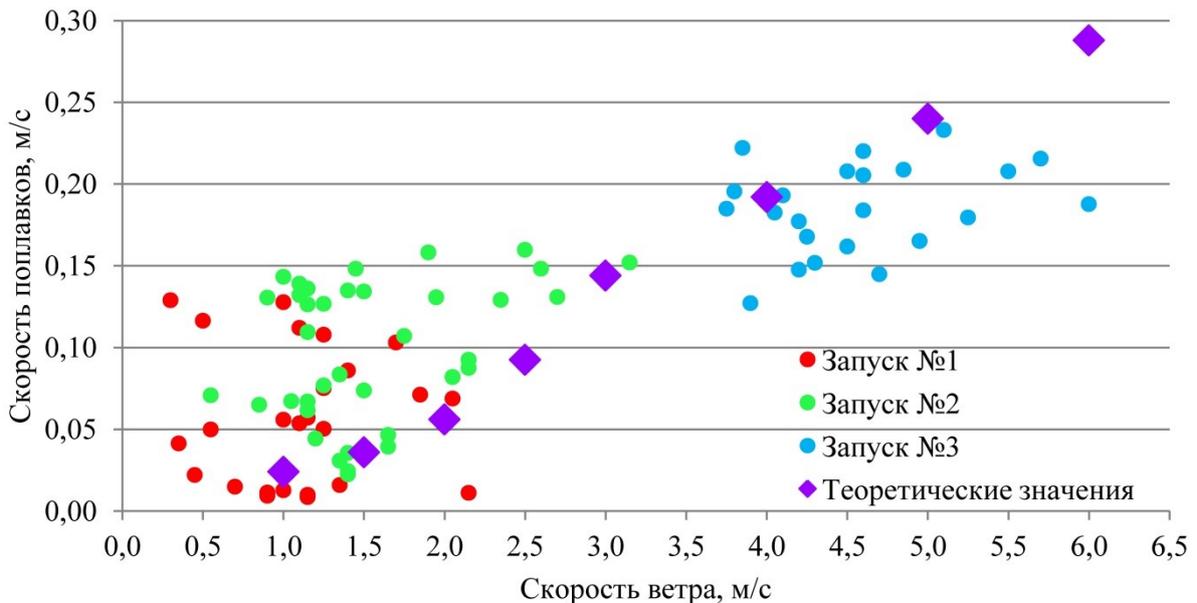


Рис. 4. График связи рассчитанных скоростей перемещения поплавков и скорости ветра по результатам 3-х запусков (теоретические значения определены для температуры воды 25°С)

На основе обработки всех 3-х циклов наблюдений построен результирующий график (рис. 4), отражающий связи рассчитанных скоростей перемещения поплав-

ков и скорости ветра, а также теоретические значения по (1, 2). Из рис. 4 можно предположить, что на не крупных водных объектах при слабых скоростях ветра (менее 1-1,5 м/с) ветровые нагрузки перестают быть доминирующим фактором, определяющим скорость и направление поверхностных течений. При слабых ветровых нагрузках существенную роль играют другие механизмы, и на первый план выходят стоковые течения, а при скоростях ветра более 3 м/с ветровые нагрузки начинают играть доминирующую роль в формировании поверхностных течений в рассматриваемом водном объекте.

Данный эффект достаточно наглядно демонстрируется на рис. 4. При скоростях ветра менее 2 м/с практически отсутствует корреляционная связь между скоростью ветра и скоростью перемещения поплавков (коэффициент корреляции составляет $R_{w,v} < 0,1$), при этом теоретические оценки по соотношениям (1, 2) отражают минимальные скорости перемещения. При скоростях ветра более 3 м/с ветровые нагрузки становятся доминирующим фактором, определяющим дрейфовые течения (коэффициент корреляции $R_{w,v} \sim 0,5$). При этом оценки, полученные по соотношениям (1, 2), определяют верхнюю границу скоростей перемещения поплавков при данных скоростях ветра.

Заключение

Результаты проведенного эксперимента показывают адекватность предложенного метода использования БПЛА при оценке скоростей дрейфовых течений в поверхностных водных объектах. При этом необходимо учитывать, что при малых скоростях ветра ветровые нагрузки перестают быть определяющим фактором при формировании поверхностных течений. Только при скоростях ветра более 3 м/с дрейфовые течения становятся доминирующими. Данные оценки имеют принципиальное существенное значение для оперативной оценки устойчивости функционирования систем водоснабжения в безлюдный период при различных возможных аварийных и чрезвычайных ситуациях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500053-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6, ч. I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Гидрометеоздат, 1978. – 384 с.
2. Сабинин К.Д., Серебряный А.Н. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 5. – С. 639-648.
3. Телегин В.А., Горбачкий В.В., Зацепин А.Г., Ивонин Д.В., Мысленков С.А., Сильвестрова К.П., Баранов В.И., Куклев С.Б., Дудко Д.И., Шпилев Н.Н. Сравнение течений по данным КВ и СВЧ радиолокаторов с данными ADCP и дрейфтеров на гидрофизическом полигоне в Геленджике // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: четырнадцатая Всерос. открытая конф.: электрон. сб. тез. и докл. / ИКИ РАН. – М., 2016. – С. 293.
4. Лучников А.И., Ляхин Ю.С., Лепихин А.П. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов // Водное хозяйство России: Проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 1. – С. 37-46.
5. Лепихин А.П., Ляхин Ю.С., Лучников А.И. Опыт применения БПЛА для оценки коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии на небольших водных объектах // Водные ресурсы. – 2023. – Т. 50, № 2. – С. 139-149. – DOI: 10.31857/S0321059623020116.
6. Карасева Г.Г. Волны, течения и водные массы водоемов: конспект лекций / под ред. Б.Б. Богословского. – Л.: ЛПИ, 1980. – 57 с.: ил.

7. Филатов Н.Н. Динамика озёр. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 166 с.: ил.
8. Csanady G.T. «Pycnobathic» Currents over the Upper Continental Slope // Journal of Physical Oceanography. – 1985. – № 15. – P. 306-315/.
9. Banner M.L., Melville W.K. On the separation of air flow over water waves // Journal of Fluid Mechanics. – 1976. – V. 77, № 4. – P. 825-842.
10. Kawamura H., Toba Y. Ordered motion in the turbulent boundary layer over wind waves // Journal of Fluid Mechanics. – 1988. – V. 197. – P. 105-138.
11. Иванова И.Н., Ильгисонис И.В., Мельникова О.Н., Показеев К.В. Дрейфовое течение на гладкой и взволнованной поверхности воды // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 2006. – № 3. – С. 64-67.
12. Мельникова О.Н., Показеев К.В., Рожновская А.А. Торможение дрейфового течения на склонах ветровых волн в зоне усиления // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 2013. – № 4. – С. 55-58.
13. Мирошниченко С.А., Богомоллов А.В., Возняк А.А., Лепихин А.П., Ляхин Ю.С. Современные особенности гидрохимического режима Верхне-Зырянского водохранилища – источника технического водоснабжения калийных предприятий БКПРУ-2, 4 // Горное эхо. – 2021. – № 1 (82). – С. 15-24. – DOI: 10.7242/echo.2021.1.4.

УДК 551.435.84(470.620)

DOI:10.7242/echo.2024.1.4

ПОДЗЕМНЫЕ ПОЛОСТИ У ТУРЕЦКОЙ КРЕПОСТИ НА РЕКЕ БАКАНКА В КРАСНОДАРСКОМ КРАЕ

М.Ю. Сохин

Русское общество спелестологических исследований, Москва

Аннотация: В 2015-17 гг. МОО «Русское общество спелестологических исследований» (РОСИ) на территории Крымского района Краснодарского края проводила работы по поиску и обследованию подземных полостей с целью оценки их пригодности для экскурсионной деятельности.

Территория Турецкой крепости расположена на крутом мысе, образованном слиянием рек Баканка и Колхозка, к востоку от станицы Нижнебаканская. Пласт сильно корродированного плотного известняка обнажается в 2-х м ниже края обрыва, на высоте 60 м выше уровня рек. В этом обнажении имеются многочисленные навесы и гроты. В западной части обнажения была исследована труднодоступная естественная пещера длиной около 12 м. В 200 метрах от неё находится разведочная штольня длиной 14 метров.

Ключевые слова: гроты, пещера, подземные каменоломни, разведочная штольня, известняк, подземная разработка, ров, карьер.

В 2015-17 гг. МОО «Русское общество спелестологических исследований» (РОСИ) в сотрудничестве с Краснодарской краевой общественной организацией «Содействие возрождению села» на территории Крымского района Краснодарского края проводила работы по поиску и обследованию пещер и старых подземных выработок с целью оценки их пригодности для экскурсионной деятельности. В 2015 г. основное внимание было уделено исследованию подземной каменоломни конца XIX – начала XX веков, расположенной на южной окраине поселка Саук-Дере [1]. В последующие годы в результате опроса местных жителей обнаружены и исследованы подземные выработки, часть которых отнесена к подземным фортификационным сооружениям немецкой «Голубой линии» [2]. Один из участков работ, где проводились исследования, располагался к востоку от станицы Нижнебаканская на р. Баканка.

В геоморфологическом отношении район работ приурочен к зоне предгорий и средневысоких гор северо-западного погружения оконечности Кавказского хребта. Его территория представляет собой предгорную наклонную террасированную равнину, рассе-

ченную глубокими балками и руслами мелких водотоков на отдельные горные массивы с остроугольными и платообразными вершинами. Крутизна склонов различна и нередко достигает 35-38° [3].

Геологическое строение территории характеризуется моноклиальным залеганием пластов известняка-ракушечника, слагающих южное крыло антиклинальной складки. Породы входят в состав комплекса неогеновых отложений Восточного Паратетиса и относятся к сарматскому ярусу. Падение пластов с северо-востока на юго-запад, под углом 12-15°. Известняк плотный, толстослоистый, мощность слоев изменяется от 0,5 до 1,5 м. Между пластами часто встречаются прослой рыхлого, в том числе детритового, материала мощностью от 10 до 30 см. К плоскостям напластования между слоями приурочены многочисленные мелкие каверны карстового происхождения. Карстовые пустоты часто заполнены хемогенной садкой кальцита [4].

Обследованный участок находится на высоком обрывистом мысу, образованном слиянием рек Баканка и Колхозка¹. Здесь расположено древнее городище, называемое местными жителями Турецкой крепостью (рис. 1). Хорошо сохранились валы и рвы, имеющие форму подковы, открытая сторона которой примыкает к обрыву долины р. Баканка. По бытующим легендам, монахами (?) под крепостью были вырыты многокилометровые ходы. В 1980-х гг. якобы в пещеру, которая находилась посередине обрыва, залезли трое детей. Через несколько дней один вылез и сообщил, что остальные погибли. По решению местного руководства вход в пещеру взорвали.

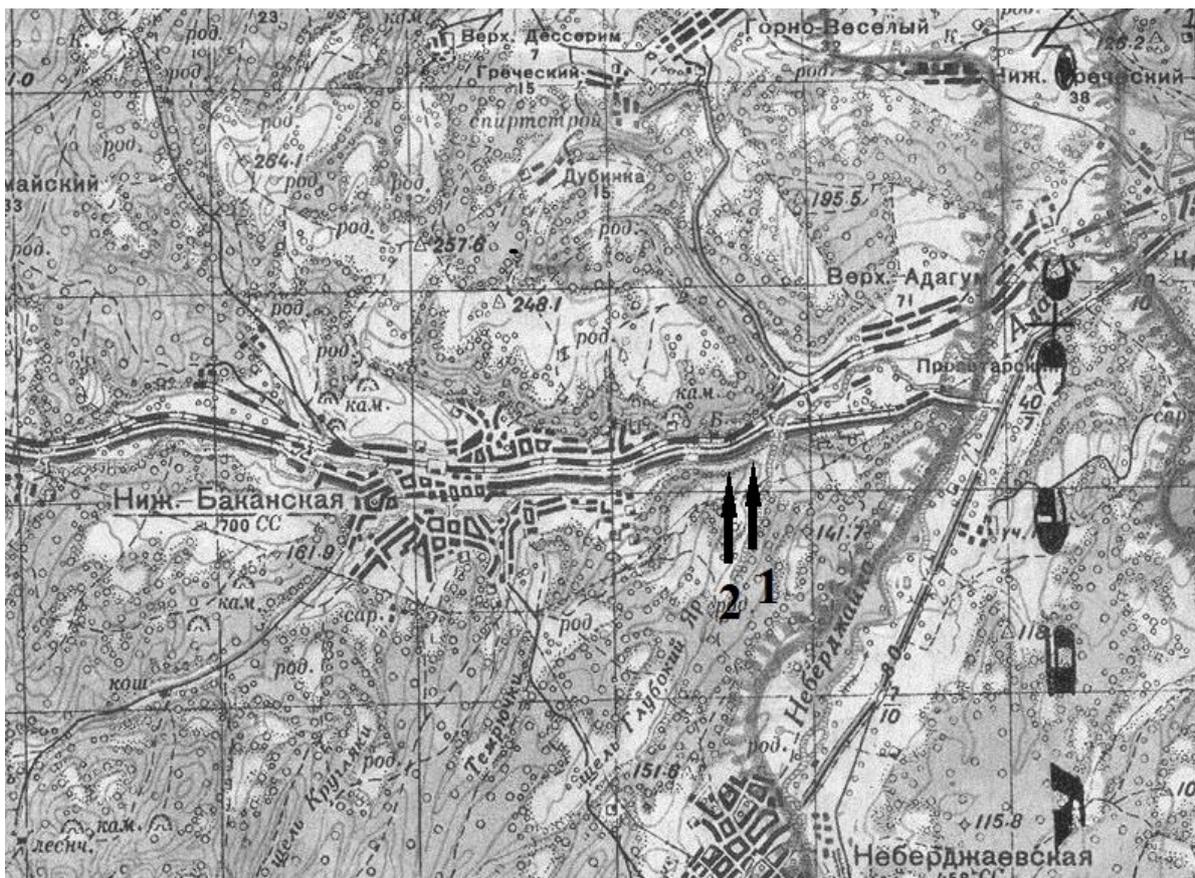


Рис. 1. Положение описываемых объектов у Турецкой крепости на карте Генштаба РККА 1943 г.:
1) естественная пещера; 2) разведочная штольня

¹ Вероятно, последнее является современным местным названием. На карте Генштаба РККА 1943 г. названия у реки нет, а ущелье, в котором она протекает, обозначено как *щель Глубокий Яр*.

В результате осмотра было установлено, что на высоте около 60 м над урезом р. Баканка и в 2 м ниже края обрыва обнажается пласт сильно корродированного плотного известняка мощностью от 3 до 4 м, к выходу которого приурочены многочисленные навесы и гроты глубиной до 3 м (рис. 2). На западной границе обнажения обнаружена и обследована труднодоступная пещера общей длиной около 12 м (рис. 3).

К входу в пещеру ведет узкая полочка, расположенная над 10-метровым обрывом. Высота входа около 1 м, ширина – 1,5 м. От входа идет прямой лаз длиной 6 м и шириной 1,5 м, заканчивающийся тупиком, высота которого составляет 0,7 м. Примерно по середине длины лаза небольшое расширение влево образует камеру, а вправо ведут два прохода, выводящие в большой грот (рис. 4). Ширина ближнего к обрыву прохода 1,7 м, дальнего – 0,4 м. Габариты грота: длина (вглубь) – 4,0 м, ширина – 5,0 м и высота – 0,5-0,7 м. Поверхность массивного плотного известняка сильно корродирована. Во вход грота сверху осыпается грунт, внутрь спускается язык земляной осыпи. Полость имеет, по-видимому, естественное происхождение.

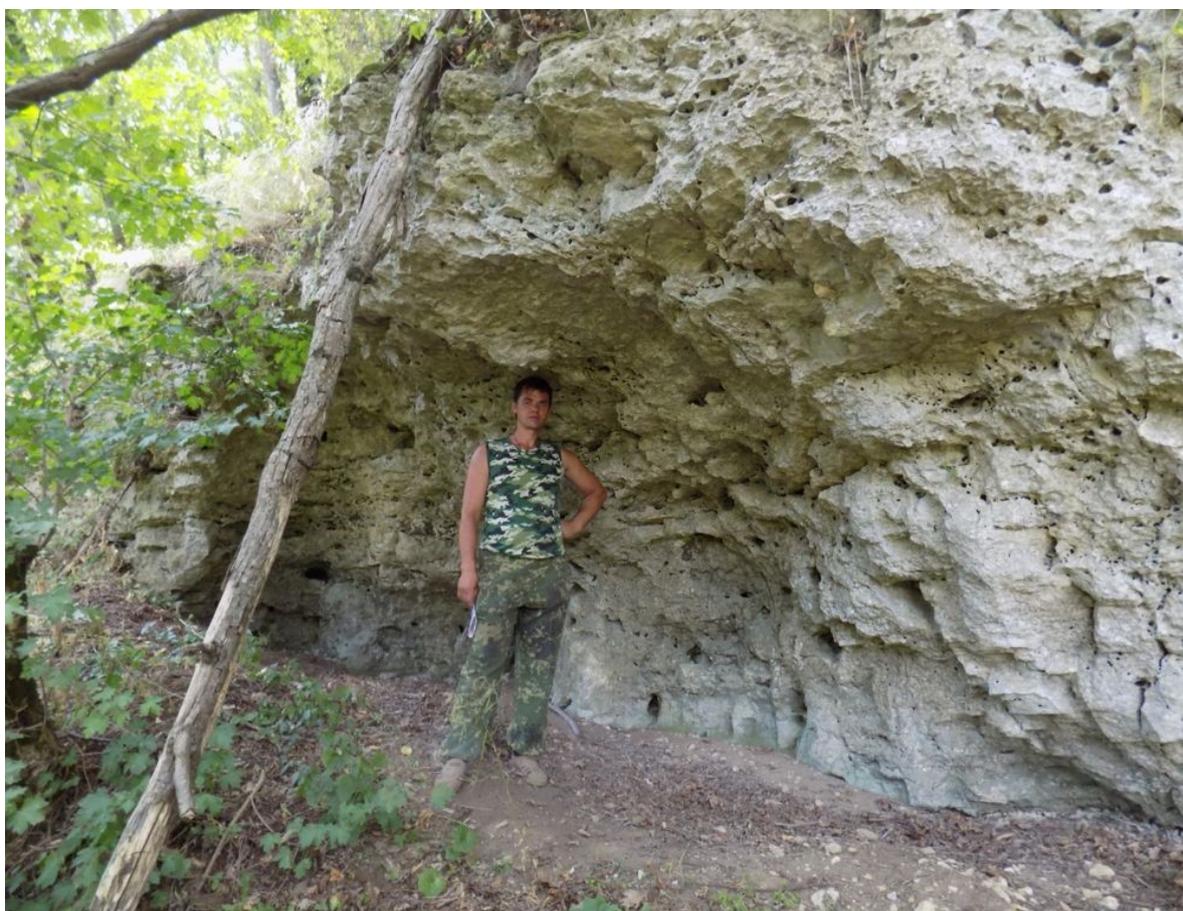


Рис. 2. Навесы и гроты в обрыве

Местные жители рассказали также о небольшой штольне, расположенной примерно в 200 м к западу от естественной пещеры и в 30 м западнее висячего овражка, разделяющего верхнее плато на два блока. Поверхность первого блока расчищена до известнякового слоя и подготовлена под разработку камня карьерным способом. Здесь встречаются небольшие уступы высотой до 1 м, образовавшиеся при послойном выпиливании камня (рис. 5). Разработка, по словам местных жителей, велась после войны, после того, как перестали разрабатывать карьер в ущелье Саук-Дере, у одноимённого посёлка.

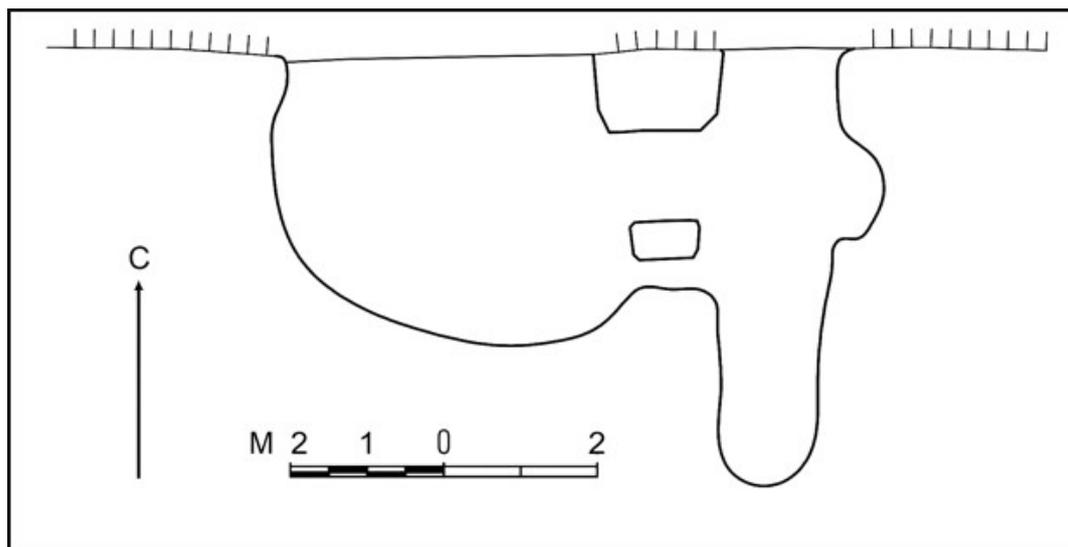


Рис. 3. Схема естественной пещеры (глазомерная съемка: А. Голубь, 2015)



Рис. 4. Внутренний вид естественной пещеры

Перед устьем штольни расположена небольшая технологическая площадка шириной 6 м и длиной 7-8 м, имеющая уклон к обрывистому склону. Приустьевая часть площадки образована в результате выпиливания камня из скального выступа и расширена отвалом породы в сторону обрыва (рис. 6). Высота обрыва от устья штольни до реки составляет примерно 40-45 м, от площадки до верхней бровки – около 18-20 м. Протяжённость штольни 14 м.



Рис. 5. Уступ небольшого карьера на поверхности



Рис. 6. Вход в штольню

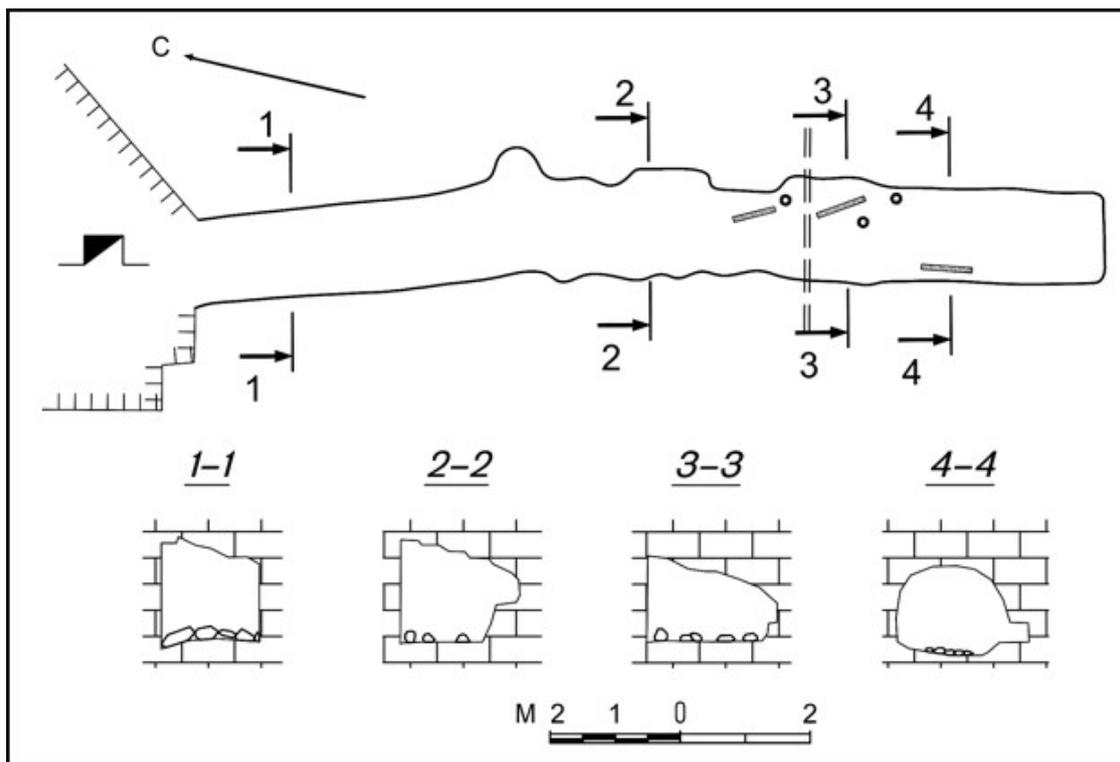


Рис. 7. План штольни (съёмка: М. Сохин, А. Голубь, 2017)

Высота входа 1,1 м, ширина – 1,35 м, портал не нарушен. Видимая мощность монолита над входом – 2,5 м. Выработка пройдена по простиранию пласта в южном направлении, в ракушечнике жёлтого цвета разной плотности (рис. 7). Из-за меняющегося падения пластов сечение галереи имеет ассиметричную форму: высота по восточной стенке отличается от высоты по южной на 0,2-0,6 м. Первоначальная ширина штольни 1,3 м, но из-за разрушения стен ширина местами увеличивается до 1,8-2,0 м. Высота на всём протяжении колеблется в пределах 1,4-1,6 м, только в самой дальней точке забоя она достигает 1,87 м. На протяжении 4,4 м от входа стены сохранили первоначальный вид, на них видны следы от ручного пиления (рис. 8). На 4,5 м галерея расширяется и на высоте 0,9 м здесь расположена округлая ниша, размерами 0,5×0,5 м.

Кровля штольни слабонаклонная, вся в вывалах. С удалением от входа камень становится менее плотным, возрастает число обрушений, из-за которых сечение галереи утратило исходную форму. В 1,5 м от входа по левой стороне имеется свежий вывал глубиной 0,2 м и протяжённостью 2 м. В 10 м от входа штольню пересекает вертикальная тектоническая трещина раскрытием 0,1-0,2 м, по которой происходит просыпание грунта с поверхности. Трещина просматривается на 0,5 м в обе стороны. В западном направлении она заполнена грунтом, в восточном и над штольной заполнитель отсутствует, а стенки сильно корродированы; диаметр отдельных карров достигает 8-10 см. После трещины угол падения пластов увеличивается и, соответственно, наклон кровли с востока на запад сильно возрастает (рис. 9). На последних 4 м в галерее произошел сплошной вывал кровли, который образовал длинный купол высотой до 0,5-0,6 м от свода. В конце выработки камень очень рыхлый («незрелый»). По рассказам, именно по этой причине его перестали пилить (рис. 10).

Дно штольни на всём протяжении покрыто мелкими глыбами, дресвой и остатками деревянной крепи. Позже, после завершения работ, в забое производились раскопки. С 10 по 12,5 м на дне лежит отвал дресвы, перемещённой из забоя. Что искали в послевоенной штольне – непонятно.



Рис. 8. Привходовой участок штольни



Рис. 9. Увеличение наклона кровли после тектонической трещины



Рис. 10. Переработанный обвалами забой штольни

Сохранились три деревянные крепи диаметром 6-8 см, установленные с двух сторон от трещины, ещё три опоры повалены. Первоначально крепей в выработке было значительно больше. В более позднее время часть из них зачем-то была вынесена на поверхность и раскидана по технологической площадке.

В привходовой части штольни на стенах имеются неразборчивые из-за отшелушивания породы надписи и глубоко прорезанная дата «1960». Несмотря на обилие граффити, свидетельствующих о большой посещаемости, мусор в каменоломне отсутствует.

Очевидно, штольня изначально закладывалась не как добычная, а как разведочная. На это указывают малые размеры технологической площадки перед входом и отсутствие подъездной дороги, что не позволило бы обрабатывать и транспортировать выпиленные блоки камня. Рассказы местных жителей о том, что блоки спускали вниз на дорогу, не выдерживают критики.

В 100 м к юго-западу от штольни находится залесённое плато, слабонаклонённое к северу, в сторону ущелья. Здесь, с двух сторон от грунтовой дороги, идущей со стороны р. Баканки, расположен участок с многочисленными рвами и воронками. В бортах некоторых из них вскрываются известняки. Длина рвов достигает 20 м, ширина – 5 м, а глубина – от 1 до 2 м. Не исключено, что они могут быть искусственного происхождения. Диаметр воронок колеблется от 2 до 4 м. В центральной части поля находится ров длиной 15 м и шириной в нижней части около 2 м, стенки которого до высоты 1,8 м вскрывают известняки. В северном направлении на поверхности возрастает количество камней, представленных глыбами разных размеров и выходами коренных пород.

Следует отметить, что в силу труднодоступности выхода пласта известняка, к которому приурочены естественные и искусственные полости, полностью осмотреть его без применения специального оборудования невозможно. Поскольку пласт сильно закар-

стован, в нем могут быть еще пещеры, пока что неизвестные. Поэтому местность, прилегающая к Турецкой крепости, имеет хорошие перспективы для дальнейших спелеологических исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сохин М.Ю., Долотов Ю.А. Подземные выработки у поселка Саук-Дере на Кубани // Вестн. Краснодарского регион. отд-ния Русского географич. о-ва: сб. статей. Вып. 9. – Краснодар, 2017. – С. 396-409.
2. Сохин М.Ю., Фатикова З.Х. Оборонительные сооружения «Голубой линии» как памятник исторической битве за Кавказ // Вестн. Краснодарского регион. отд-ния Русского географич. о-ва: сб. статей. Вып. 9. – Краснодар, 2017. – С.410-420.
3. Крымский район. – Текст электронный. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Крымский_район. (Дата обращения 15.03.2024).
4. Воробьев И.Е. Поиск ископаемых на Северо-Западном Кавказе: Краснодарский край и республика Адыгея. – Краснодар, 2014. – 300 с.

УДК 551.243

DOI:10.7242/echo.2024.1.5

БАЗА ДАННЫХ РАЗЛОМОВ СОЛИКАМСКОЙ ВПАДИНЫ

Д.Е. Трапезников, О.И. Галинова
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Представляются методика создания и содержание базы данных разломов Соликамской впадины (БД), обобщающей данные о разломах и разломных зонах, выделенных различными методами. На данный момент БД включает 355 разломов и разломных зон, снабжённых географической привязкой объектов, и спроецирован в WGS84. Каждый объект БД снабжён их названиями, данными о морфологии и кинематике, амплитудах смещений за разные отрезки времени, важнейших параметрах разломов, их кинематике в рамках принятой в структурной геологии типизации, ранге скорости позднечетвертичных движений и степени достоверности выделения разлома в качестве активного. База данных предполагает периодическое обновление и дополнение новой информацией.

Ключевые слова: Соликамская впадина, Верхнекамское месторождение солей, разломы, тектоника.

Введение

Исследование тектоники Соликамской впадины невозможно без составления единого реестра разломов в качестве отправной точки для анализа данных. В связи с этим данная работа является начальным шагом на пути к переоценке и анализу тектонического строения Соликамской впадины.

Базы данных (БД) стали неотъемлемым инструментом современных научных исследований. Однозначность и однородность представления информации в форме базы данных открывает широкие перспективы изучения геологических объектов и явлений.

Основными объектами предлагаемой базы данных (рис. 1) являются разломы и разломные зоны, расположенные на различных стратиграфических уровнях, выделенные различными авторами с помощью геологических, дистанционных и геофизических методов. Также в базу включены современные активные разломы. С практической точки зрения БД полезна для прогнозирования разного рода геодинамических опасностей, прежде всего, сейсмической, а также геомеханической, при проектировании подземных выработок. С другой стороны, БД имеет крайне важное научное значение в качестве основы при тектоническом и геодинамическом анализе.

В качестве основы строения БД с четко выстроенной структурой и приятными индексами нами использована База данных активных разломов Евразии (Zelenin et al, 2022).

В отличие от нее, в представленной БД разломы являются геологически разновозрастными структурами, располагающимися в различных стратиграфических и структурных комплексах и отражающими различные тектонические события.

Первая попытка собрать воедино все данные о разломах территории Соликамской впадины была предпринята двадцать лет назад в широко известной в определенных кругах монографии «Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей» (Кудряшов и др., 2004). Опубликованная в монографии схема разломов (рис. 1) активно тиражируется в многочисленных публикациях и научно-исследовательских отчетах. В условиях интенсивной эксплуатации недр в пределах исследуемой площади специалисты часто обращаются к существующей схеме разломов для решения различных задач. Опыт последних лет показал, что схема требует определенной доработки и актуализации. Также стоит обратить внимание, что технические возможности по сведению в едином документе разнообразных картографических источников в начале 2000-х годов были крайне ограничены. В связи с этим одним из первых шагов в нашем исследовании было воссоздание схемы разломов ВКМС с помощью современных средств картографирования по первоисточникам.

2. Принципы и методы создания базы данных

Объектами базы данных являются разломы и зоны разломов, а также зоны предполагаемых дизъюнктивных нарушений, выраженные в геофизических полях. В качестве исходного материала для заполнения БД использованы различные геологические карты, тектонические схемы, карты четвертичных отложений и геофизических полей различных масштабов (от 1:10 000 до 1:1 000 000), как опубликованные, так и вышедшие в научно-исследовательских отчетах. Создание базы данных реализовано в программном комплексе со свободной лицензией QGIS посредством создания shp-файлов, спроецированных в WGS-84.

Разные исследователи, исходя из имеющихся у них данных и представлений, предлагают авторские варианты карт разломов для одной и той же территории. Посредством предлагаемой базы данных планируется аккумулировать все материалы по мере их поступления без их оценки и разбраковки. Это является как недостатком, так и преимуществом предлагаемой БД. С одной стороны, БД аккумулирует данные о разломах, которые в дальнейшем не подтвердятся другими методами исследований, или появятся новые данные, противоречащие более ранним. С другой стороны, важно отслеживать историю накопления данных и уточнять уже существующие структуры.

3. Описание свойств объектов базы данных

Геометрия разломов БД определяется координатами узлов их линий в shp-файле. Файл создан в результате векторизации бумажных карт или конвертации из базы данных активных разломов. Кроме графического отображения, формат shp-файла позволяет хранить дополнительную информацию в виде таблицы атрибутов. В общей таблице каждому объекту (разлому) соответствует отдельная строка, куда производится запись всех сведений о нем. В этой строке каждой характеристике объекта отвечает отдельное поле. Содержанием поля является значение соответствующего атрибута объекта БД.

В связи с этим необходимо подобрать определенные параметры, позволяющие в полной мере охарактеризовать каждый разлом. Кроме того, требуются дополнительные параметры, позволяющие сравнивать разломы относительно друг друга. За основу нашей базы данных принят формат хранения информации, предложенный в БД активных разломов (Zelenin et al, 2022), дополненный несколькими параметрами (табл. 1). Так, мы вслед за коллегами выделяем две группы атрибутов: обосновывающие и оценочные. Обосновывающие атрибуты представляют собой данные из материалов первоисточников, а оценочные присваиваются авторами Базы данных на основании нескольких параметров и характеристик разломов.

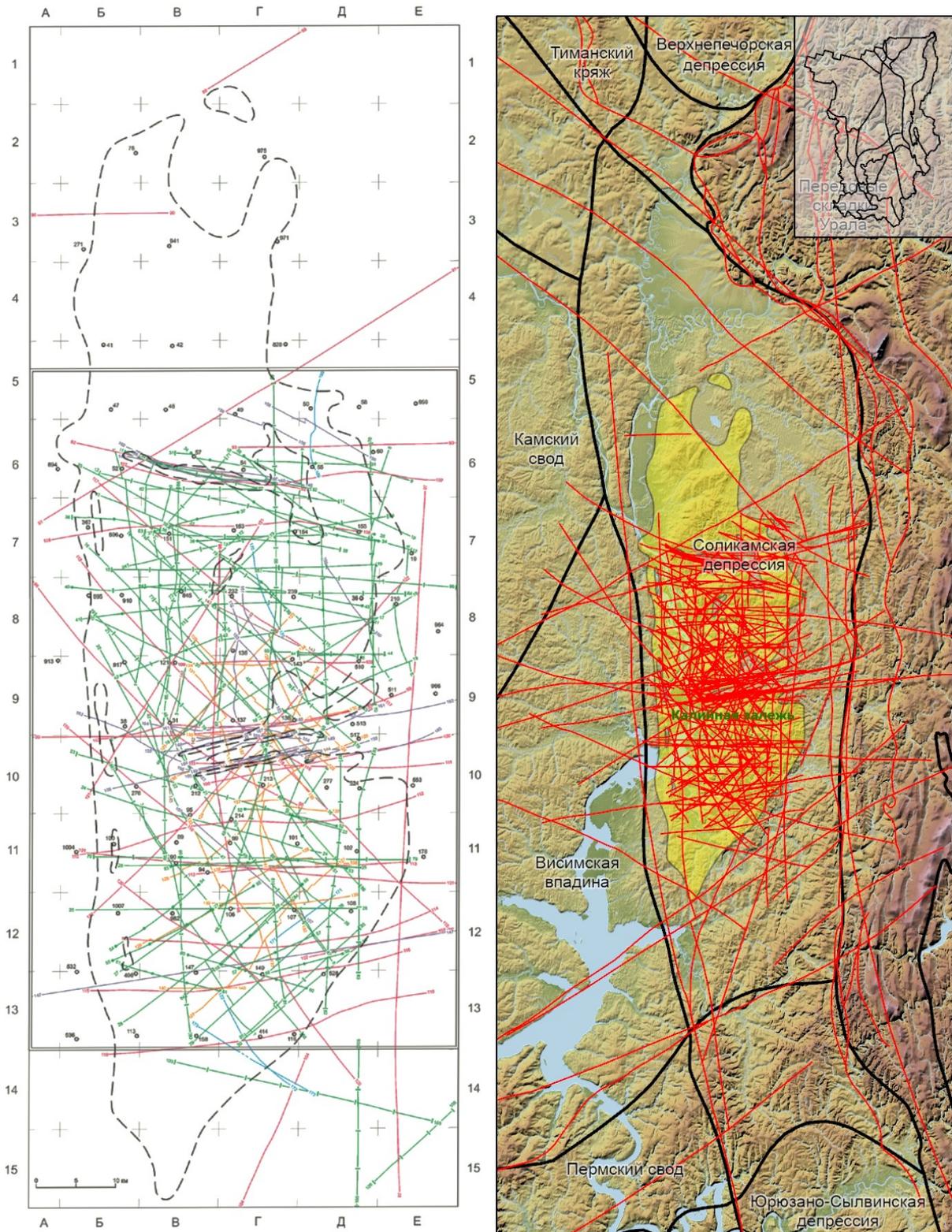


Рис. 1. Схема района исследования:

слева – схема разломов в пределах Верхнекамского месторождения солей (Кудряшов и др., 2004);
 справа – схема разломов, предлагаемая в рамках данной работы, наложенная на цифровую модель рельефа Соликамской впадины и ее окрестностей с элементами тектонического районирования. Цифровая модель рельефа подготовлена по материалам космической радарной съемки, данные с сайта viewfinderpanoramas.org; гидросеть представлена по материалам OpenstreetMap; и тектонического районирования по материалам В.М. Проворова (1973)

Обосновывающие атрибуты AUTH, NAME, PARM, TEXT, N_fault, method, strata, geometry, type и scale – максимально точно и развернуто представляют те сведения, которые присутствуют в первоисточниках. Эти сведения отражены в атрибутах как непосредственно – в виде кратких конкретных характеристик объектов, так и косвенно – в виде ссылок на источники, содержащие развернутое описание и обоснование этих характеристик.

Атрибут AUTH содержит сведения о первоисточнике в формате библиографической ссылки, перечисленной в списке литературы в этой статье, а также содержащейся в отдельном текстовом файле вместе с БД. Атрибут NAME содержит персонализированное название разлома или разломной зоны. Атрибут PARM содержит информацию о возрасте последних движений, скорости перемещений, кинематических параметрах, сейсмической активности и других конкретных сведениях, взятых из первоисточников. Эти сведения оформлены по определенным правилам записи в компактном виде, преимущественно в числовых значениях и символах-индексах. Атрибут PARM содержит сведения для определения значений оценочных атрибутов, в том числе, достоверности активности разломов.

Формат записи включает в себя элементы, названные маркерами свойств. После каждого маркера ставится знак равенства, за которым приводится значение свойства, обозначенного маркером. В качестве маркеров используются либо числовые индексы (см. http://neotec.ginras.ru/index/database/AFEAD_rasshifrovka-chislovyh-markerov-svoystv-gazlomov.pdf) или различные сокращенные термины и обозначения свойств объекта, расшифрованные в прилагаемом к БД гиде для пользователя, либо названия параметров, взятые из цитируемых первоисточников.

Кроме того, в предлагаемую базу интегрированы сведения из схемы разломов Верхнекамского месторождения (Кудряшов и др., 2004). В частности, нами сохранена нумерация разломов в упомянутой схеме, записанная в атрибуте N_fault, а также сведения о методе, с помощью которого был выделен тот или иной разлом, записанные в атрибуте method. Среди них разломы, выделенные по геологическим данным, по данным дистанционного зондирования Земли, а также разломы, выделенные с помощью геофизических методов (табл. 2).

Помимо атрибутов, фигурирующих в упомянутых источниках, нами введены несколько новых: ACT, strata, geometry, type, scale и prim. Атрибут ACT введен специально для разделения разломов активных и неактивных. Активные разломы заимствованы из БД активных разломов вместе с их характеристиками.

Таблица 1

Описание атрибутов БД разломов Соликамской впадины

Имя поля	Описания поля
fault_id	уникальный идентификатор
AUTH	библиографическая ссылка
NAME	наименование разлома и (или) разломной зоны
TEXT	дополнительные сведения о разломе
act	статус разлома, активный (active) или неактивный (inactive)
PARM	характеристики разлома, записанные в определенном формате
SNS1	главная компонента движения, преобладающий кинематический тип.
SNS2	второстепенная компонента, меньшая по амплитуде или менее выраженная.
SIDE	идентификатор относительно поднятого крыла структуры.
RATE	ранг скорости молодых тектонических движений в пределах структуры
CONF	ранг достоверности оценки нарушения как активной структуры.
N_fault	номер разлома в реестре из монографии (Кудряшов, 2004)
method	метод с помощью которого выделен разлом
strata	литолого-стратиграфические комплексы, вмещающие разломы
type	тип разлома (линия/line или зона/zone)
scale	знаменатель масштаба карты, на которой был выделен разлом
prim	краткое примечание

Таблица 2

Методы исследований, с помощью которых выделялись разломы

Метод выделения разломов	Индекс в shp-файле	Количество разломов
Геологические методы	geol	
Дистанционные методы (анализ аэро- и космоснимков)	RS	
Сейсморазведочные	seis	
Гравиразведочные	grav	
Магниторазведочные	magn	
Электроразведочные	elec	
Нет сведений	No	

Атрибут *strata* содержит сведения о стратиграфическом комплексе, в котором находится данный разлом, а точнее, какой комплекс пород пересекает тот или иной разлом (табл. 3). На данный момент мы разделяем разломы архейско-протерозойского фундамента и разломы осадочного чехла. Последние разделены более детально на сквозные разломы палеозойского осадочного чехла, разломы подсолевого комплекса палеозойского осадочного чехла, а также разломы солевого и надсолевого комплекса. К последним также относятся разломы, распространяющиеся глубже в солевой комплекс.

Атрибут *type* содержит сведения о типе выделенного разлома, а именно – выделен разлом в виде линии или некой зоны. В частности это актуально для некоторых разломов, которые выделены геофизическими методами, и их месторождение установлено в виде зоны.

Атрибут *scale* содержит информацию о масштабе карты, на которой был выделен тот или иной разлом. В некоторых источниках фигурируют детальные карты нескольких масштабов. Крупномасштабные, на которых выделены разломы, и обобщающие более мелкомасштабные карты. Чаще всего между разными масштабами наблюдаются разночтения. При заполнении базы предпочтение отдавалось более крупномасштабным картам, как наиболее точным.

Таблица 3

Литолого-стратиграфические комплексы, вмещающие разломы

Комплекс	Индекс в shp-файле
Архейско-протерозойский фундамент	B
Сквозные разломы палеозойского осадочного чехла	PZ
Подсолевой комплекс палеозойского осадочного чехла	SubSalt
Солевой комплекс	Salt
Надсолевой комплекс	TopSalt
Положение не установлено	No

Оценочные атрибуты SNS1, SNS2, SIDE, RATE и CONF проиндексированы ограниченным набором условных обозначений. Кинематическая характеристика объекта БД представлена комплексом из трех атрибутов (табл. 4, 5). Атрибут SNS1 является обязательным, так как обозначает главную компоненту тектонического движения и, соответственно, является ключевым признаком внесения разлома в БД. Атрибут SNS2 является дополнительной характеристикой и отображает второстепенную компоненту тектонического движения. Если второстепенной компоненты нет, то поле в БД остается пустым.

Атрибут SIDE является индикатором относительно поднятого крыла и заполняется только если какой-либо из первых двух атрибутов указывает на присутствие вертикальной составляющей движения. Отсутствие значения атрибута SIDE допустимо лишь для разломов без вертикального смещения – сдвигов и раздвигов. Все эти атрибуты являются оценочными, поскольку для выбора их значений анализируется весь комплекс обосновывающих атрибутов, касающихся кинематики объекта, и контекстных материалов, и учитываются структурные соотношения со смежными объектами БД.

Атрибут RATE отражает как скорость взаимного перемещения крыльев разлома, так и степень концентрации деформаций в пределах объекта как элемента зоны нарушений. В последнем случае под атрибутом RATE понимается, скорее, ранг объекта в общей системе нарушений, оцениваемый с учетом фонового уровня активности региона и насыщенности территории активными разломами.

Атрибут достоверности CONF определяет саму возможность внесения объекта в БД активных разломов. По степени достоверности признаков активности объекты БД разделены на четыре категории: А, В, С и D, где к категории А относятся наиболее достоверные, а к категории D наименее достоверные активные разломы. Объекты более низкой категории не могут переходить в более высокие категории достоверности, пока не получают конкретного обоснования своей активности.

Таблица 4

Кинематические типы разломов (атрибут SNS1 и SNS2)

Кинематический тип разлома	Индекс в shp-файле
Сброс	N
Листрический сброс	L
Взброс	R
Левый сдвиг	S
Правый сдвиг	D
Надвиг	T
Раздвиг	E
Недиагностируемое вертикальное смещение блоков	V
Кинематика не установлена	U

Таблица 5

Индикатор относительно поднятого крыла (атрибут SIDE)

Поднятое крыло структуры	Индекс в shp-файле
северное	+N
северо-восточное	+NE
восточное	+E
юго-восточное	+SE
южное	+S
юго-западное	+SW
западное	+W
северо-западное	+NW

4. Обсуждение результатов

Созданная геоинформационная база данных позволяет четко определить пространственное положение разломов в районе Соликамской впадины и ее окрестностей. Переведя исходные данные из графических объектов (растровых или векторных) в про-

странственные объекты, стало возможным выполнить увязку каждого разлома с первоисточником.

База данных разломов Соликамской впадины на текущий момент включает в себя сведения о 355 разломах и разломных зонах. Часть из них заимствована из схемы разломов Верхнекамского месторождения (Кудряшов и др., 2004), часть из БД активных разломов Евразии (Zelenin et al, 2022), а также из различных источников, ранее не учтенных (Проворов, 1973; Денисов, 1980; Харитонов, 2002). Концепция представленной базы данных предполагает ее постоянную актуализацию.

При использовании данных с обобщающей схемы разломов Верхнекамского месторождения (Кудряшов и др., 2004) нами было проведено перепроецирование самой схемы в программе QGIS, а также оцифрованы и спроецированы все первоисточники, на которые ссылаются авторы. Затем была проведена сверка вариантов разломов на общей схеме и на отдельных первоисточниках, в ходе которой были установлены значительные пространственные невязки. В некоторых случаях пространственное смещение достигало несколько сотен метров, а в отдельных достигало нескольких километров (рис. 2). Это указывает на преимущество современных методов картографических работ и необходимость актуализации данных.

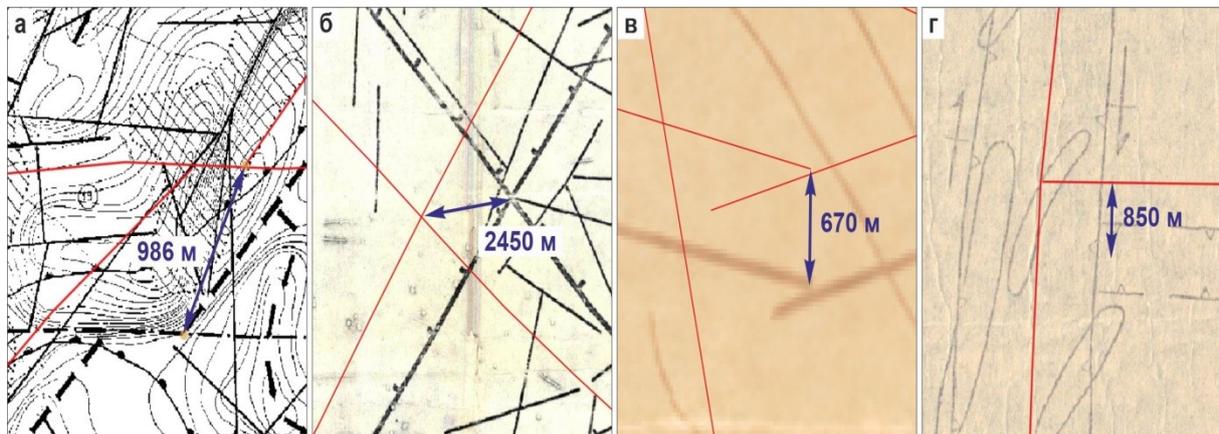


Рис. 2. Демонстрация смещения разломов (в метрах) на схеме разломов Верхнекамского месторождения (красные линии, Кудряшов и др., 2004), относительно оригинальных материалов: а – С.В. Аверьянов, 1992; б – Р.Н. Валеев, 1974; в – Л.Д. Нояксова, 1990; г – Г.Г. Кассин, 1985 и 1991

Выводы

Представляемая новая база данных разломов Соликамской впадины и прилегающей территории (БД) обобщила в едином ключе обширный и разнообразный объем материалов о разломах и разломных зонах различных источников. Этот материал, состоящий из 355 объектов, единообразно форматирован и снабжен географической привязкой и спроецирован в WGS 84.

База данных составлена по методике, частично заимствованной из базы данных активных разломов Евразии, разрабатываемой более 30 лет в лаборатории неотектоники и современной геодинамики ГИН РАН. Строение базы данных выстроено таким образом, что каждый её объект снабжен двумя видами атрибутов – обосновывающими и оценочными, записанными в унифицированном ключе.

Обосновывающие атрибуты содержат сведения о разломах, выделенные в первоисточниках, такие как названия, данные о морфологии и кинематике (направлении перемещений), амплитуды смещений за разные отрезки времени и другие характеристики, представленные в текстовом виде, а также сведения об источниках информации.

Оценочные атрибуты представляют собой систему символов (индексов), отражающих важнейшие параметры активных структур – их кинематику в рамках принятой в структурной геологии типизации, ранг скорости позднечетвертичных движений и степень достоверности выделения структуры в качестве активной. Эти индексы позволяют легко сопоставлять объекты по любому из атрибутов компьютерным способом между собой и с любыми другими видами оцифрованной информации.

Представленная база данных позволяет получить информацию об отдельных разломах и их проявлениях, а также решать более общие задачи – тематического картографирования, определения интенсивности и параметров проявления современных геодинамических процессов, оценки сейсмической и других геодинамических опасностей территорий, тектонического районирования, а также учитывать структуры при планировании горных работ. Формат построения БД допускает её постоянное пополнение и коррекцию с появлением новых сведений.

Дополнительные материалы

База данных разломов Соликамской впадины доступна для скачивания по ссылке <https://owncloud.aerologist.ru/index.php/s/CapXWQ7NB6ORBaw>. Данные включают в себя Базу данных разломов в формате shp-файла в системе координат WGS84 с сопроводительными материалами. Shp-файл подходит для изучения в любой ГИС-программе, в том числе QGIS и GoogleEarth. На текущий момент в БД хранятся записи 355 разломов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания «Процессы рудообразования и гипергенной трансформации эвапоритов Пермского Предуралья», рег. № НИОКТР 124020500052-9.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Опубликованные материалы

1. Разрывная тектоника Верхнекамского месторождения солей / [А.И. Кудряшов, В.Е. Васюков, Г.С. Фондер-Флаас и др.]; ГИ УрО РАН, ПГУ; под науч. ред. А.И. Кудряшова. – Пермь, 2004. – 194 с.: ил.
2. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – 2-изд., перераб. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.
3. Проворов В.М. Основные черты тектоники нижнепермских отложений и ее связь с глубинным строением Среднего Приуралья // Нижнепермские отложения Камского Предуралья. – Пермь, 1973. – С. 28-48. – (Тр. ВНИГНИ. Вып. 118).
4. Zelenin E.A, Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. – 2022. – V. 14, № 10. – P. 4489-4503.

Фондовые материалы

1. Детальные аэрогеологические и морфологические работы по уточнению геолого-структурного строения Верхнекамского месторождения калийных солей: Отчет о НИР / Аверьянов С.В. и др. – Екатеринбург, 1992. – (Фонды ОАО «Уралкалий»).
2. Отчет о геофизических работах на Верхнекамской площади за 1987–1989 гг. / Беляев. В.П. и др. – Пермь, 1989. – (Фонды ОАО «Уралкалий»).
3. Разломы фундамента, зоны тектонической трещиноватости Соликамской впадины и их влияние на катагенные и гипергенные преобразования пород продуктивной калиеносной зоны: [рукопись ВНИИгеолнеруд] / Валеев Р.Н. и др. – Казань, 1974. – (Фонды ОАО «Уралкалий»).
4. Отчет по геологическому доизучению масштаба 1:200000 групповым методом листов Р-40-XXXIII (южная половина), Р-40-XXXIV (юго-западная часть), О-40-III, О-40-IV (западная половина), О-40-IX (северная половина), О-40-X (северо-западная часть) в бассейнах рек Камы, Яйвы, Глухой

- Вильвы на среднем Урале за 1977–1980 гг. / Денисов М.И. и др. – Пермь, 1980. – (Фонды ФГУ Пермского ТФГИ).
5. Анализ результатов геологических и геофизических исследований по шахтному полю БКПРУ–2 Верхнекамского месторождения калийных солей: Отчет о НИР / ВНИИГ; Джиноридзе Н.М. и др. – Л., 1987. – (Фонды ОАО «Уралкалий»).
 6. Анализ результатов геологических, гидрогеологических и геомеханических исследований по комплексному освоению минеральных ресурсов Соликамской впадины: Отчет о НИР / ОАО «ВНИИГ», фирмы «Агрохимбезопасность»; Джиноридзе Н.М. и др. – СПб.; М., 2002. – (Фонды ГИ УрО РАН).
 7. Обобщить результаты геологических исследований Верхнекамского месторождения калийных солей с целью выявления площадных изменений структурных и литогеохимических параметров промышленной зоны, водозащитной толщи и надсолевого комплекса пород: Отчет о НИР / АО ВНИИГ; Джиноридзе Н.М. и др. – СПб, 1997. – (Фонды ОАО «Уралкалий»).
 8. Обобщение материалов детальных аэромагнитных съемок в комплексе с другими геофизическими методами на территории Пермского Приуралья: Отчет о НИР / УГИ; Кассин Г.Г. – Свердловск, 1985. – (Фонды ФГУ Пермского ТФГИ).
 9. Геологическая интерпретация результатов детальных гравиметрических и магнитных съемок: Отчет о НИР по теме 62–203–89 / УГИ; Кассин Г.Г. и др. – Свердловск, 1991. – (Фонды ОАО «Уралкалий»).
 10. Отчет о результатах гравиметрической съемки м-ба 1:25000 Верхнекамской площади, проведенной в 1986–1990 гг. ПГО «Уралгеология» / Нояксова Л.Д. и др. – Свердловск, 1990. – (Фонды ОАО «Пермнефтегеофизика»).
 11. Отчет о доразведке северной части Быгельско–Троицкого, южных частей Соликамского и Ново-Соликамского участков Верхнекамского месторождения калийных солей, выполненной в 1991–1999 гг. / Плотников Ю.А. и др. – Березники, 2002. – (Фонды ОАО «Уралкалий»).
 12. Отчет по геологическому доизучению масштаба 1:50000 Верхнекамской площади с общими поисками в соликамском, Усольском и Березниковском районах Пермской области, выполненном в 1988–1991 г.г. / Харитонов Т.В.; «Геокарта». – Пермь, 1992. – (Фонды ФГУ Пермского ТФГИ).

МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 625.235.5

DOI:10.7242/echo.2024.1.6

ИМПУЛЬС СКВАЖИННОГО РАССРЕДОТОЧЕННОГО ЗАРЯДА С ЗАБОЙКОЙ

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

Аннотация: Взрыв рассматривается как адиабатический процесс. В работе использовано уравнение Пуассона для идеального газа. Получена зависимость полного импульса скважинного заряда от массы взрывающего ВВ. Для распределенного скважинного заряда определен импульс отдельных частей, разделенных воздушным промежутком, взрываемых последовательно. Дана оценка величины дополнительного импульса при использовании забойки.

Ключевые слова: рассредоточенный заряд, забойка, импульс взрывных газов, длительность импульса, скорость детонации, адиабатический процесс, показатель адиабаты, уравнение Пуассона для идеального газа.

Эффективность взрывания горных пород существенным образом зависит, при прочих равных условиях, от конструкции заряда. В данной работе рассматривается распределенный скважинный заряд, состоящий из двух частей, с воздушным промежутком и забойкой (рис. 1).

При равном выходе горной массы с 1 м скважины и удельном расходе ВВ рассредоточение заряда улучшает дробление (делает его более равномерным) по сравнению со сплошным зарядом. Обычно рассредоточение заряда применяется, если емкость скважины используется не полностью при сплошных зарядах. В неоднородных породах целесообразно рассредоточить заряд ВВ, располагая его части напротив наиболее трудно взрываемых участков пород. При взрыве сплошного заряда происходит переизмельчение породы вблизи заряда из-за высокого давления взрывных газов в зарядной камере, при этом в дальнюю зону передается относительно меньшее количество энергии, что приводит к дроблению породы на более крупные куски. Воздушные промежутки позволяют снизить пиковое давление из-за уменьшения плотности заряда, что позволяет уменьшить переизмельчение породы вблизи заряда. Взрывные газы верхнего заряда «запирают» газообразные продукты детонации нижнего заряда, тем самым увеличивая время воздействия заряда на взрываемый массив. Эффект воздушного промежутка зависит от его длины: при малой длине промежуток не дает эффекта, а при чрезмерном увеличении может привести к ухудшению дробления из-за чрезмерного снижения давления в зарядной камере. Обычно, в большинстве случаев, длина воздушного промежутка устанавливается эмпирически и зависит от длины заряда, типа ВВ и физико-механических свойств горных пород [1].

Забойка уменьшает потери энергии при детонации заряда, обеспечивая более полное протекание реакции взрыва, увеличивает время воздействия газообразных продуктов детонации на стенки зарядной камеры, что приводит к повышению интенсивности дробления взрываемых горных пород, а также уменьшает силу ударной воздушной волны и разброс кусков взорванных горных пород. В качестве материала забойки можно использовать глину, песок, их смеси, буровую мелочь, мелко раздробленную породу и т.д. [1].

Минимальная длина забойки при взрывании зарядов в скважинах по углю и породе в шахтах и рудниках, опасных по газу и (или) пыли, должна быть не менее 1 м [2].

В данной работе импульс рассредоточенного скважинного заряда с забойкой, разделенного на две равные части воздушным промежутком, которые взрываются последовательно, рассматривается при следующих условиях:

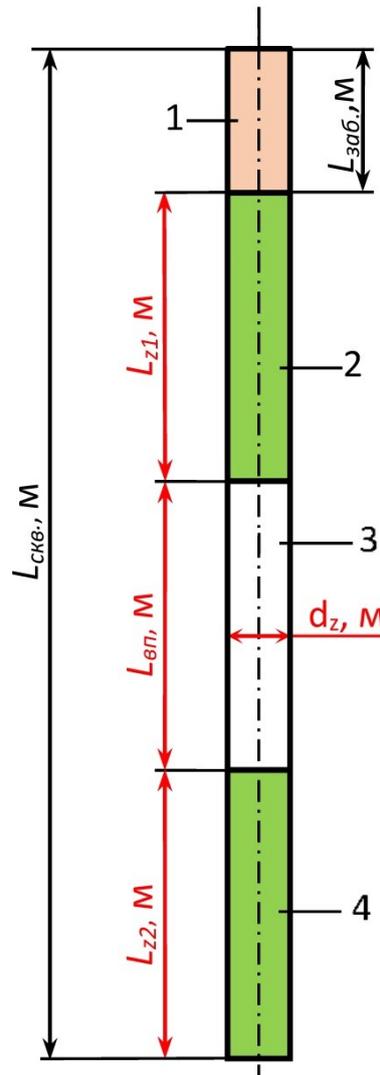


Рис. 1. Расчетная схема скважинного рассредоточенного заряда с воздушным промежутком и забойкой
 1 – забойка; 2 – верхняя часть рассредоточенного заряда; 3 – воздушный промежуток;
 4 – нижняя часть рассредоточенного заряда

1) если начальную стадию взрыва рассматривать как процесс, происходящий без обмена с окружающей средой, т.е. как адиабатический процесс, то, согласно уравнению Пуассона для идеальных газов, $PV^\gamma = const$, где P и V , соответственно, давление и объем взрывных газов в зарядной камере; γ – показатель адиабаты, $\gamma = C_p/C_v$, C_p и C_v – теплоемкость взрывных газов, соответственно, при постоянном объеме и давлении; для ВВ типа аммонит БЖВ показатель адиабаты $\gamma \approx 3$;

2) длина заряженного участка равна длине воздушного промежутка: $L_{z1} = L_{z2} = L_{вп}$; объемы, соответственно, тоже одинаковы: $V_{z1} = V_{z2} = V_{вп}$, рис. 1;

3) соударения отраженных фронтов не учитываются, объем взрывных газов V на участке скважины $L_{z1} + 0,5 \cdot L_{вп}$ увеличится в $j = 1,5$ раза (2-я половина промежутка заполнится газом от следующего заряженного участка), поэтому, в соответствии с уравнением Пуассона, давление P на этом суммарном участке и во всей скважине первоначально понизится в P/j^3 раза;

4) при одинаковой массе ВВ сплошного и рассредоточенного зарядов объем взрывааемых пород при использовании этих зарядов (в случае последовательного взрывания двух частей рассредоточенного заряда) также будет одинаковый;

5) за счет большего времени, необходимого для стабилизации давления в зарядной камере при взрывании рассредоточенного скважинного заряда, по сравнению со сплошным зарядом, и происходящих при этом колебаний амплитуды давления, передающихся на взрывааемый массив, степень дробления горных пород будет выше по сравнению со сплошным зарядом;

6) забойка до момента вылета из скважины также будет способствовать увеличению времени стабилизации давления в зарядной камере и воздействия импульса на массив.

Для удобства дальнейших расчетов необходимо получить зависимость величины полного импульса скважинного (удлиненного) заряда от массы взрываемого ВВ.

Общеизвестное классическое выражение импульса можно записать:

$$J = m \cdot v = F \cdot t, \quad (1)$$

где J – импульс тела, Н·с; m – масса тела, кг; v – скорость движения этого тела, м/с; F – сила, действующая на тело, Н; t – время воздействия силы на тело, с.

При взрыве, в данном случае, скорость v – это скорость волны разряжения v_p , м/с, равная [3]:

$$v_p = D \cdot \sqrt[2]{3/8} \approx 0,612 \cdot D, \quad (2)$$

где D – скорость детонации используемого ВВ, м/с.

Масса скважинного заряда m находится по формуле, кг:

$$m = V_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} = S_z \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} = (\pi \cdot d_z^2 / 4) \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}}, \quad (3)$$

где V_z – объем скважинного заряда ВВ, м³; $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность ВВ в заряде, кг/м³; S_z – площадь заряда (скважины), м²; L_z – длина скважинного заряда, м; d_z – диаметр скважинного заряда, м.

Таким образом, с учетом выражения (2) и (3) получим:

$$J = m \cdot v_p = (\pi \cdot d_z^2 / 4) \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot 0,612 \cdot D, \text{ Н} \cdot \text{с} \quad (4)$$

При описании взрыва нужно использовать удельную силу – давление, определяемое по формуле:

$$P = F / S, \quad \text{Н} / \text{м}^2 \quad (5)$$

где S – площадь зарядной камеры, м², на которую действует сила F , Н.

Сила F из выражения (5) находится по формуле:

$$F = P \cdot S, \text{ Н} \quad (6)$$

Величина давления в скважине при детонации заряда определяется из выражения [3]:

$$P_c = \rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2 / [2 \cdot (1 + k)], \quad (7)$$

где P_c – среднее (установившееся) давление в зарядной камере, Н/м²; k – коэффициент Грюнайзена используемого ВВ [3].

Площадь поверхности зарядной камеры, на которую действует давление P , равна:

$$S_6 = \pi \cdot d_z \cdot L_z, \text{ м}^2 \quad (8)$$

При описании взрыва вместо времени t в формуле (1) нужно использовать время прохождения волны разряжения τ_0 , с:

$$\tau_0 = L_z/v_p = L_z/0,612 \cdot D, \quad (9)$$

Таким образом, с учетом формул (6), (8), (9), можно представить величину импульса, определяемого по формуле (1), следующим образом, Н·с:

$$J = F \cdot t = P_c \cdot S_6 \cdot \tau_0 = P_c \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot [L_z/0,612 \cdot D] \quad (10)$$

С учетом выражения (7) выражение (10) будет выглядеть, Н·с:

$$J = [\rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2/2 \cdot (1 + k)] \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot [L_z/0,612 \cdot D] \quad (11)$$

После преобразования формула (11) будет выглядеть следующим образом, Н·с:

$$J = \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot D \cdot L_z/[2 \cdot 0,612 \cdot (1 + k)], \quad (12)$$

Умножая числитель и знаменатель формулы (12) на $2d_z$, имеем, Н·с:

$$J = 2 \cdot \pi \cdot d_z^2 \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot D \cdot L_z/[4 \cdot d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)], \quad (13)$$

После преобразования выражение (13), с учетом выражения (3), имеет вид, Н·с:

$$J = 2 \cdot M \cdot D \cdot L_z/[d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)], \quad (14)$$

Окончательно выражение импульса можно записать в следующем виде, Н·с:

$$J = P_c \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot L_z/0,612 \cdot D = 2 \cdot M \cdot D \cdot L_z/[d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)] \quad (15)$$

Таким образом, с учетом основных разрушающих факторов удлиненного заряда, полный импульс давления взрыва в скважине (при отсутствии радиального зазора) определяется следующим выражением:

$$J_{\text{п}} = I \cdot P_c \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot L_z/0,612 \cdot D = I \cdot 2 \cdot M \cdot D \cdot L_z/[d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)] \quad (16)$$

где $J_{\text{п}}$ – полный импульс давления взрывных газов, Н·с; I – коэффициент недозаряжения, $I = 0,8$;

Из выражения (16) следует, что полный импульс зависит, в том числе, от массы и длины заряда. Если разделить сплошной заряд на две равные части с промежутком, т.е. $M_{1,2} = 1/2 \cdot M$ и $L_{z1,2} = 1/2 \cdot L_z$, то, при прочих равных условия взрывания имеем:

$$J_{\text{п1,2}} = I \cdot 2 \cdot M/2 \cdot D \cdot L_z/[2 \cdot d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)] = J_{\text{п}}/(2 \cdot 2) = J_{\text{п}}/4, \text{ Н} \cdot \text{с};$$

Откуда сумма импульсов двух одинаковых частей разделенного заряда с промежутком при последовательном взрывании составит:

$$J_{п1} + J_{п2} = J_{п}/4 + J_{п}/4 = 1/2 \cdot J_{п}, \text{ Н} \cdot \text{с};$$

Вместе с тем, согласно закону сохранения энергии, при одинаковой массе взрывае-мого ВВ при сплошном или рассредоточенном заряде можно написать:

$$J = P \cdot t = \text{const}, \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (17)$$

Согласно данным профессора А.Ф. Беляева [4], при столкновении двух ударных волн наблюдается прирост давления ΔP , т.е. при последовательном взрыве двух частей распределённого заряда будет происходить прирост импульса (за счет стабилизации давления в зарядной камере), который можно определить по формуле:

$$\Delta J = J_{п} - (J_{п1} + J_{п2}), \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (18)$$

В данном случае, когда $M_{1,2} = 1/2 \cdot M$, $L_{z1,2} = 1/2 \cdot L_z$,

$$\Delta J = J_{п} - 1/2 \cdot J_{п} = 1/2 \cdot J_{п}, \text{ Н} \cdot \text{с};$$

Известно, что забойка до момента вылета из скважины способствует увеличению времени стабилизации давления в зарядной камере. После вылета забойки объем скважины увеличится i раз:

$$i = (V_{\text{скв.}}^* + V_{\text{заб.}})/V_{\text{скв.}}^* = (L_{\text{скв.}}^* \cdot S_z + L_{\text{заб.}} \cdot S_z)/(L_{\text{скв.}}^* \cdot S_z) = (L_{\text{скв.}}^* + L_{\text{заб.}})/L_{\text{скв.}}^*, \quad (19)$$

где $L_{\text{скв.}}^*$ — длина скважины без учета длины забойки, м; $L_{\text{заб.}}$ — длина забойки, м;

После вылета забойки давление в скважине, согласно уравнению Пуассона, понизится в i^γ раз и станет равным, $\text{Н}/\text{м}^2$:

$$P_{п} = P_c / i^\gamma = \rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2 / [2 \cdot (1 + k) \cdot i^\gamma]; \quad (20)$$

где γ — показатель адиабаты.

Вместе с тем при вылете забойки из скважины за счет переходных процессов газораспределения давление в скважине еще понизится. По скважине пройдет волна разрежения в заполняющих ее газах со скоростью v_p в течении времени $\Delta t_{\text{заб.}}$, с:

$$\Delta t_{\text{заб.}} = \begin{cases} 0, \text{ если } L_{\text{заб.}} = 0; \\ L_{\text{скв.}}/v_p = (L_{\text{скв.}}^* + L_{\text{заб.}})/(0,612 \cdot D), \text{ если } L_{\text{заб.}} \geq 1,0 \text{ м}, \end{cases} \quad (21)$$

где $L_{\text{скв.}}$ — длина скважины с учетом длины забойки, м;

Истекающие газы создадут дополнительный импульс, равный:

$$J_{\text{заб.}} = P_{п} \cdot \Delta t_{\text{заб.}} = \rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2 / [2 \cdot (1 + k) \cdot i^\gamma] \cdot [(L_{\text{скв.}}^* + L_{\text{заб.}})/(0,612 \cdot D)], \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (22)$$

После преобразования получим:

$$J_{\text{заб.}} = \rho_{\text{ВВ}} \cdot D \cdot (L_{\text{скв.}}^* + L_{\text{заб.}}) / [1,224 \cdot (1 + k) \cdot i^\gamma], \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (23)$$

Таким образом, окончательный импульс заряда с воздушным промежутком, учитывающий влияние забойки, составит:

$$J_{\text{п.заб.}} = J_{п} + J_{\text{заб.}}, \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (24)$$

В таблице представлены расчётные параметры полного импульса $J_{\text{п}}$ и дополнительного импульса от забойки $J_{\text{заб.}}$ для скважины стандартного диаметра $d_{\text{скв.}} = d_z = 0,126$ м.

Таблица

$L_{\text{скв.}}^*$ м	$L_{\text{заб.}}$ м	$\rho_{\text{вв.}}$ кг/м ³	D , м/с	P_c , Н/м ²	i	v_p , м/с	$P_{\text{п.}}$, Н/м ²	$J_{\text{п.}}$, Н·с	$J_{\text{заб.}}$, Н·с	$J_{\text{заб.}}$ / $J_{\text{п.}}$
6,0	1,0	1100	4000	$2,2 \cdot 10^9$	1,17	2448	$1,38 \cdot 10^9$	$10,24 \cdot 10^6$	$3,96 \cdot 10^6$	0,39

Выводы:

1) при разделении сплошного скважинного заряда на n равных по длине (и, следовательно, массе) частей полный импульс каждой отдельной части равен $J_n = J_{\text{п}}/n^2$; если заряд разделен на неравные части, то полный импульс каждой такой части находится по формуле (16);

2) при использовании рассредоточенного скважинного заряда с воздушным промежутком общий суммарный импульс при последовательном взрывании частей заряда после стабилизации давления в зарядной камере равен импульсу взрыва сплошного заряда, имеющего массу, равную сумме масс частей рассредоточенного заряда: $\sum_{i=1}^n J_i = J_{\text{п}}$;

3) расчеты показывают (табл.), что в условиях, рассмотренных в статье, при использовании забойки добавка к полному импульсу взрыва скважинного заряда $J_{\text{п}}$, рассчитанного по выражению (16), может составить до 39% от этого полного импульса, поэтому применение забойки оправдано.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500031-4).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом: учебник для вузов. – М.: Горн. книга, 2007. – 471 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения»: утв. 3.12.2020, № 494, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 352 с. – Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в области взрывных работ и изготовления взрывчатых материалов: сер. 13, вып. 15).
3. Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11. – С. 53-102.
4. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. – М.: Наука, 1968. – 255 с.: ил.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНИКА НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЖАМАН-АЙБАТ

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

Аннотация: С целью совершенствования параметров системы разработки на руднике Жомарт проведены лабораторные испытания механических свойств песчаника, а также натурные измерения модуля деформации пород в барьерных и междукамерных целиках с использованием скважинного гидродомкрата. Установлено, что средний модуль деформации песчаника в барьерных целиках составляет порядка 5,9 ГПа, в междукамерных целиках – 6,2 ГПа. Средний модуль деформации, полученный в лабораторных условиях, примерно в 3 раза превышает соответствующий показатель, определенный в натуральных условиях.

Ключевые слова: модуль деформации, скважинный гидродомкрат, деформационные свойства, барьерный целик, междукамерный целик.

1. Введение

Месторождение Жаман-Айбат находится в пределах обширной равнины с мелкохолмистым рельефом в 130 км к юго-востоку от города Жезказган. Месторождение относится к медно-полиметаллическому типу медистых песчаников. Глубина залегания рудных тел колеблется в пределах 380÷910 м, а их мощность изменяется от 0,50 до 18,30 м. Принятая система разработки – панельно-столбовая система с последующим погашением пустот и выемкой целиков.

С целью уточнения параметров применяемой системы разработки на руднике Жомарт выполнен комплекс лабораторных и натуральных испытаний механических свойств медистого песчаника.

В натуральных условиях проводились испытания модуля деформации с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана [1-3]. Деформационные свойства пород определялись согласно стандарту [4] в горизонтально пробуренных скважинах с шагом 0,3 м. Перечень экспериментального оборудования и методика проведения натуральных испытаний приведены в работе [5]. Проведение измерений заключалось в направленном нагружении стенок скважины гидродомкратом. При проведении замеров фиксировались величины деформаций скважины и давление в гидросистеме. По результатам испытаний строились диаграммы деформирования. Также программой испытаний было предусмотрено проведение лабораторных испытаний по определению механических свойств песчаника.

2. Результаты испытаний механических свойств серого песчаника в лабораторных условиях при одноосном нагружении

Места отбора керна показаны на рис. 1а. Всего было испытано 23 образца серого песчаника, отобранных из нетронутого массива. Лабораторные испытания проводились согласно действующим стандартам и методикам [6, 7]. Вид испытываемого образца цилиндрической формы и соответствующая ему диаграмма деформирования приведена на рис. 1б. Результаты экспериментов приведены в табл. 1 (пределы прочности при сжатии приведены с учетом коэффициента формы).

Таблица 1

Результаты лабораторных испытаний механических свойств серого песчаника

№ образца	Размер, мм	$\sigma_{сж.}$, МПа	$\epsilon_{пр.}$, %	D_y , ГПа	E , ГПа
1	92 × 46	135,3	0,47	27,6	28,6
3	46 × 46	124,4	0,98	18,2	14,8
Среднее значение		129,9	0,73	22,9	21,7
1	35 × 35,5	84,6	1,72	9,9	7,4
2	35 × 35,5	95,0	1,55	13,4	7,9
3	70 × 35,5	55,9	0,28	16,9	25,3
4	70 × 35,5	98,7	0,34	24,5	24,9
5	70 × 35,5	164,5	0,55	25,7	26,3
6	91 × 46	85,1	0,39	19,9	–
7	94 × 46	51,9	0,36	16,5	–
8	92 × 46	132,4	0,45	26,2	28,9
9	91 × 46	56,3	0,27	16,9	–
Среднее значение		91,6	0,66	18,9	20,1
1	46 × 46	65,0	0,82	10,5	–
2	46 × 46	132,7	1,19	18,3	17,0
3	92 × 46	33,3	0,21	–	20,6
4	92 × 46	165,3	0,72	25,3	21,66
5	92 × 46	90,7	0,52	17,4	–
7	92 × 46	169,5	0,72	24,5	20,9
Среднее значение		109,4	0,70	19,2	20,0
1	46 × 46	89,2	0,87	12,0	13,0
2	46 × 46	108,3	0,87	17,9	19,8
3	47 × 46	74,3	0,80	13,5	13,1
4	92 × 46	74,7	0,28	21,8	–
5	92 × 46	28,8	0,06	15,2	–
Среднее значение		75,1	0,58	16,1	15,3

Экспериментами установлено, что предел прочности ($\sigma_{сж.}$) образцов песчаника при сжатии варьируется в диапазоне от 28,8 от 169,5 МПа и составляет в среднем 101,5 МПа. Модули упругости (E) и модули деформации (D_y) образцов песчаника примерно равны между собой (среднее значение – 19,3 ГПа). Среднее значение разрушающей деформации ($\epsilon_{пр.}$) составляет 0,66%.

3. Результаты натуральных испытаний деформационных свойств пород в целиках

Измерения модуля деформации проводились на трех экспериментальных участках, расположенных в пределах панелей 53, 47 и 18. Экспериментальные измерения проводились в 9 горизонтальных скважинах длиной 4÷6 м, пробуренных в барьерных (БРЦ) и междукамерных (МКЦ) целиках. Общий вид боков (стенок) барьерных и междукамерных целиков на экспериментальных участках представлены, соответственно, на рис. 2 и 3. На рис. 4 показано местоположение экспериментального участка № 1.

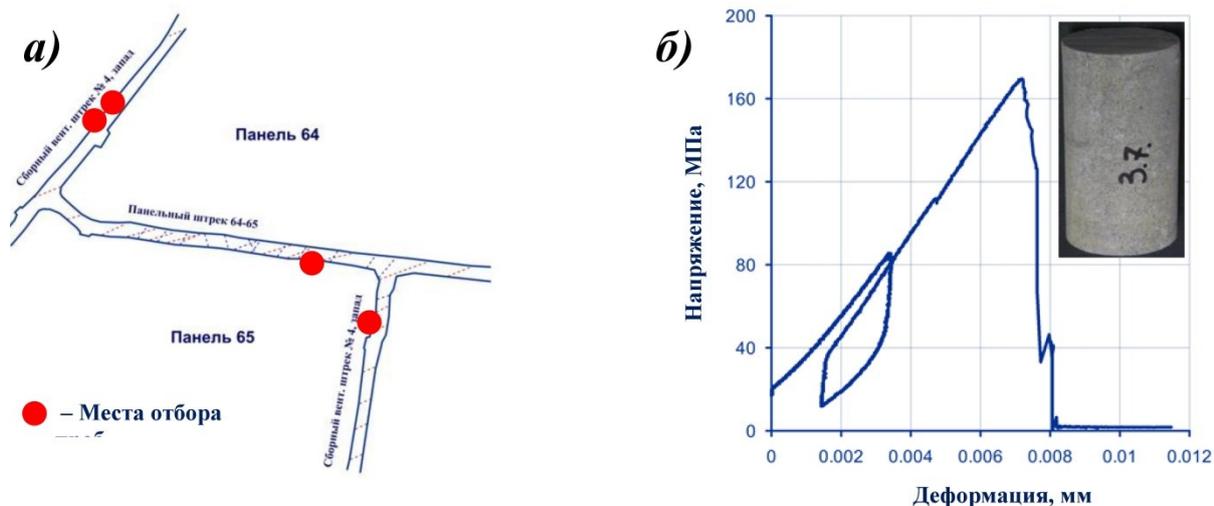


Рис. 1. Испытания механических свойств серого песчаника в лабораторных условиях: (а) место отбора проб; (б) испытуемый образец и соответствующая ему диаграмма деформирования



Рис. 2. Общий вид стенок барьерных целиков: (а) панель 53; (б) панель 47; (в) панель 18



Рис. 3. Общий вид стенок междукамерных целиков: (а) панель 53; (б) панель 47; (в) панель 18

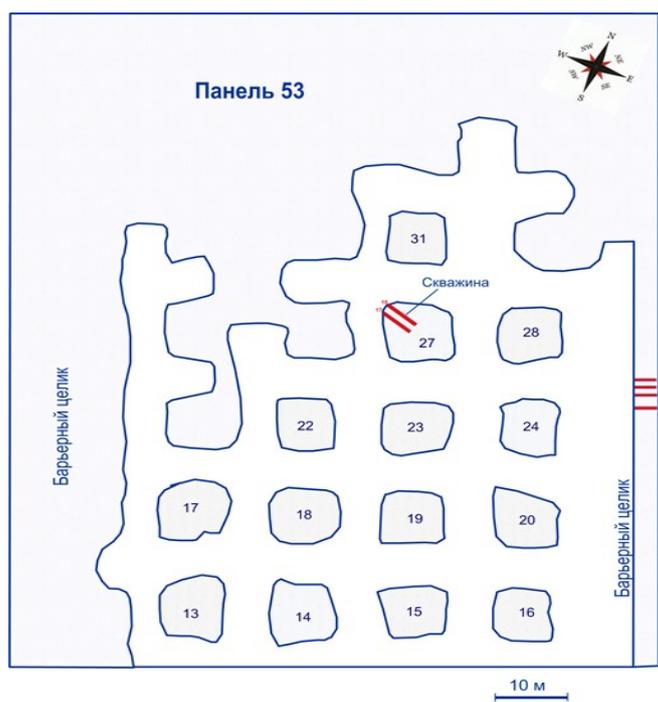


Рис. 4. Места расположения измерительных скважин на экспериментальном участке № 1 (53 панель)

Экспериментальный участок № 1

Измерения проводились в пределах панели 53. Испытательные скважины № 17 и 18 были пробурены в междукамерном целике 27.

Мощность рудного тела в пределах панели 53 колеблется от 1,40 до 2,90 м. Глубина залегания составляет 625÷630 м. Вкрапленное медное оруденение локализовано преимущественно в сероцветных песчаниках с прослоями межформационных конгломератов. В кровле рудного тела в основном залегают сероцветные и тонко- и мелкозернистые песчаники, конгломераты, реже зеленовато-серые алевролиты и аргиллиты. В почве рудного тела в основном залегают красноцветные алевролиты и аргиллиты, конгломераты, реже серо-цветные песчаники, зеленовато-серые алевролиты и аргиллиты.

При проектировании отработки запасов панели приняты следующие параметры системы разработки:

- расстояние между осями барьерных целиков – 125 м.
- ширина БРЦ – 40 м.
- сетка расположения междукамерных целиков – 19×19 м.
- размер МКЦ – 10×10 м при мощности отработки до 12 м.

Модуль деформации пород песчаника определялся в вертикальном направлении. Характерные зависимости изменения величины модуля деформации от глубины скважины представлены на рис. 5.

По результатам испытаний установлено, что по сечению целика наблюдается неравномерное изменение модуля деформации песчаника в пределах от 3,43 до 7,66 ГПа. Средняя величина модуля деформации составляет 5,73 ГПа.

Экспериментальный участок № 2

Натурные испытания деформационных свойств пород проводились в скважинах № 1 и 2, пробуренных в барьерном целике и в скважинах № 4-6, пробуренных в междукамерном целике 120 панели 47.

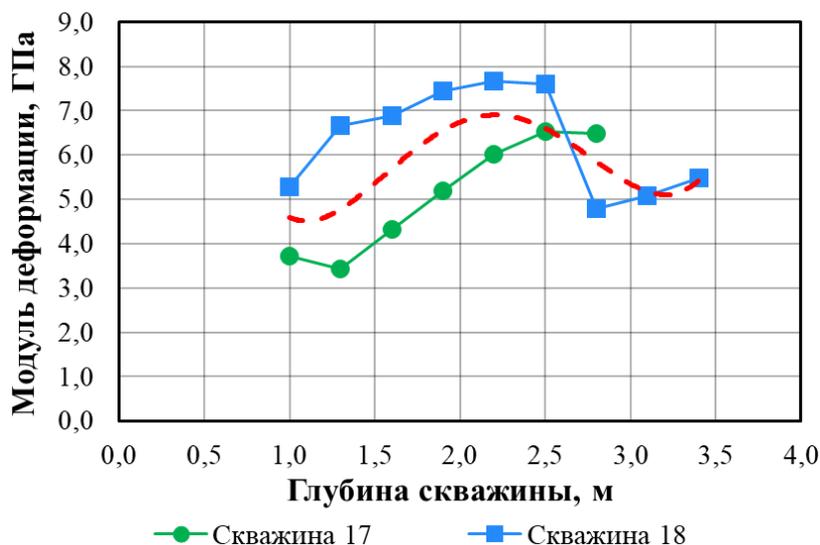


Рис. 5. Изменение величины модуля деформации по сечению междукамерного целика 27 (панель 53)

При проектировании отработки запасов панели 47 приняты следующие параметры системы разработки:

- расстояние между осями барьерных целиков – 128 м.
- ширина барьерных целиков – 40 м, через каждые 38 м пройдены прорезки.
- сетка расположения междукамерных целиков 19×19 м.
- размеры междукамерных целиков – 10×10 м.

Глубина разработки составляет 605÷610 м, мощность рудного тела колеблется от 0,7 до 13,2 м. В кровле рудной залежи залегают сероцветные тонко- и мелкозернистые песчаники, конгломераты. В почве залегают зеленовато-серые песчаники, аргиллиты, красноцветные и сероцветные песчаники, конгломераты.

Графики изменения величины модуля деформации пород от глубины скважины показаны на рис. 6 а и б.

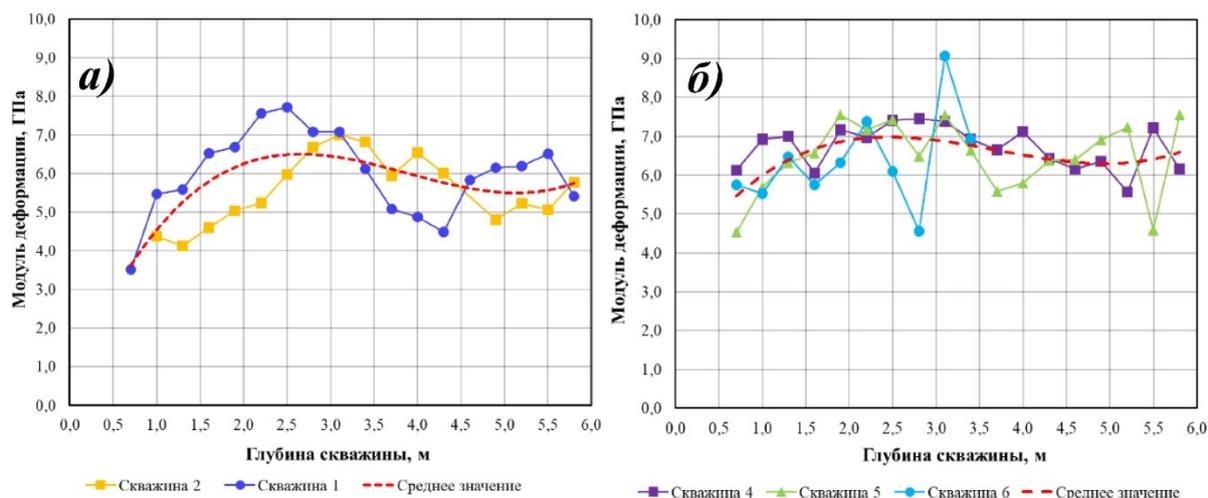


Рис. 6. Изменение величины модуля деформации (панель 47): (а) по сечению барьерного целика; (б) по сечению междукамерного целика 120

Установлено, что в барьерном целике (рис. 6а) наблюдаются пониженные значения модуля деформации – 3,5 ГПа на участке глубин до 1 м [8-11]. С увеличением глубины

отмечается относительно равномерное распределение модуля деформации в диапазоне 5,5÷6,5 ГПа. В междукамерном целике местами отмечается скачкообразный характер изменения модуля деформации с глубиной, что объясняется, по-видимому, блочным строением породного массива [12].

Экспериментальный участок № 3

В пределах панели 18 скважины № 7 и 8 были пробурены в барьерном целике. Глубина разработки -510÷-520 м, мощность рудного тела варьируется в диапазоне от 1,0 до 4,1 м. Параметры системы разработки аналогичны экспериментальному участку № 1. В кровле рудного тела залегают зеленовато-серые алевролиты и аргиллиты, сероцветные тонко- и мелкозернистые песчаники, иногда с забалансовым оруденением. В почве рудного тела залегают серо-цветные тонко- и мелкозернистые песчаники, зеленовато-серые алевролиты и аргиллиты, красноцветные алевролиты. Графики изменения величины модуля деформации пород от глубины скважины представлены на рис. 7.

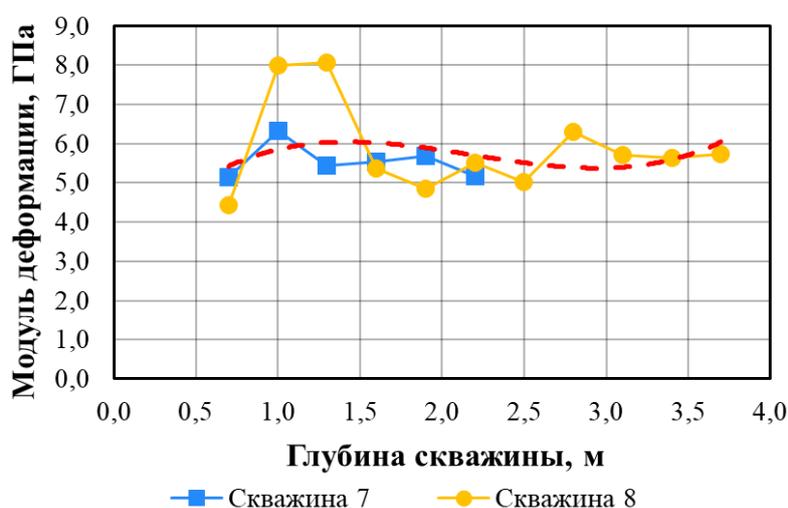


Рис. 7. Изменение величины модуля деформации по сечению барьерного целика (панель 18)

По результатам экспериментов наблюдается относительно равномерный характер распределения модуля деформации по сечению барьерного целика в диапазоне 5,5÷6,0 ГПа.

Средние значения модуля деформации пород, слагающих барьерные и междукамерные целики, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Средние значения модуля деформации пород на экспериментальных участках

Местоположение участка	Глубина разработки, м	Средняя величина модуля деформации, ГПа	
		Барьерный целик	Междукамерный целик
Панель 53	625 ÷ 630	—	5,7
Панель 47	605 ÷ 610	5,9	6,6
Панель 18	510 ÷ 520	5,8	—

Выявлено, что средние значения модуля деформации в барьерных (5,9 ГПа) и междукамерных целиках (6,2 ГПа) приблизительно в 3 раза меньше среднего модуля деформации образцов, отобранных из нетронутого породного массива (19,3 ГПа). Как

уже ранее сказано в работах [5, 13], данное различие объясняется как наличием масштабного эффекта, так и методическими особенностями экспериментальных исследований.

4. Выводы

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- установлено, что средний модуль деформации песчаника в барьерных целиках составляет порядка 5,9 ГПа, в междукамерных целиках – 6,2 ГПа;
- модуль деформации песчаника, определенный в лабораторных экспериментах примерно в 3 раза больше величины модуля деформации пород, полученного в натуральных условиях;
- результаты лабораторных и натуральных исследований могут быть использованы при математическом моделировании напряженно-деформированного состояния системы барьерных и междукамерных целиков, проводимого с целью совершенствования параметров системы разработки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500031-4)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Токсаров В.Н., Поспелов Д.А., Бельтюков Н.Л., Ударцев А.А. Определение модуля деформации пород Сарбайского железорудного карьера с использованием скважинного гидродомкрата // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 5. – С. 32-42. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_32.
2. Heuze F.E. Suggested method for estimating the in-Situ modulus of deformation of rock using the NX-Borehole Jack // Geotechnical Testing Journal. – 1984. – Vol. 7, № 4, Dec. – P. 205-210.
3. Meyer T.O., McVey J.R. NX borehole jack modulus determinations in homogeneous, isotropic, elastic materials // US Bur Mines Rep Invest. – 1974. – № 7855. – 50 p.
4. ASTM D4971-08 Standard Test Method for Determining In Situ Modulus of Deformation of Rock Using Diametrically Loaded 76-mm (3-in.) Borehole Jack. – 2008. – 7 p.
5. Поспелов Д.А., Токсаров В.Н., Бельтюков Н.Л. Методика оценки модуля деформации пород в приконтурном массиве с использованием скважинного гидродомкрата // Горное эхо. – 2022. – № 1 (86). – С. 51-57. – DOI: 10.7242/echo.2022.1.7.
6. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – Введ. 1986-01-07. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 10 с.
7. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. – Введ. 24.04.91. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 19 с.
8. Park S., Kim J.-S., Kwon S. Investigation of the development of an excavation damaged zone and its influence on the mechanical behaviors of a blasted tunnel // Geosystem Engineering. – 2018. – V. 21. № 3. – P. 165-181. – DOI: 10.1080/12269328.2018.1461139.
9. Palmström A., Singh R. The deformation modulus of rock masses – Comparisons between in situ tests and indirect estimates // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2001. – V. 16, № 2. – P. 115-131.
10. Ghamgosar M., Fahimifar A., Rasouli V. Estimation of rock mass deformation modulus from laboratory experiments in Karun dam // Rock Mechanics in Civil and Environmental engineering. – London, 2010. – P. 805-808.
11. Dixit M., Dev H., Singh R., Dhawan A.K. Insitu deformability characteristics of rock mass by Goodman Jack // 10th ISRM Congress. 2003–Technology roadmap for rock mechanics / South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2003. – P. 249-254.
12. Айтматов И.Т. Концепция о естественном напряженно-деформированном состоянии породных массивов в мобильных горно-складчатых областях // Напряженное состояние и удароопасность массивов горных пород на рудных месторождениях Средней Азии: [сб. статей]. — Фрунзе, 1983. – С. 3-31.
13. Heuze F.E., Amadei B. The NX-borehole jack: A Lesson in trials and errors // International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts. – 1985. – V. 22, № 2. – С. 105–112.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.83.016

DOI:10.7242/echo.2024.1.8

ПОСТРОЕНИЕ ГЛОБАЛЬНОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ МЕТОДОМ ИСТОКООБРАЗНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

А.С. Долгаль

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой компьютерной технологии трансформации аномалий силы тяжести в пределах больших территорий методом истокообразной аппроксимации. Для повышения точности вычисления трансформант предлагается комплексное использование глобальной и региональных моделей аномального гравитационного поля. Представлены результаты построения глобальных моделей аномалий Буге по равномерной сети точек $5^\circ \times 5^\circ$ и по разреженной сети $5^\circ \times (5-60)^\circ$ в полярных областях Земли при глубине точечных масс 550 км. В первом случае после выполнения 500 итераций среднеквадратическая погрешность аппроксимации составила более 7 мГал, во втором – менее 0.001 мГал.

Ключевые слова: гравиразведка, аномалии Буге, сфера Каврайского, глобальная модель поля, трансформация, точечные массы, система линейных уравнений, обусловленность системы.

Введение

Одна из предложенных В.Н. Страховым классификаций линейных аналитических аппроксимаций элементов внешнего аномального гравитационного поля Земли выделяет 3 типа моделей:

- 1) в глобальном варианте линейные аналитические аппроксимации строятся для всей Земли;
- 2) в региональном варианте линейные аналитические аппроксимации строятся для больших по площади территорий – порядка (10^5-10^6) км²;
- 3) в локальном варианте линейные аналитические аппроксимации строятся для небольших по площади территорий – не более 10^4 км² [8].

В последних двух случаях могут использоваться сферическая система координат $\sum \varphi \lambda R$ и/или глобальная прямоугольная система координат $\sum XYZ$. Соответственно, в роли элементов гравитационного поля u будут выступать радиальная производная $V_R = \partial V / \partial R$ гравитационного потенциала V или нормальная (по отношению к земному эллипсоиду) составляющая поля $V_n = \partial V / \partial n$.

С помощью серии вычислительных экспериментов было установлено, что с достаточной для решения прикладных геофизических задач для региональных трансформаций гравитационного поля можно использовать в качестве модели Земли сферу Каврайского [3]. Это существенно облегчает процесс вычисления трансформант, т.к. не требует перехода к локальным топоцентрическим системам координат для каждой точки расчета. В 2023 г. был разработан алгоритм быстрого решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), возникающих в процессе истокообразной аппроксимации, предназначенный для работы с гридированными (GRID) региональными моделями аномалий силы тяжести и высотных отметок рельефа [5]. В данном случае под GRID-моделями поля подразумеваются сеточные модели параметра V_R с постоянным шагом по широте $\Delta \varphi$ и по долготе $\Delta \lambda$ в градусной мере (в общем случае $\Delta \varphi \neq \Delta \lambda$).

Ограниченный размер площади и дискретный характер задания поля приводят к искажениям трансформант, наиболее часто проявляющимся на периферии области зада-

ния поля [6]. Физическая природа этого явления рассмотрена в работах А.В. Пугина, в частности в [7]. Повышение точности определения трансформант может быть достигнуто путем использования методики, включающей в себя: разрежение сети задания поля в пределах достаточно большой области S , которая в качестве подобласти включает в себя исследуемую площадь S_0 : $S \supset S_0$; декомпозиция задачи на подбор двух систем разноглубинных аппроксимирующих масс; синтез полученных результатов с учетом принципа суперпозиции полей. Имеется успешный опыт ее использования для материалов аэромагнитных съемок [4]. В пределе «достаточно большой областью» S может весь земной шар.

В статье будет рассмотрено построение глобальной модели гравитационного поля Земли в редукции Буге с целью дальнейшего ее многократного использования при вычислении набора линейных трансформант в пределах ограниченной области исследований S_0 . В данном случае под трансформантой функции $u(\varphi, \lambda, R)$ подразумевается новая функция $v(\varphi, \lambda, R)$, определенная на произвольной поверхности D в пределах области S_0 :

$$v(\varphi, \lambda, R) = T\{u(\varphi, \lambda, R)\} = T\{u_1(\varphi, \lambda, R)\} + T\{u_2(\varphi, \lambda, R)\}, \quad (1)$$

где T – некоторый линейный оператор трансформации, а функция u представляет собой сумму двух составляющих: $u = u_1 + u_2$, где u_1 – поле V_R глобальной модели гравитационного поля, а u_2 – разность полей V_R региональной и глобальной моделей внутри области исследований S_0 .

Истокообразная аппроксимация поля в сферических координатах

Будем использовать приближение наблюдаемого поля U теоретическим полем U^* , представленном в виде системы истокообразных функций, характеризующих совокупный аномальный эффект элементарных источников, обладающих соответствующими значениями масс. Эквивалентными источниками во всех случаях являлись шары (точечные массы), находящиеся под точками задания поля на фиксированной глубине R^* , близкой к шагу сети цифровой GRID модели [5]. Подбор масс осуществлялся путем приближенного решения СЛАУ:

$$Gm = u, \quad (2)$$

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

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

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

где $f = 6.67 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ – гравитационная постоянная; m – масса источника; $R_0, \varphi_0, \lambda_0$ – координаты точки измерений; r, φ, λ – координаты источника; $r_0 = \sqrt{R_0^2 + r^2 - 2R_0 r \cos \omega}$; ω – угол при центре O земного шара между точкой измерений и источником: $\cos \omega = \cos \varphi_0 \cos \varphi + \sin \varphi_0 \sin \varphi \cos(\lambda_0 - \lambda)$.

Обусловленность матрицы коэффициентов СЛАУ является важнейшей характеристикой, определяющей сложность процесса ее решения и точность полученных резуль-

татов [9]. Стандартное число обусловленности (H -число Годда) матрицы G : $\text{cond } G = \nu_G = \|G^{-1}\| \|G\|$ определяет влияние неточностей в задании исходных данных на окончательный результат [1]. Связь относительной погрешности τ решения СЛАУ (2) с погрешностями ее правой части определяется числом ν_G :

$$\tau = \frac{\|\Delta m\|}{\|m\|} \leq \nu_G \frac{\|\Delta u\|}{\|u\|}. \quad (4)$$

Отмечается увеличение $\nu_G > 1000$ при погружении эквивалентных источников на глубину R^* , превышающую длину шага сети цифровой модели поля $r(\Delta) = \min r(\Delta_1, \Delta_2)$, где r – функция для преобразования градусной меры в линейную [2]. Это увеличение существенно сказывается в первую очередь на скорости приближенного решения СЛАУ итерационными методами, поэтому в условиях высоких широт (более 60°) обязательно требуется учет изменения длины параллелей от экватора к полюсу (рис. 1).

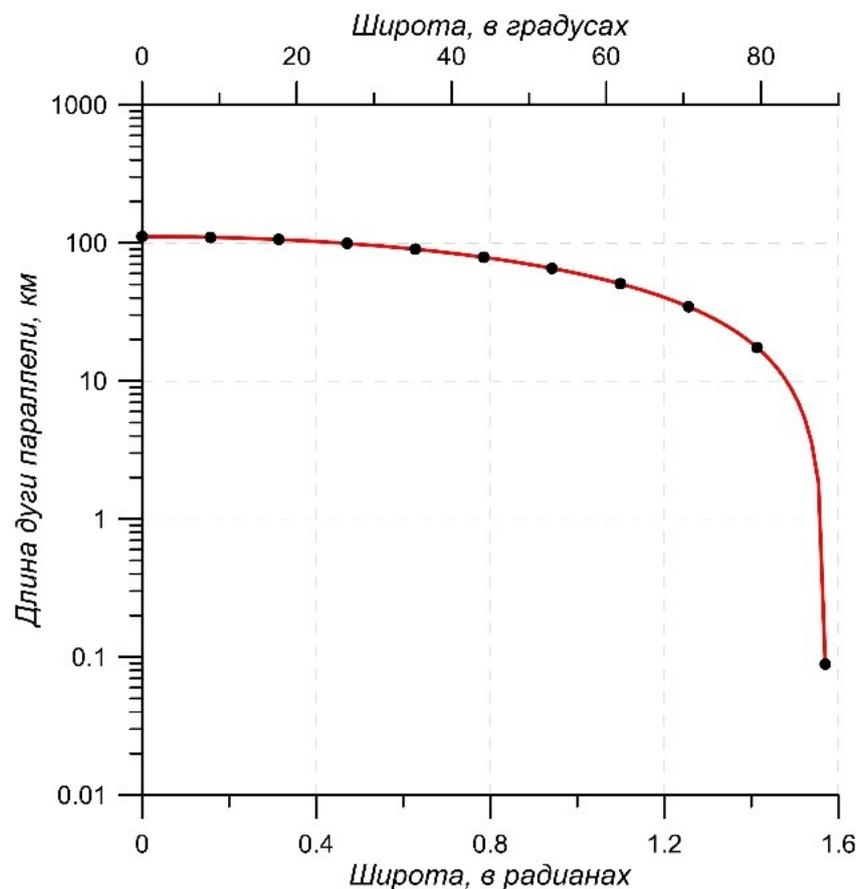


Рис. 1. Зависимость длины 1° дуги параллели от широты для сферы Каврайского

Построение глобальной модели аномалий Буге

Более 150 моделей геопотнциаала Земли представлены на сайте Немецкого научно-исследовательского центра наук о Земле в городе Потсдам (ICGEM), который является одним из шести центров Международной гравитационной полевой службы Международной ассоциации геодезии. Все эти модели доступны в виде нормированных коэффициентов сферических гармоник в стандартном формате, который был принят Европейским космическим агентством (ESA – European Space Agency) в качестве официального формата данных международного космического проекта GOCE (Global Ocean

Circulation Experiment). При выполнении данной работы использовалась одна из этих моделей – EIGEN-GRGS.RL04.MEAN-FIELD, полученная на основе данных спутниковых миссий GRACE и SLR в 2019 г.: гравитационные аномалии в полной редукции Буге, определенные для плотности материков 2.67 г/см^3 и плотности океанов 1.05 г/см^3 по сети $5^\circ \times 5^\circ$ (рис. 2).

При аппроксимации аномалий Буге относительные глубины размещения точечных масс составляли $R^* = 550 \text{ км}$, т.е. для низких широт $R^* \cong r(\Delta_1) \cong r(\Delta_2)$. После выполнения 500 итераций решения СЛАУ (2) методом Зейделя среднеквадратическая невязка $F2$ исходного и модельного полей составила 7.32 мГал , невязка в метрике Чебышева $FM - 64.04 \text{ мГал}$. Максимальные расхождения полей сконцентрированы в полярных областях планеты с широтами $\varphi \geq 65^\circ$ (рис. 3).

Очевидно, что исходная GRID-модель аномалий Буге оказалась непригодной для выполнения истокообразной аппроксимации и для повышения точности решения СЛАУ необходимо увеличение шага сети точек задания поля Δ_2 по долготе. Незначительная (по отношению к площади Земли) часть данных была исключена из расчетов, новые исходные данные представлены в виде таблицы.

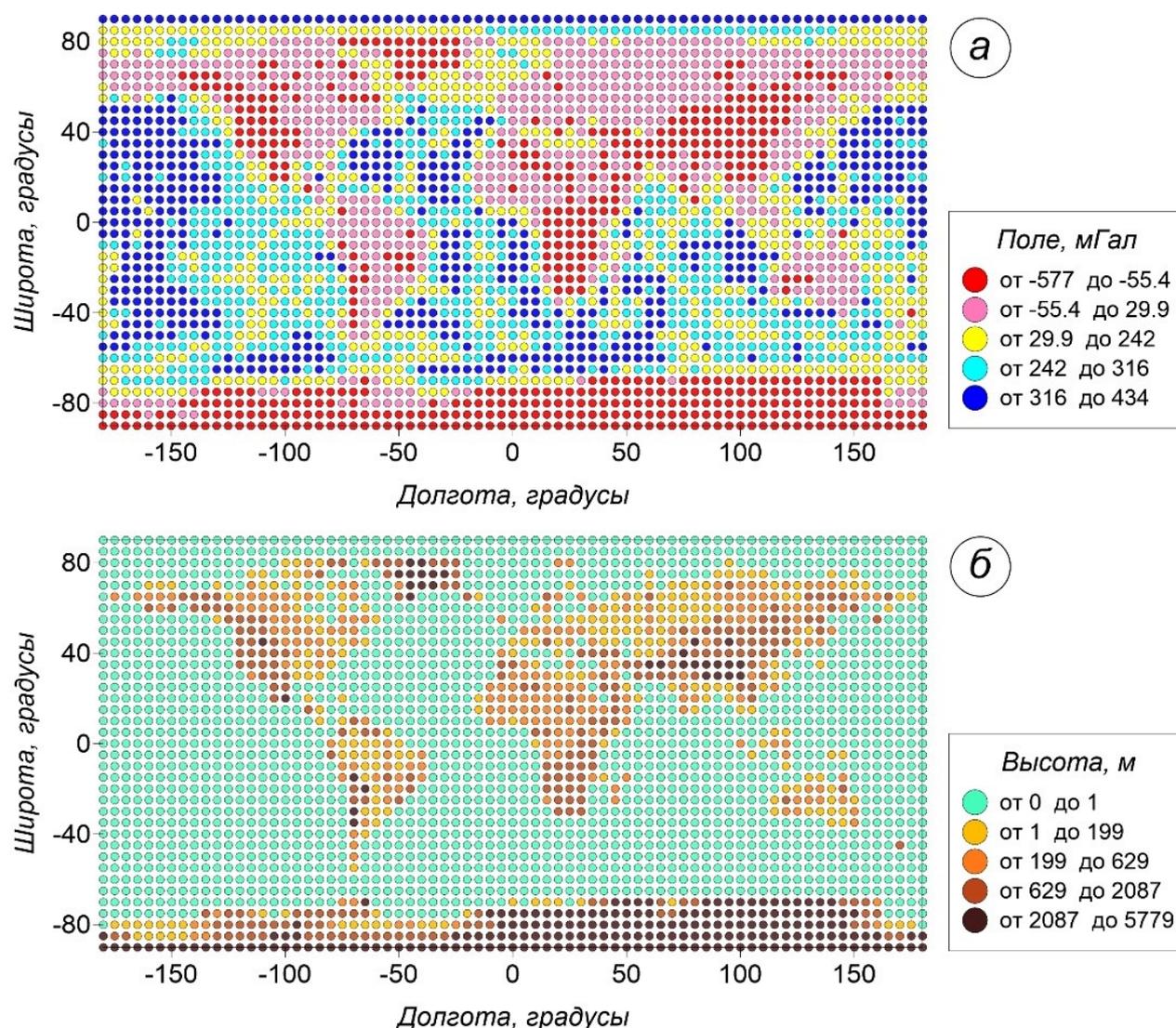


Рис. 2. Исходные данные для построения глобальной модели гравитационного поля: *а* – карта аномалий Буге; *б* – карта рельефа земной поверхности

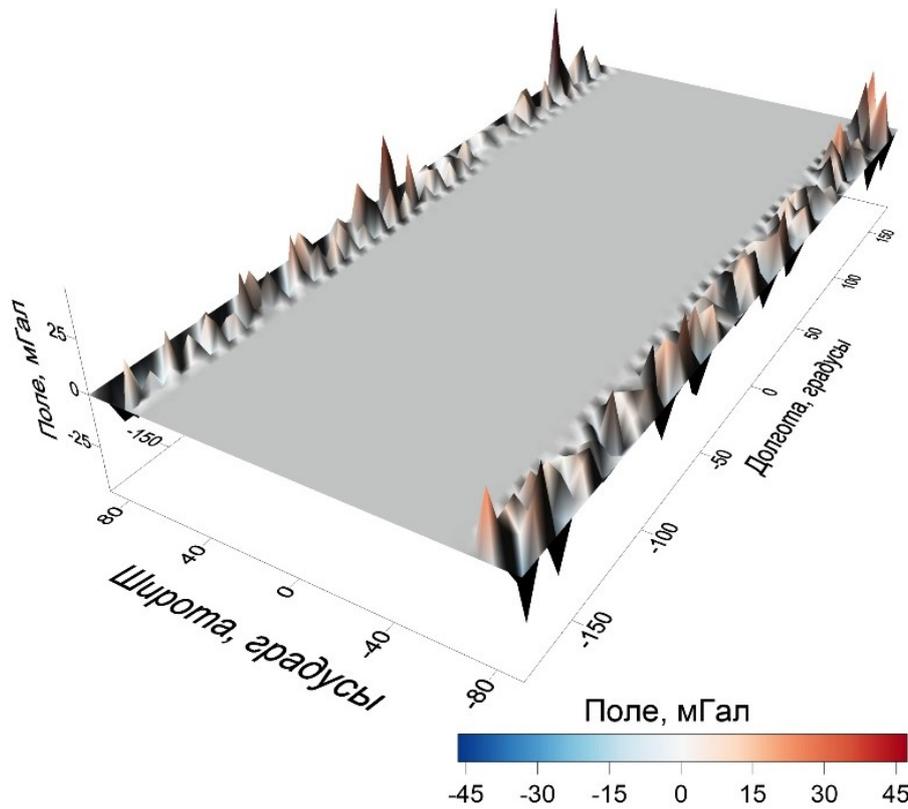


Рис. 3. Трехмерная модель (3D Surface) разностного гравитационного поля V_R : аномалии Буге минус гравитационный эффект аппроксимирующих масс

Задача решалась повторно при тех же глубинах точечных масс $R^* = 550$ км. После выполнения 95 итераций показатели качества решения СЛАУ (2) составили: $F2 = 0.001$ мГал, $FM = 0.008$ мГал. Визуализация сети точек задания поля представлена на рис. 4.

Таблица

Характеристики глобальной модели аномалий силы тяжести (северное полушарие Земли)

Границы зоны, градусы		Длина дуги параллели 1°, км		Шаг сети Δ , градусы	Шаг сети, $r(\Delta)$, км	
юг	север	юг	север		юг	север
0	60	111.3	55.8	5	556.5	279
60	70	55.8	38.1	10	558	381
70	75	38.1	28.9	20	762	578
75	80	28.9	19.4	30	867	582
80	85	19.4	9.7	60	582	582

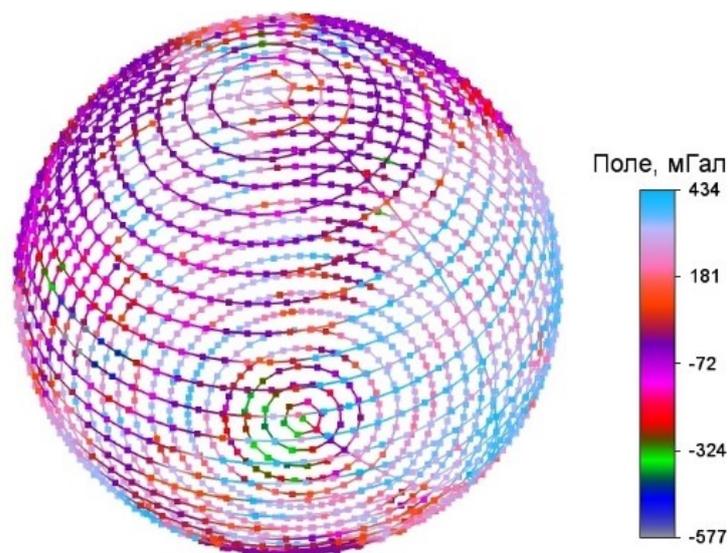


Рис. 4. Восстановленные значения аномалий Буге на поверхности Земли

Заключение

Для повышения точности построения глобальных аналитических моделей аномального гравитационного поля целесообразно использование квазиравномерной сети точек: $r(\Delta_1) \cong r(\Delta_2)$. В статье представлен первый опыт построения такой модели с количеством точек 2053. Следует отметить высокую точность (~ 0.001 мГал) и скорость (~ 20 с) формирования аналитической модели аномалий Буге для всей Земли при средней плотности сети ~ 1 точка/ 25×10^4 км². Комплексное использование глобальной и региональных аналитических моделей аномалий силы тяжести при вычислении трансформант представляется весьма перспективным направлением дальнейших исследований.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
№ 23-27-00113, <https://rscf.ru/project/23-27-00113/>*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вычислительная математика и техника в разведочной геофизике. Справочник геофизика / под ред. В.И. Дмитриева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Недра, 1990. – 498 с.
2. Долгаль А.С. Истокообразная аппроксимация региональных аномалий силы тяжести // Горное эхо. – 2023. – № 1 (90). – С. 77-86. – DOI: 10.7242/echo.2023.1.11.
3. Долгаль А.С., Костицын В.И., Пугин А.В., Хохлова В.В. Выбор модели Земли для трансформации аномалий силы тяжести в процессе региональных исследований // Геофизика. – 2022. – № 5. – С. 6-12.
4. Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Ворошилов В.А. Совершенствование методики аналитической аппроксимации данных магниторазведки // Геофизика. – 2020. – № 5. – С. 31-38.
5. Долгаль А.С., Костицын В.И., Новикова П.Н., Пугин А.В. Моделирование аномалий силы тяжести системой точечных масс на сферообразной земле // Геофизика. – 2023. – № 5. – С. 10-17. – DOI: 10.34926/geo.2023.13.94.002.
6. Долгаль А.С., Христенко Л.А. Совершенствование компьютерной технологии разделения аномалий силы тяжести с применением эквивалентных источников // Геофизические исследования. – 2023. – Т. 24, № 1. – С. 31-43. – DOI: 10.21455/GR2023.1-2.
7. Пугин А.В. Истокообразные аппроксимации геопотенциальных полей. От теории к практике // Геофизические исследования. – 2018. – Т.19, № 4. – С. 16-30. – DOI:10.21455/gr2018.4-2.
8. Страхов В.Н., Керимов И.А., Степанова И.Э. Разработка теории и компьютерной технологии построения линейных аналитических аппроксимаций гравитационных и магнитных полей. – М.: ИФЗ РАН, 2009. – 254 с.: ил.
9. Фадеев Д.К. Об обусловленности матриц // Труды математического института АН СССР. – 1959. – Т. 53. – С. 387-391.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОБРОТНОСТИ СРЕДЫ НА ТЕРРИТОРИИ РУДНИКОВ НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕКАМСКОГО И ЖЕЗКАЗГАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А.С. Мурыськин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: в статье представлены результаты оценки добротности для территорий Верхнекамского и Жезказганского месторождений. Детально описаны требования к подготовке данных, теоретические основы метода и выполнения измерений. Представлено обоснование для применения данной методики и невозможность использования для оценки добротности среды кода-волн.

Ключевые слова: добротность, Верхнекамское месторождение, Жезказганское месторождение, рудник Жомарт, методика Гладвина-Стейси, затухание, сейсмические волны, импульс.

При распространении в реальных средах сейсмические волны рассеиваются и несут информацию не только об источнике, но и о геологическом разрезе. Затухание сейсмических волн – снижение интенсивности упругих колебаний, обусловленное явлениями поглощения, геометрического расхождения и рассеяния энергии волн при распространении их в геологической среде по мере удаления от источника. При распространении в реальной среде сейсмические волны преломляются, отражаются и рассеиваются на различных неоднородностях. Также свой вклад в потерю энергии волны вносит поглощение из-за неидеальной упругости среды. Существуют различные методы оценки поглощающих свойств среды, многие из которых основаны на изучении кода-волн. Кода-волны являются рассеянными на неоднородностях среды поперечными волнами.

Затухание количественно оценивают коэффициентом затухания σ , который является потерей энергии на единицу длины (метр или километр). Часто для оценки затухания колебаний вводится параметр добротности Q , который является безразмерным. Численно добротность равна отношению начальной энергии к энергии поглощенной средой за один период колебаний с частотой ω [1,2]:

$$Q(\omega) = 2\pi E/\Delta E, \quad (1)$$

где Q – добротность среды, E – начальная энергия сейсмической волны, ΔE – изменение энергии сейсмической волны, при прохождении пути равного длине волны.

Добротность обратно пропорциональна затуханию. Связь между коэффициентом затухания σ и добротностью Q выражается формулой (2):

$$Q = \pi f/V\sigma, \quad (2)$$

где V – скорость сейсмической волны. Чаще всего принимается, что величина добротности Q является частотно-зависимой, по крайней мере, для частоты $f \geq 1$ Гц [4].

В работе [3] предложена методика Гладвина-Стейси для численной оценки добротности неупругой среды по изменению длительности сигнала. Метод основан на простой идее, что в реальных средах высокие частоты затухают быстрее, чем низкие. Рассмотрим сейсмический импульс, который проходит через среду с добротностью Q . Длительность импульса в каждый момент времени можно определить как

$$\tau = \tau_0 + Ct/Q, \quad (3)$$

где τ – это половина длительности импульса в момент времени t , τ_0 – половина начальной длительности импульса, C – эмпирический коэффициент формы фронта волны, Q – добротность среды. Для объемных волн $C = 0.5$. Зная скорость сейсмической волны в среде, мы можем определить длительность импульса в любой точке пространства:

$$\tau = \tau_0 + Cr/VQ, \quad (4)$$

где r – гипоцентральное расстояние, V – скорость сейсмической волны.

Теперь необходимо в обратном порядке определить добротность среды с использованием волновых форм землетрясений. Получив выборку с достаточно высоким соотношением сигнал/помеха для одного и того же события на станциях с разным удалением от очага, по сейсмическим записям определяется длина импульса.

Из уравнения (4) видно, что это классическая линейная функция и добротность связана с коэффициентом наклона прямой:

$$k = C/VQ, \quad (5)$$

$$Q = C/kV, \quad (6)$$

где k – коэффициент наклона уравнения линейной регрессии.

В итоге получаем количественную оценку добротности, основанную на простой и надежной зависимости. К плюсам данного подхода можно отнести легкость и скорость выполнения, надежность. К минусам – отсутствие частотной зависимости для добротности. На выходе имеем какую-то среднюю добротность. Поэтому следует использовать землетрясения только с близкими оценками по магнитуде, так как их частотный состав не будет сильно отличаться. Для определения добротности среды в региональном масштабе на сегодняшний день очень популярны различные методики с использованием кода-волн. В работе для определения добротности будет использоваться описанная выше методика Гладвина-Стейси, так как сейсмические события на рудниках обычно имеют небольшую магнитуду, при этом уровень шумов довольно высок, что не дает возможности уверенно выделить кода-волны.

Оценка добротности выполнялась для территорий Жезказганского месторождения, рудника Жомарт и рудника СКРУ-1 (Верхнекамское месторождение). Измерения проводились следующим образом:

- 1) выборка волновых форм сейсмических событий в определенном диапазоне магнитуд (не менее 20 для каждого объекта). Соблюдение минимальных требований для локации очага – минимум 3 станции должны зарегистрировать сейсмическое событие;
- 2) обработка волновых форм, выделение вступлений Р- и S-волн, локация очагов землетрясений, отбраковка записей при большой ошибке локации;
- 3) замер гипоцентрального расстояния до каждой станции в выборке;
- 4) замер длительности импульса первых вступлений на волновых формах сейсмического события.

В итоге по каждому событию в выборке получена таблица измерений, пример приведен в таблице 1. Далее необходимо определить зависимость длительности импульса от расстояния, по наклону которой можно выйти на добротность (рис. 1).

Таблица 1

Пример результатов измерений по одному сейсмическому событию

Станция	Время начала импульса, с	Время конца импульса, с	$2 \cdot \tau$, с	τ , с	Расстояние, км
s117	12.857	12.884	0.027	0.0135	1.399
s111	13.272	13.31	0.038	0.019	3.464
s118	13.285	13.335	0.05	0.025	3.405
s115	13.381	13.42	0.039	0.0195	3.959
s114	13.666	13.723	0.057	0.0285	5.334
s109	13.849	13.91	0.061	0.0305	6.303
s106	13.887	13.947	0.06	0.03	6.363

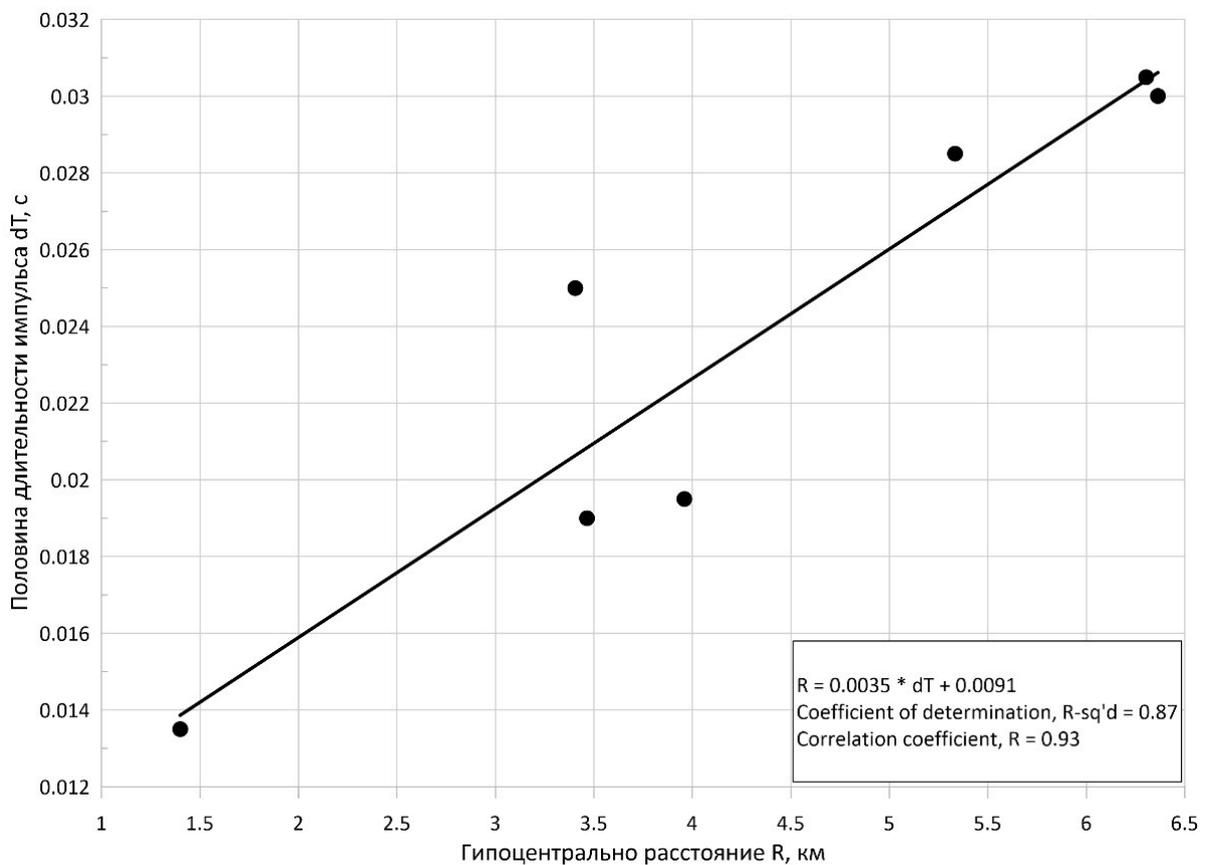


Рис. 1. Зависимость длины импульса от расстояния на примере одного сейсмического события

На последнем этапе необходимо оценить среднюю добротность по каждой станции отдельно и убрать из расчета станции с малым количеством замеров. В данной работе для расчета убраны все станции, которые участвовали менее, чем в 5 замерах. Такой подход позволяет определить добротность среды независимо от грунтовых условий и избавиться от сильных выбросов, которые могут быть связаны с индивидуальными особенностями отдельных сейсмических событий. Ниже приведены таблицы с результатами расчетов.

Таблица 2

Результаты количественной оценки добротности для рудника Жомарт

Станция	Средняя добротность	Количество измерений
s02	61.2	14
s05	57.1	10
s04	47.1	5
s01	57.9	14
s09	62.8	14
s03	55.6	7
s10	76.7	10
s11	77.0	8
s06	51.8	5
Общий итог	61.9	87

Таблица 3

Результаты количественной оценки добротности для Жезказганского месторождения

Станция	Средняя добротность	Количество измерений
s105	53.9	5
s106	67.0	8
s107	64.7	15
s108	69.8	10
s109	65.7	14
s111	62.7	13
s112	71.3	9
s114	62.6	11
s116	78.8	6
s117	64.9	15
s118	67.4	7
s120	69.0	15
Общий итог	66.4	128

Таблица 4

Результаты количественной оценки добротности для рудника СКРУ-1

Станция	Средняя добротность	Количество измерений
s110	33.5	15
s111	34.4	12
s12	33.5	15
s14	29.5	9
Общий итог	33.0	51

По результатам измерений средняя добротность между отдельными станциями на всех объектах отличается от средней по месторождению не более чем на 20%. Также почти не отличается добротность между рудником Жомарт и Жезказганским месторождением, так как они относятся к одной территории и имеют схожее геологическое строение. Сильно ниже получилась оценка добротности СКРУ-1, это обусловлено наличием большего количества рыхлых пород в геологическом строении Верхнекамского месторождения (мергели, глины), по сравнению с Жезказганским месторождением. Сводный результат по всем объектам представлен в таблице 5.

Таблица 5

Результаты оценки добротности на территории рудников

Объект	Итоговая добротность
Рудник Жомарт	61.9
Жезказганское месторождение	66.4
Рудник СКРУ-1	33.0

Можно сделать вывод, что полученные результаты устойчивы и могут использоваться для решения различных задач шахтной сейсмологии. Наиболее перспективным представляется анализ пространственного распределения добротности на различных масштабных уровнях, а также мониторинг ее изменения со временем. Знание параметров затухания сейсмических волн также очень важно для корректного расчета регистрационных возможностей действующих и проектируемых систем сейсмологического мониторинга.

Таким образом, метод Гладвина-Стейси позволяет надежно и просто определить добротность среды по изменению длительности сейсмического импульса во времени и пространстве. Данная методика требует только наличие четких первых вступлений, на которых можно надежно определить длительность первого импульса на разных удаленностях от очага.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500029-1).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: source, attenuation, and scattering // Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets. – 1975. – Vol. 80, № 23. – P. 3322-3342.
2. Aki K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves // Journal of Geophysical Research. – 1969. – V. 74, № 2. – P. 615-631.
3. Gladwin M.T., Stacey F.D. Anelastic degradation of acoustic pulses in rock // Physics of the Earth and Planetary Interiors. – 1973. – V. 8, № 4. – P. 332-336.
4. Havskov, J., Ottemöller L. Routine Data Processing in Earthquake Seismology [Electronic resource]. – Springer, 2010. – 352 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «ПОЛЮС» ПОЛНОГО ГРАДИЕНТА ПОЛЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПРИ МОНИТОРИНГОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ В РАЙОНЕ ТЕХНОГЕННОГО ОЗЕРА

Г.В. Простолупов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: На территории техногенного озера Верхнекамского месторождения калийных солей с 2016 года с периодичностью в 2-3 года проводятся мониторинговые гравиметрические наблюдения. Получена серия карт динамического гравитационного поля. Участок исследований находится на подработанной территории, в сложной геодинамической обстановке. Обработка методом «Поллюс» основных аномалий поля показала подтверждение обнаруженной ранее закономерности смены знака аномалии в соответствии с циклами «разуплотнение-оседание-уплотнение», сделано заключение о вероятном затухании этих циклов, уточнены глубины источников аномалий, обнаружено постепенное смещение вверх по разрезу очагов геодинамической неустойчивости.

Ключевые слова: аномалия, гравитационное поле, оседание, техногенное озеро, трансформанты, интерпретация, мониторинг.

Введение

На участке территории СКРУ-2 Верхнекамского месторождения калийных солей для оценки состояния водозащитной толщи в районе техногенного озера в 2016, 2018, 2021 и 2023 гг. выполнена высокоточная гравиметрическая съемка масштаба 1:10 000, площадью 5 кв. км. По результатам полевых работ построена карта аномалий силы тяжести в редукции Буге с плотностью промежуточного слоя, подобранной для изучаемого участка, $2,3 \text{ г/см}^3$. Расстояние между пунктами наблюдения $100 \times 100 \text{ м}$. По результатам съемок за 7 лет для выявления изменений плотности пород в горном массиве рассчитана разница полей в периодах 2016-18, 2018-21 и 2021-23 гг. В процессе исследований построены трансформанты гравитационного поля по программе VECTOR, проведена комплексная интерпретация по результатам съемки 2016 и 2018 гг. При дальнейшей интерпретации возникла необходимость более точной оценки глубины источников динамических аномалий в районе техногенного озера. Для этого был применен метод «Поллюс» – программа Polus2D полного градиента поля силы тяжести [1].

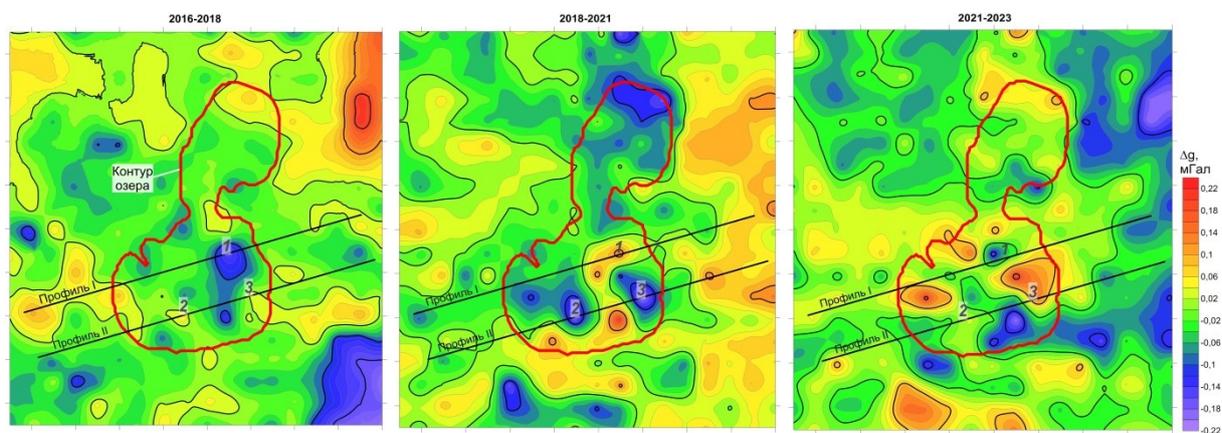


Рис. 1. Динамическое гравитационное поле Δg в трех периодах наблюдений 2016-18, 2018-21, 2021-23 гг.

Геологические особенности района работ

Техногенное озеро сформировалось в 1991 г., через 19 лет после начала отработки продуктивных пластов и через 3 года после завершения их отработки. В пределах техногенного озера выемочные работы проведены по двум пластам – АБ и Кр II. По результатам бурения еще в 1960-70 гг. уровень грунтовых вод в скважинах был зафиксирован на глубине от 0 до 5 м (участок расположен в долине р. Камы). Поэтому даже небольшое погружение земной поверхности при оседании подработанного массива над горными выработками должно приводить к формированию открытой водной поверхности (озеру), что и наблюдается в настоящее время.

Озеро сформировалось на участке наибольшего оседания подработанного массива, где уровень грунтовых вод оказался выше земной поверхности. Площадь озера пережимом в районе скважины делится на две части – северную и южную. Длина озера около 1,2 км, ширина южной части 0,7 км, северной – около 0,4 км.

В целом участок исследований находится в сложной геодинамической обстановке, в тектоническом отношении расположен на западном склоне обширного соляного вала, который под большим углом погружается в Камский прогиб. Ось Камского прогиба расположена в 4-5 км западнее границы изучаемого участка. Средний угол погружения кровли покровной каменной соли на исследуемом участке составляет $4,4^\circ$. Это создает в продуктивной толще, представленной в том числе прослоями карналлитов и обладающей повышенной пластичностью, нестабильную динамическую обстановку, когда в продуктивной толще возникает скользящий момент при стремлении вышележащей надсоляной толщи вниз по склону в сторону Камского прогиба [2].

В скважине, расположенной непосредственно в районе техногенного озера, в надсоляной толще отмечено много прослоев пород, разрушенных до обломков, разрыхленных, слабых, с трещинами. В соляно-мергельной толще отмечено наклонное до 5° залегание слоев, что говорит о проявлении тут тектонических процессов. Наклонное залегание слоев в переходной толще, падение слоистости в переходной толще достигает 30° . Это указывает на то, что в переходной толще помимо тектонических причин формирования наклонной слоистости, проявилось еще и влияние выветривания и деструктивных процессов.

В надсоляном разрезе выделяются две толщи с различными физическими и механическими свойствами. Верхняя, состоящая из пестроцветной и терригенно-карбонатной толщ, более жесткая, имеет повышенную плотность. Ниже залегает соляно-мергельная толща. Она характеризуется большей пластичностью и пониженной плотностью пород по сравнению с вышелегающей толщей. Под соляно-мергельной толщей залегают соляные породы.

Нестабильное состояние подработанного массива усугубляется наличием большого количества слабых пластичных карналлитовых пород в продуктивной толще при значительном наклоне слоев на крыле соляного поднятия. Это обуславливает здесь сочетание оседания подработанного массива над горными выработками под действием гравитации и стремления его к сползанию вниз по склону. Развивавшиеся в таких условиях деформации в подработанной толще привели к изменению начального физического состояния пород и изменению их свойств, в том числе плотности [3].

Обработка динамического поля методом «Полюс»

Нестабильное в тектоническом плане состояние этого района в значительной степени оправдывает необходимость детального гравиметрического мониторинга. Для выявления изменений плотности пород в горном массиве в период с 2016 по 2023 гг. построены карты динамического поля по трем периодам 2016-18, 2018-21 и 2021-23 гг., названные для краткости соответственно первый, второй и третий периоды (рис. 1).

В наибольшей степени разуплотнение наблюдается в южной части техногенного озера. Наиболее интенсивная аномалия 1 получена по динамическому полю 2016-18 гг. Во втором периоде наблюдений, 2018-21 гг, эта аномалия сменила знак на положительный, вероятные причины этого описаны в [4]. При этом во втором периоде возникли две не менее интенсивные аномалии 2 и 3 (см. рис. 1). Перечисленные три аномалии стали объектом для исследования в настоящей работе.

Через центральную часть этих аномалий проведены профили I и II. По всем трем периодам наблюдений по обеим профилям проведена обработка динамического гравитационного поля – решение обратной задачи в программе Полюс2D, в следующей последовательности. Согласно принятому алгоритму проведена истокообразная аппроксимация значений динамического поля, получены величины производных потенциала V_z , V_x , а также высшие производные V_{zx} , V_{zz} , V_{zxx} , V_{zzz} . По ним построены градиенты ∇V , ∇V_z , ∇V_{zz} и рассчитаны координаты пересечений полных векторов потенциала и его производных в плоскости профиля, в результате чего получены отрицательные и положительные полюсы P . Полюсы первого порядка P_I показали недопустимый разброс, локализация полюсов второго и третьего порядков P_{II} и P_{III} приведена на рис. 2.

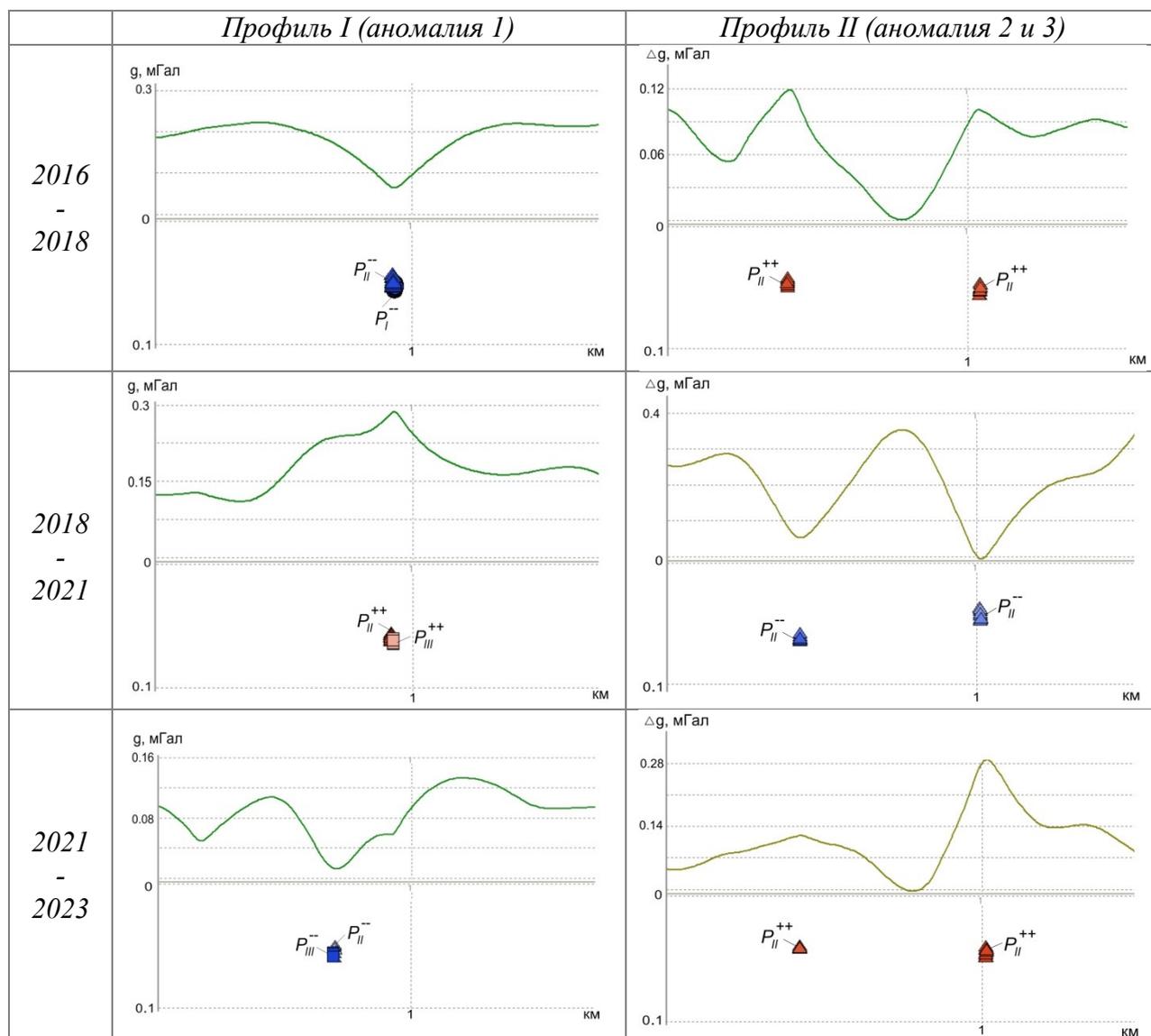


Рис. 2. Решение обратной задачи методом «Полюс» для аномалий 1, 2 и 3 в районе техногенного озера

В предыдущих исследованиях [5] было отмечено явление смены знака динамической аномалии: «В южной части озера в период 2016-18 гг. была наиболее интенсивная отрицательная динамическая аномалия, а к 2021 г. динамическая аномалия стала положительной. Инверсия динамических аномалий объясняется процессом оседания земной поверхности (углублением дна озера). Оседание земной поверхности над зоной разуплотнения приводят к уплотнению пород, что фиксируется положительной динамической аномалией силы тяжести. Это свидетельствует о прекращении процесса разуплотнения пород или начале нового цикла «разуплотнение пород – оседание – уплотнение пород». Данные повторных гравиметрических наблюдений свидетельствуют о продолжении процесса разуплотнения подработанного массива в данной зоне. Вероятно, здесь следует ожидать наиболее интенсивные оседания земной поверхности и расширение озера на север и юг...». Упомянутая аномалия в настоящем исследовании значится как аномалия 1.

Таким образом (см. рис. 2), в первом периоде наблюдений аномалия 1 – отрицательная, во втором – положительная. Это говорит о завершении цикла «разуплотнение-оседание-уплотнение» (РОУ) во втором периоде. В третьем – снова отрицательная, что говорит о начале нового цикла РОУ в третьем периоде. При этом амплитуда аномалии 1 в первый период наблюдений была $-0,15$ мГал, во второй период наблюдений стала положительной – около $+0,15$ мГал, что говорит о «полной компенсации» разуплотнения и завершении цикла «разуплотнение-оседание-уплотнение». Аномалия 1 в третьем периоде наблюдений имеет уже меньшую амплитуду и отрицательный знак – $-0,1$ мГал, что говорит о вновь появившемся разуплотнении и начале нового цикла, но меньшей интенсивности, а также о вероятном затухании (замедлении) процесса вертикального сдвижения горных пород и оседания.

По всем трем аномалиям (см. рис. 2) можно заметить смену знака значений поля в каждом последующем периоде наблюдений.

Аномалии 2 и 3 во все трех периодах наблюдений меняют знаки синхронно: в первый период – положительные, во второй – отрицательные, в третий – вновь положительные. Здесь в первый период можно говорить о завершении цикла «разуплотнение-оседание-уплотнение». Отрицательные аномалии 2 и 3 значительной интенсивности $-0,30$ – $-0,35$ мГал во второй период зафиксировали новый цикл РОУ, что подтверждается последующей компенсацией в третьем периоде в виде уплотнения – положительных аномалий амплитудой $+0,14$ – $+0,28$ мГал. Произойдет ли здесь повторение этого процесса или породы обрели относительную стабильность, покажут следующие мониторинговые наблюдения. Если сравнивать глубину аномалий 2 и 3 в первом и третьем циклах, можно заметить, что глубина положительных аномалий с 50-60 м в первом периоде снизилась до 40-50 м в третьем периоде. Можно сделать предположение о постепенном сдвиге области эпицентра нестабильного состояния вверх по разрезу – от систем выработок к земной поверхности.

Выводы

В целом участок исследований находится в сложной геодинамической обстановке. По трем рассмотренным аномалиям обнаружен эффект ритмичной смены знаков аномальной плотности. Механизм этого явления, «разуплотнение пород – оседание – уплотнение пород», рассмотренный ранее [4] на примере одной аномалии, подтвержден еще на примере двух аномалий. Обнаружены признаки затухания вышеописанного ритмичного процесса в районе техногенного озера, что говорит о замедлении вертикального сдвижения горных пород и процесса оседания. Анализ глубин источников в методе «Полюс» указал на тенденции к движению области неустойчивого геодинамического состояния вверх по разрезу, от выработанного пространства к земной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полярная трансформация гравиметрических данных «Polus2d»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2017610475 / Тарантин М.В., Простолупов Г.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН. – 2016662317; заявл. 14.11.2016; зарегистрировано 11.01.2017; опублик. 11.01.2017. – 1 с.
2. Щербинина Г.П. Изучение изменения плотностного состояния подработанной толщи // Горное эхо. – 2019. – № 4 (77). – С. 50-53. DOI: 10.7242/echo.2019.4.12.
3. Щербинина Г.П., Простолупов Г.В. Влияние техногенных деформаций подработанного массива на трансформанты гравитационного поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 31-39. – DOI: 10.15372/FTRPRI20220104.
4. Бычков С.Г., Симанов А.А., Хохлова В.В. Контроль динамики разуплотненных зон на основе повторных гравиметрических исследований // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 49-й сес. Междунар. семинара им. Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова / ИГФ УрО РАН. – Екатеринбург, 2023. – С. 74-77.
5. Бычков С.Г., Простолупов Г.В., Щербинина Г.П. Выявление техногенных изменений в подработанном массиве по гравиметрическим данным на Верхнекамском месторождении солей // Геофизика. – 2019. – № 5. – С. 43-49.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2024.1.11

**МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОМЕТРИИ
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

А.А. Тайницкий, Л.А. Христенко

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: С целью изучения деформационных процессов земной поверхности был выполнен комплекс геолого-геофизических исследований, включающий электрометрические исследования методами симметричного электропрофилирования и естественного электрического поля. Приведены результаты разложения естественного поля на составляющие с использованием алгоритма адаптивной двумерной энергетической фильтрации программного комплекса «КОСКАД 3D». Полученные локальные поля могут быть использованы при совместной интерпретации результатов других методов для уменьшения неоднозначности толкований.

Ключевые слова: электропрофилирование, естественное поле, кажущееся сопротивление, адаптивная фильтрация.

В пределах шахтного поля Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) проектируется трасса газопровода высокого давления. В связи с проявлением деформационных процессов земной поверхности в створе проектируемой трассы для определения их характера и возможной динамики был выполнен комплекс геолого-геофизических исследований. Наряду с наземными сейсморазведочными исследованиями, бурением и специализированными наблюдениями в скважине, комплекс включал электрометрические исследования, которые наиболее чувствительны к влажности пород, избыточностью которой и вызваны зачастую негативные процессы в горных массивах.

Поскольку выраженные деформации и линии трещин были обнаружены в ноябре 2022 г., первоначально электрометрические наблюдения были выполнены на 2 профилях методом симметричного электропрофилирования (СЭП) с тремя разносами питающей линии АВ (100, 200, 400 м) и разносом приемной линии MN равным шагу съемки 20 м.

На пр. № 1 кажущиеся сопротивления (КС), полученные с разносом АВ/2 = 50 м, изменяются от 45 до 110 Ом·м. Среднее КС составляет около 70 Ом·м. Интервалы от-

носителем пониженных значений КС отмечаются между пикетами (пк) 20-40, 60-160, 620-720. КС, полученные с разномом $AB/2 = 100$ м, изменяются от 45 до 190 Ом·м. Среднее КС составляет около 90 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между пк 20-40, 80-160, 220-280, 380-460, 520-560, 620-700. Кажущиеся сопротивления, полученные с разномом $AB/2 = 200$ м, изменяются от 30 до 180 Ом·м. Среднее КС составляет около 100 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между пк 180-320, 540-720 (рис. 1а).

Рост значений КС с глубиной отвечает составу пород разреза: четвертичные отложения представлены в верхней части песком мелкозернистым, ниже до подошвы слоя глиной комковатой плотной с дресвой и щебнем известняка; терригенно-карбонатные отложения представлены в основном известняком массивным кавернозным, трещиноватым. Трещины субвертикальные и субгоризонтальные, открытые и закрытые выполнены кальцитом. Свойства отложений терригенно-карбонатной толщи (ТКТ) характеризуются измерениями КС с разносами линии $AB/2 = 100$ и 200 м. На этих же разносах наиболее пониженные (значительно ниже средних) значения КС отмечаются между пк 200-280 (40-70 Ом·м) и 540-720 (30-60 Ом·м). На разрезах КС (рис. 1б) аномалии наиболее пониженных значений КС отмечаются между пк 80-140, 200-280, 500-540 и 560-720. Первая отвечает верхней части разреза. Аномалия между пк 200-280 – уровню ТКТ. На пк 260 аномалия пониженных КС отмечается с глубины и почти до поверхности наблюдений. Аномалии между пк 500-540 и 560-720 отмечаются на всю глубину разреза. Зоне оседания (пк 500-520) на разрезе КС отвечает вертикальная узлокаллизированная аномалия пониженных значений с эпицентром на глубине более 80 м.

На графике КС с $AB/2=50$ м зоне оседания соответствует интервал пониженных (с 90 до 60 Ом·м) значений, на графике КС с $AB/2=200$ – начало интервала градиентного снижения значений сопротивления. Однако на графике КС с $AB/2 = 100$ отмечаются пиковые значения, т.е. однозначно утверждать, что такое сочетание значений КС характеризует зону оседания, невозможно.

На профиле № 2 кажущиеся сопротивления, полученные с разномом $AB/2 = 50$ м, изменяются от 60 до 120 Ом·м. Среднее КС составляет около 80 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между пк 20-140, 740-800. КС, полученные с разномом $AB/2 = 100$ м, изменяются от 35 до 240 Ом·м. Среднее КС составляет около 100 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между пк 20-100, 140-180, 520-540, 620-680. Кажущиеся сопротивления, полученные с разномом $AB/2 = 200$ м, изменяются от 30 до 250 Ом·м. Среднее КС составляет около 100 Ом·м. Интервалы относительно пониженных значений КС отмечаются между пк 20-60, 220-280, 360-380, 420-520, 600-680 (рис. 1в). На разрезах КС (рис. 1г) аномалии наиболее пониженных значений (пк 20-60, 220-280, 600-680) отмечаются в основном на уровне ТКТ и лишь между пк 20-60 на всю глубину исследования до поверхности наблюдений. Зона оседания (пк 240-260) не отражается на малом и среднем разносах СЭП, но хорошо выделяется на большом разнومه, что затрудняет однозначную трактовку причин, вызвавших понижение значений КС с $AB/2 = 200$ именно в интервале наблюдений, соответствующему оседанию.

В мае 2023 г. электрометрические наблюдения были выполнены на 8 профилях методом естественного электрического поля (ЕП) в модификации градиента с шагом, равным длине приемной линии (MN) – 10 м. ЕП практически единственный геофизический метод, который фиксирует аномальное поле, являющееся следствием потока или фильтрации грунтовых вод [1]. Имеется положительный опыт его использования при решении различных задач как в соляных шахтах, так и на поверхности в пределах ВКМКС [2, 3].

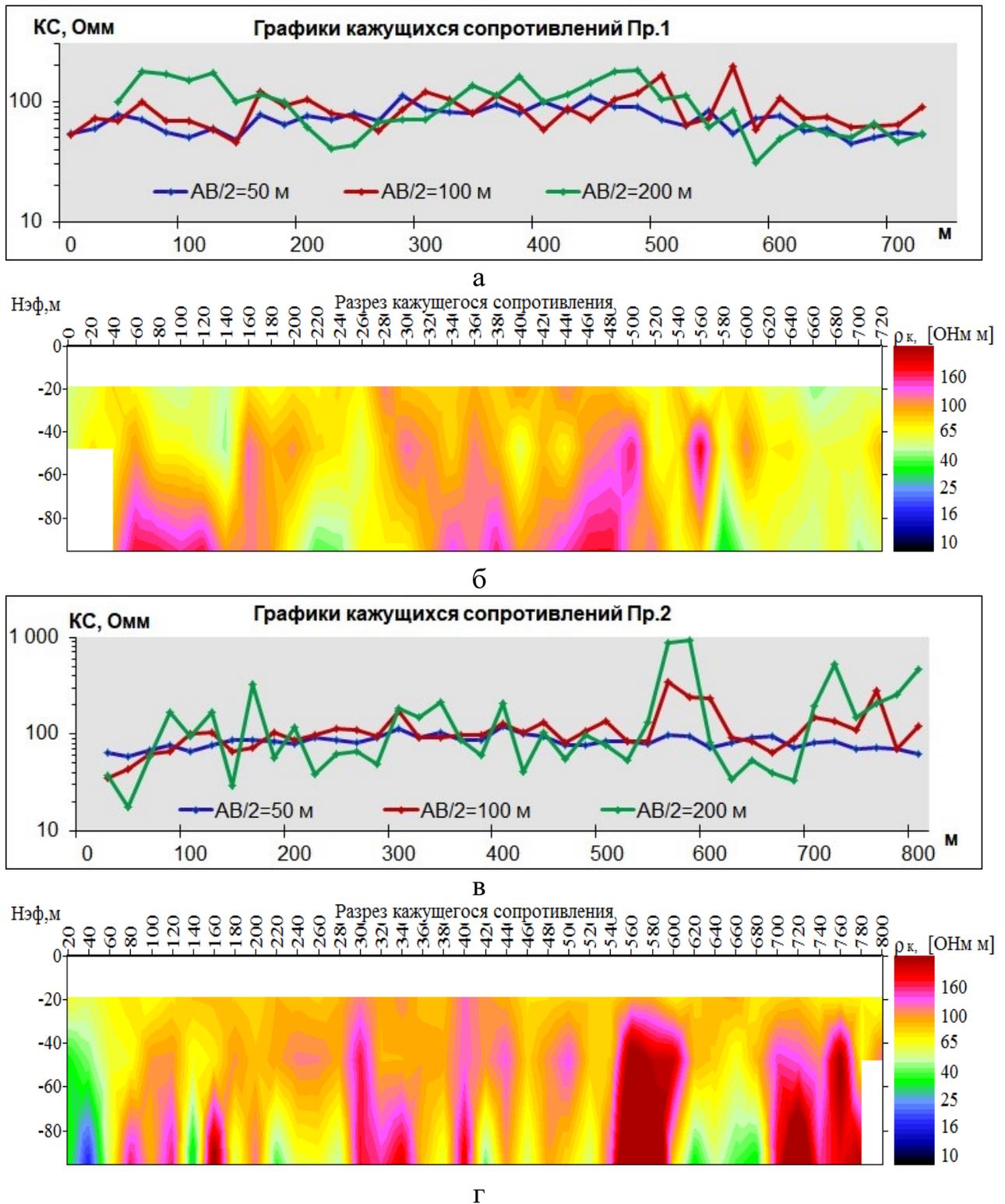


Рис. 1. Результаты наблюдений СЭП и разрезы кажущегося сопротивления.
Профили: а-б – № 1; в-г – № 2

На графиках, построенных по рассчитанным потенциалам U_{EP} (рис. 2) выделяются протяженные интервалы отрицательных значений (около $-15 \div -30$ мВ), предположительно отражающие движение грунтовых вод в ТКТ. Локальные понижения U_{EP} до -60 мВ согласуются с пониженными значениями КС на разных разносах питающей линии АВ, характеризую различную глубину фильтрационных процессов. Остановим-

ся более подробно на профилях 1 и 2, где наблюдения были выполнены методами СЭП и ЕП.

На профиле № 1 интервал пониженных значений потенциалов (-35 ÷ -20 мВ) между пк 40-100 на графике U ЕП отвечает интервалу пониженных значений КС с $AB/2 = 50$ и 100 м, вероятно, отражая инфильтрацию с поверхности. Интервал наиболее низких значений (до -65 мВ) между пк 420-460 соответствует интервалу пониженных значений КС с $AB/2=100$ и 200 м, характеризую фильтрацию в нижней части ТКТ. Интервал между пк 600-640 интенсивностью около -50 мВ согласуется с пониженными КС на всех трех разносах питающей линии АВ и характеризует, вероятно, фильтрацию по субвертикальным трещинам. Зона оседания (пк 500-520) совпадает с протяженным интервалом отрицательных значений потенциалов и отвечает их относительному повышению.

На профиле № 2 интервалы пониженных значений потенциалов (-20 ÷ -30 мВ) между пк 200-300 и 380-520 на графике U ЕП отвечают интервалам пониженных значений КС с $AB/2=200$ м, характеризую, вероятно, водонасыщение кавернозных и трещиноватых пород. Зона оседания (пк 240-260), как на профиле № 2, отвечает относительному повышению значений U ЕП на протяженном интервале отрицательных значений потенциалов.

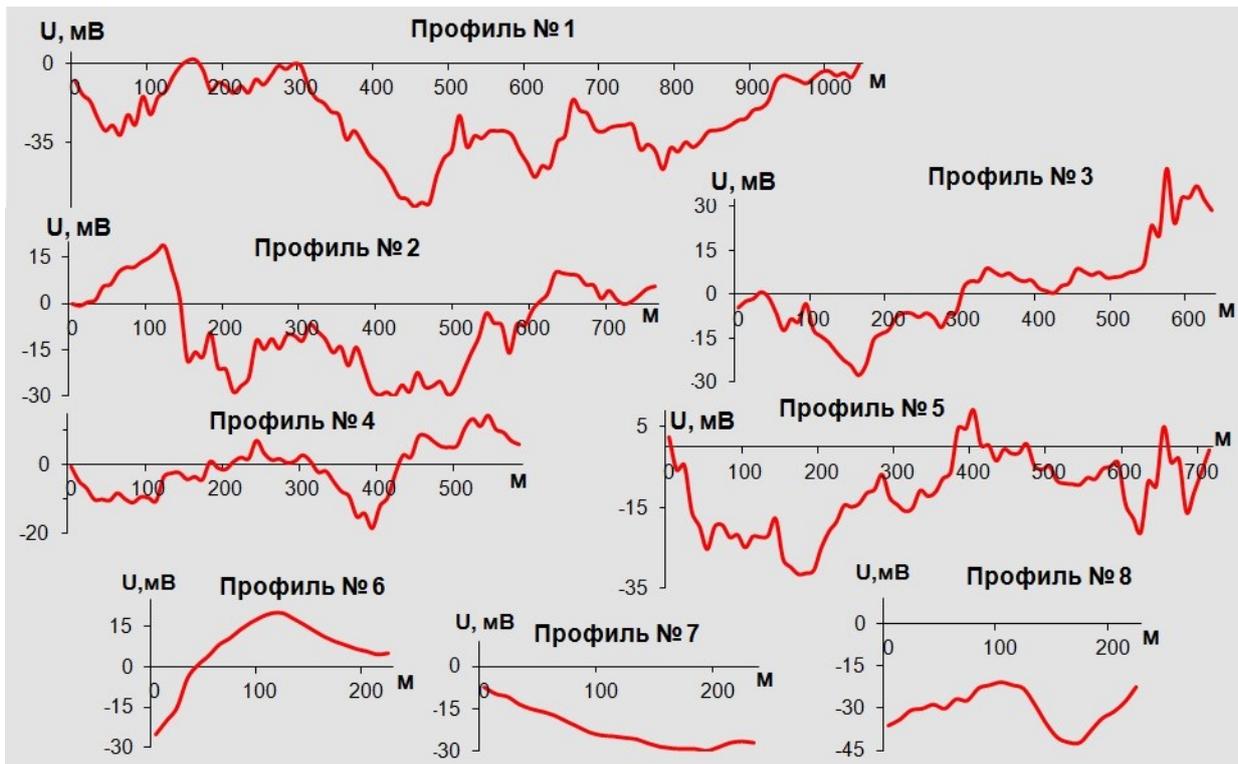


Рис. 2. Графики значений потенциала естественного поля

По интерполированным значениям потенциалов ЕП была построена карта изолиний, позволяющая качественно оценить характер пространственного распределения потенциала. На карте выделяется обширная область отрицательного потенциала, охватывающая практически весь участок за исключением его северо-восточной четверти. Эпицентры наиболее интенсивных (-40 ÷ -60 мВ) локальных аномалий этой области располагаются на профиле № 1, подробно описанном выше. Границы локальных аномалий охватывают профили № 2, 3 и 5.

Поскольку обе зоны оседания пространственно не связаны с экстремумами, а попадают на границы локальной аномалии, была предпринята попытка выделения компоненты, приближенно отвечающей этим зонам. Для этого в программном комплексе «КОСКАД 3D» [4] выполнено разложение естественного поля на составляющие и их анализ. Ранее авторами уже использовались различные преобразования ПК «КОСКАД 3D» для решения задач выявления, оценки динамики и влияния выработанного пространства недр на различные объекты инфраструктуры [5-7]. Реализованный в комплексе алгоритм адаптивной двумерной энергетической фильтрации позволяет оптимальным образом оценить параметры полезных сигналов с различными спектрально-корреляционными характеристиками непосредственно в процессе фильтрации. Разделение естественного поля с ее помощью позволило получить 3 составляющие (рис. 3) с характеристиками, приведенными в таблице.

Таблица

Статистические характеристики составляющих естественного поля

N	Мин. значение	Макс. значение	Размах	Медиана	Среднее	Ср.кв. отклонен.	Коефф. вариации	Коефф. асимм.	Коефф. эксцесса
8692	-50.518	27.28868	77.80664	-4.59488	-5.99379	13.54292	-30.6001	-0.21474	-0.27975
8692	-12.3989	11.76195	24.16088	-0.01311	-0.02539	2.108783	-175.117	-0.24404	4.637045
8692	-12.6364	15.48515	28.12153	0.002831	0.00193	0.979788	497.3131	0.132896	25.37567

На рисунке 3а приведен результат первой фильтрации исходного поля энергетическим фильтром, на рисунках 3б и 3в – соответственно, результат фильтрации остаточного поля, полученного после первой фильтрации и остаточное поле после второй фильтрации.

На рисунке 3а видно, что после первой фильтрации четко выделяются более энергоемкие аномалии в центре участка. Параметры менее энергоемких аномалий стало возможным оценить лишь после повторной фильтрации остаточного поля – рисунок 3б. Остаточное поле после повторной фильтрации содержит большое количество аномалий, расположенных практически равномерно на участке исследований. Сложно придать этому содержательный смысл, поэтому была выполнена еще одна фильтрация, которая позволила к тому же избавиться от аномалий, связанных с интерполяционными построениями, и выделить профильные аномалии, подтвержденные измерениями (рис. 3в). Обе зоны оседания пространственно совпали с остаточными аномалиями, обладающими определенными характеристиками. Подобные аномалии отмечаются на других интервалах профилей № 1 и 2, а так же на профилях № 5-8. Можно воспользоваться адаптивной одномерной энергетической фильтрацией профильных наблюдений для каждого профиля в отдельности [6], реализованной в ПК «КОСКАД», но для качественного анализа и с учетом комплексности исследований результат получен менее трудоемким способом и обладает необходимой достоверностью. Кроме того, двумерное отображение удобно использовать при интерпретации результатов других методов для уменьшения неоднозначности толкований и корректировки трассы газопровода.

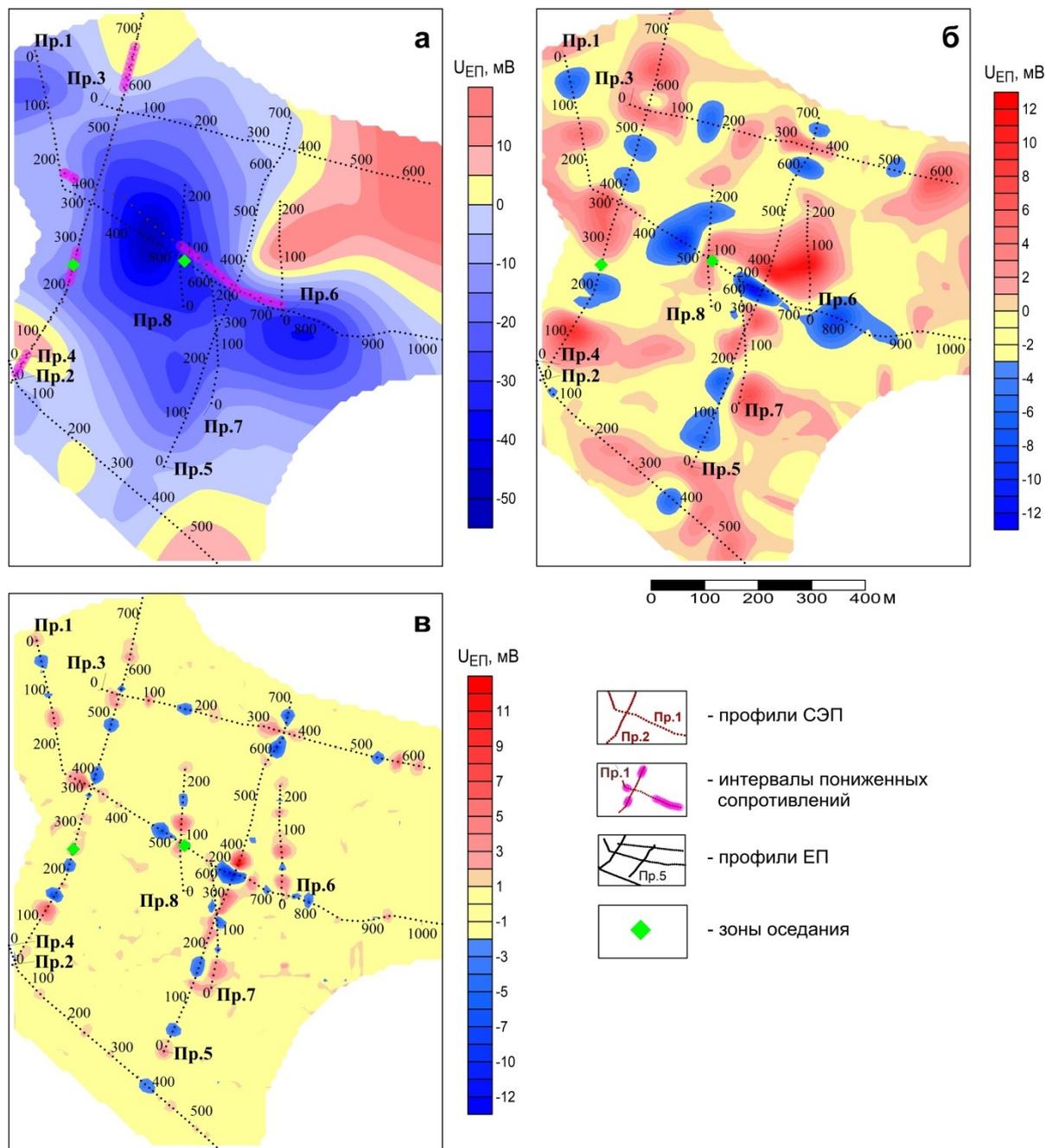


Рис. 3. Результаты адаптивной двумерной энергетической фильтрации:
 а – исходного поля; б – остаточного поля, полученного после первой фильтрации;
 в – остаточного поля после второй фильтрации

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР № 124020500054-3).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л. Недра, 1980. – 446 с.: ил.
2. Степанов Ю.И., Бушуева Е.С. Опыт применения метода естественного поля в соляных шахтах // Инженерная и рудная геофизика – 2020: 16-я науч.-практ. конф. и выставка, 14-18 сент. 2020. – Пермь, 2020. – С. 47. – DOI: 10.3997/2214-4609.202051063.

3. Степанов Ю.И., Кузнецов И.Л., Зубрикова Е.С., Тайницкий А.А. Теоретические и практические вопросы применения метода естественного поля на калийно-магниевого рудниках // Горное эхо. – 2023. – № 4 (93). – С. 72-79. – DOI: 10.7242/echo.2023.4.11.
4. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации – КОСКАД 3D // Геофизика. – 2000. – № 4. – С. 29-33.
5. Христенко Л.А. Результаты комплексной интерпретации данных электрометрических наблюдений // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 90-97. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.15.
6. Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Интерпретация профильных электрометрических наблюдений, выполненных в пределах Верхнекамского месторождения солей / Л.А. Христенко, Ю.И. Степанов // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей: материалы конф. / Ин-т геофизики УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2013. – С. 327-328. – (Седьмые науч. чтения памяти Ю.П. Булашевича).
7. Христенко Л.А., Степанов Ю.И. Электрометрические наблюдения при оценке влияния выработанного пространства недр на основание железнодорожной насыпи // Естественные и технические науки. – 2014. – № 7. – С. 58-62.

УДК 550.8.05

DOI:10.7242/echo.2024.1.12

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ВПЕРЕДИ ЗАБОЯ

А.Г. Ярославцев¹, И.Л. Кузнецов²
¹ Горный институт УрО РАН, г. Пермь
² ПАО «Уралкалий», г. Березники

Аннотация: На специальном полигоне в пределах соляного рудника проведены работы по исследованию околозабойной зоны сейсмическими методами на предмет обнаружения в ней контрастных протяженных границ. По результатам полноволнового моделирования выбраны параметры возбуждения и обработки полученных сигналов. Результаты обработки волновых полей удовлетворительно соотносятся с существующей геометрией шахтного поля. Выделенные волновые формы соответствуют известным границам выработок впереди забоя и в стороне от его направления. Показано применение процедуры поворота оси просвечивания на заданный угол и выделения отражений от центральной зоны конуса просвечивания.

Ключевые слова: шахтная сейсморазведка, сейсмическая локация, прогноз, забой, сейсмомоделирование, поперечные волны, горные выработки.

Основной объем шахтных сейсморазведочных исследований в калийных рудниках Верхнекамского месторождения солей проводится с целью прогноза состояния водо-защитной толщи [1, 2]. При этом разрабатываемые пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений и интерпретационные заключения в основном базируются на регистрации и анализе разнотипных отраженных волн, прошедших из целевого верхнего полупространства [3]. Идеи картирования массива впереди забоя до настоящего времени активного развития не получали, тогда как задачи опережающего прогноза потенциально-опасных элементов строения разрабатываемого пласта достаточно актуальны.

Технологии сейсмической локации для обзора массива горных пород в горизонтальной плоскости из забоя выработок давно и успешно развиваются на угольных месторождениях. При этом в качестве носителей информации предлагается использовать разные классы волн: каналовые, отраженные, дифрагированные [4-8].

Известны также зарубежные промышленные технологии, ориентированные на обнаружении субвертикальных сейсмических отражающих объектов различной природы впереди забоя при строительстве тоннелей. Все они основаны на идеях метода отражен-

ных волн [9, 10] с заявленной дальностью обзора 50-200 м, однако имеют ряд различий и недостатков. В частности, такие системы активной сейсмической локации нельзя применять в опасных по газу шахтах, т.к. они не предполагают наличие необходимых средств взрывозащиты. В России известна адаптированная для шахт технология сейсмоакустического прогноза впередишабойного массива, основанная на аппаратно-программном комплексе МИКОН-ГЕО (<https://eng.mikon-geo.ru/>). Однако на наш взгляд данная система остается «вещью в себе», т.к. из описания на официальном сайте или в отдельных публикациях [11] не удастся понять, какие принципы заложены в решение основных проблем, возникающих при возбуждении колебаний во внутренних точках среды. Как производится селекция отражений, пришедших из разных областей массива, как учитывается направленность источника колебаний, как происходит разделение волн по типам при обработке и какой принцип построения детальной скоростной модели среды.

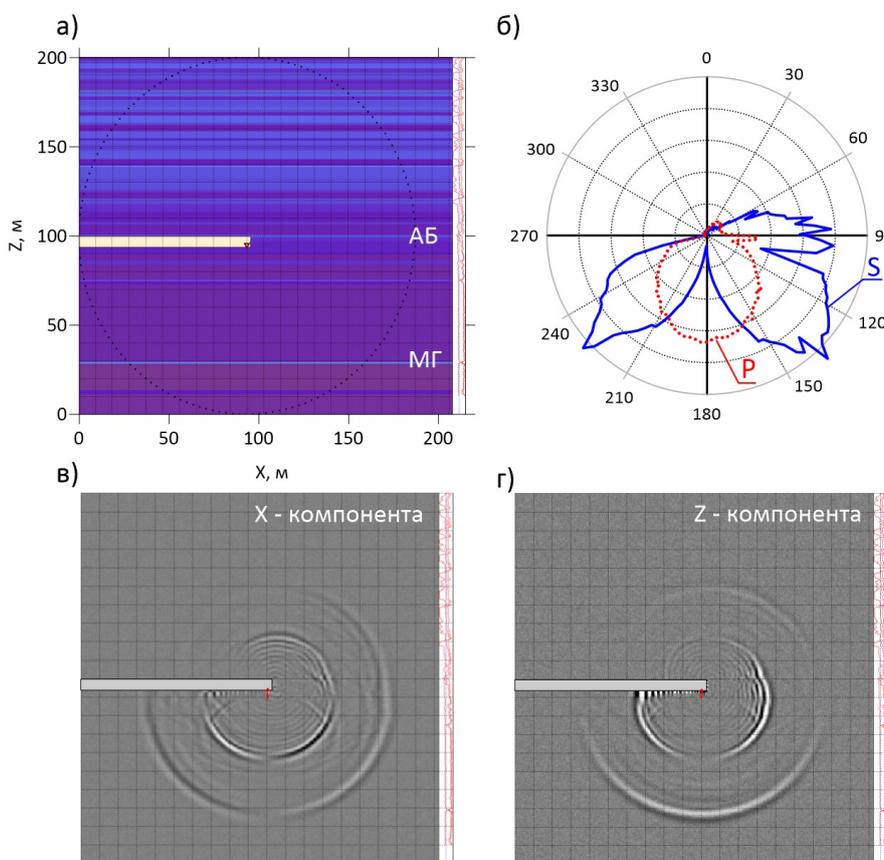


Рис. 1. Результаты математического моделирования волнового поля при воздействии вертикальной сосредоточенной силы на почве выработки в 1 м от груди забоя:
 а) – тонкослойная модель соляного разреза; б) – характеристика направленности источника;
 в, г) – одномоментные снимки компонент смещений частиц среды

Несомненно, что в горных выработках соляных рудников решение задачи локации сейсмически контрастных объектов впереди забоя необходимо искать на основе применения сейсмоакустических методов. Выбор методики наблюдений и типа изучаемых волн должен базироваться на всестороннем изучении поведения компонент волнового поля, генерируемого точечными ударными источниками колебаний. Моделирование направленности источников колебаний в зависимости от точки приложения силы на контуре выработки приведены нами в работе [12]. В случае оценки массива впереди забоя, наиболее оптимальным представляется использовать поперечные волны вертикальной поляризации. Как видно из рис. 1, при возбуждении колебаний вертикально в

почву выработки возле забоя, значительная часть энергии поперечных волн распространяется горизонтально – вдоль пласта, а основные лепестки Р- и S-волн направлены в нижнее нецелевое полупространство. Этот факт открывает перспективы для формирования пространственных систем наблюдений, позволяющих за счет направленного суммирования по способу общей глубинной точки производить селекцию отражений, пришедших из различных областей призабойного пространства.

Для отработки методики сейсмоакустического прогноза околозабойной зоны выбран специальный полигон с наличием известных горнотехнических объектов в разных азимутальных направлениях от забоя очистной камеры (рис. 2). Контролирующими целевыми объектами здесь выступали горные выработки, расположенные на одноименном уровне в пласте АБ.

Для формирования сейсмозаписей в идеологии методики многократных перекрытий реализована следующая система регистрации. Вертикальные сейсмоприёмники (GS-20DX) были установлены в почву в камере № 14 (правый ход), возбуждение колебаний осуществлялось в непосредственной близости возле каждого пункта приема (16 накоплений). Расстояние от груди забоя до первого ряда – 1,2 метра, расстояние между рядами – 1,0 метр, расстояние между линиями вдоль выработки – 0,5 метра. Регистрация производилась сейсмоакустической станцией IS-128 (Россия) с шагом квантования 100 мкс и количеством активных каналов для каждого пункта возбуждения – 96.

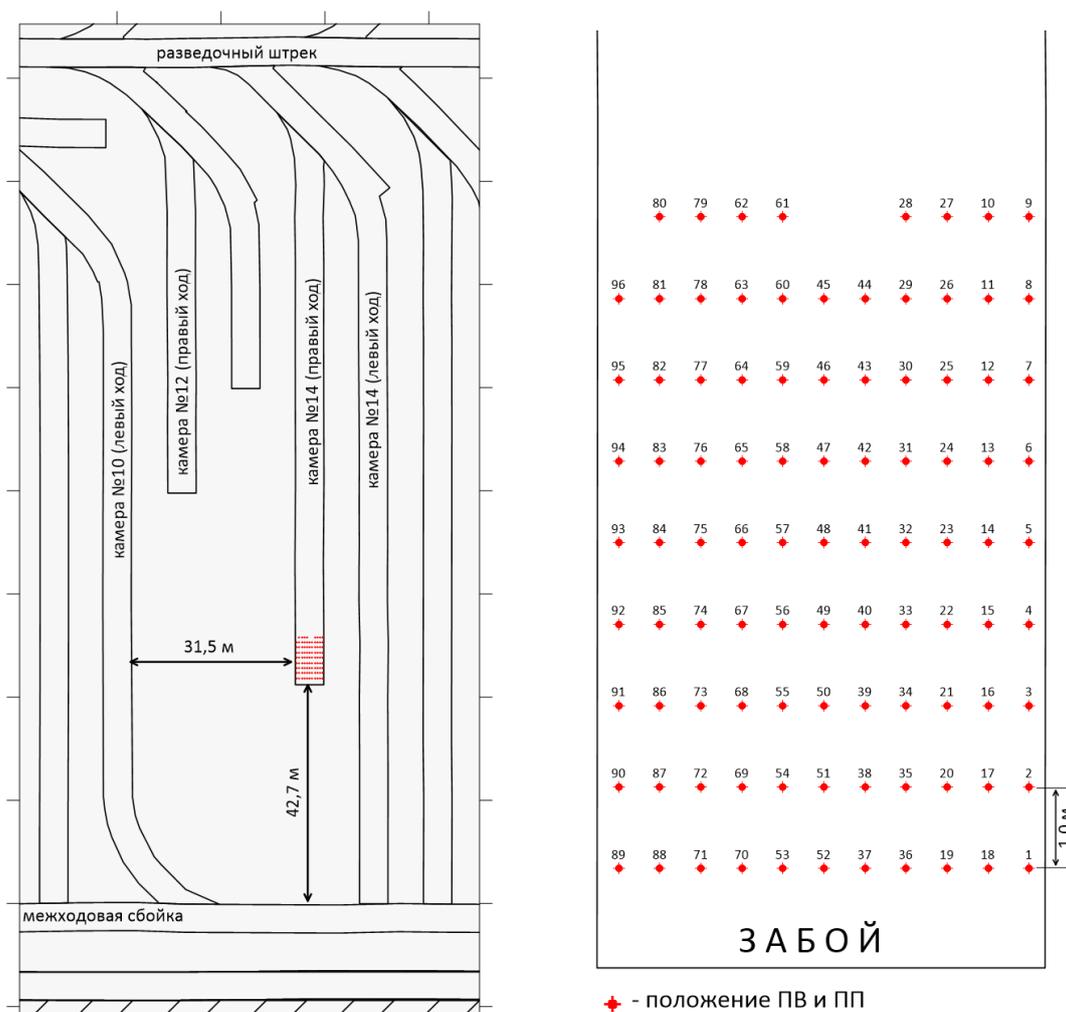


Рис. 2. Схема сейсморазведочных наблюдений в пределах экспериментального полигона (БКРУ-4, 2-3 ЮЗП, 6 восточный блок, пласт АБ, камера № 14 правый ход)

Анализ первичных сейсмограмм (рис. 3а) показал, что в волновых полях отражаются практически все целевые элементы массива, окружающего выработку. Для примера, на выборке трасс ОПВ1 для первого ряда ПП уверенно прослеживаются годографы целевых волн, по которым можно определить как эффективную скорость S-волны, так и положение отражателя относительно оси выработки. Скорость по годографу 1 составляет 2250 м/с и близка к скорости прямой волны, определяемой по годографу 0. Соответственно, отражающий элемент находится со стороны ПП, имеющего наименьшее время регистрации отраженной волны, и перпендикулярен линии пунктов приема, участвующих в данной выборке трасс. Если годограф (2) имеет практически бесконечную скорость, то отражающий объект находится строго впереди забоя, а его отражающая плоскость параллельна груди забоя. Годограф 3 имеет промежуточный наклон, а значит отражающая поверхность находится под некоторым углом к оси выработки.

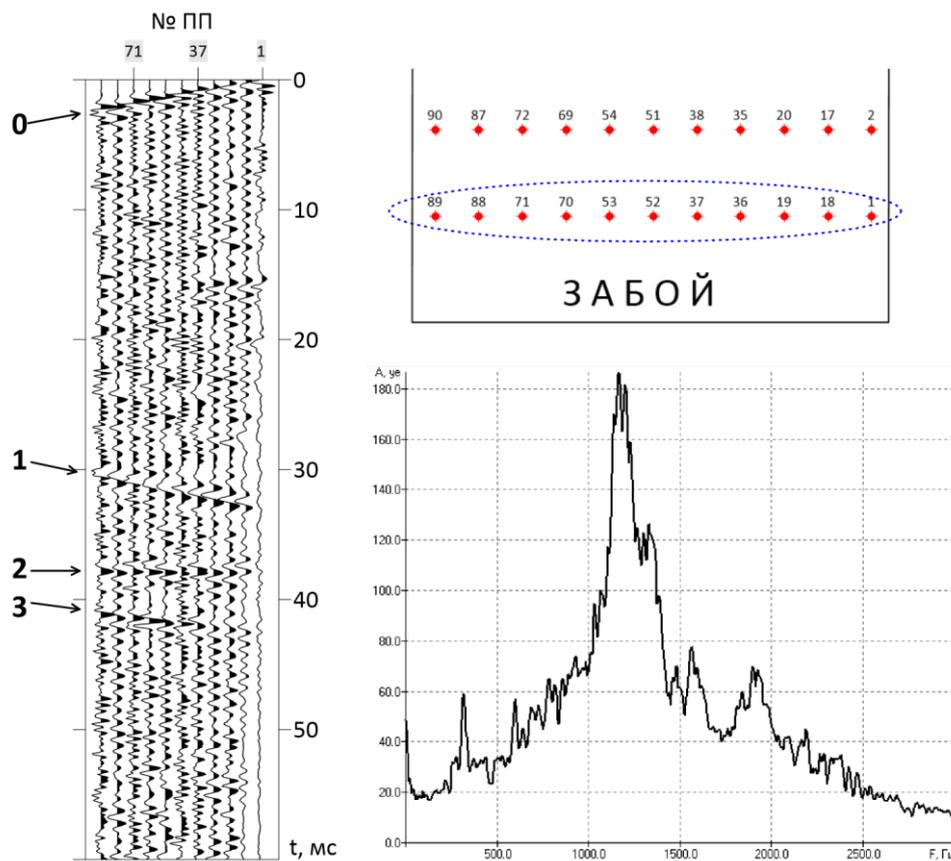


Рис. 3. Первичная полевая сейсмограмма ОПВ 1 (выборка трасс только первого ряда ПП) и амплитудный спектр целевого интервала (10-50 мс)

Суммирование выборок трасс по общей глубинной точке с установленным скоростным законом для S-волн (2250 м/с) позволяет усилить целевые отражения и подавить волны помехи нецелевых типов и классов. Даже при использовании небольшого количества трасс, например только для первого ряда ПП и ПВ (всего 121 трасса), в суммарном волновом поле удастся получить четкие коррелируемые отражения от удаленных контрольных объектов (рис. 4б). Исключение составляет самая ближайшая выработка (камера № 14, левый ход), которая в волновом поле практически не отображается, возможно, за счет деструктивной интерференции с отражениями из нижнего полупространства.

С учетом известной геометрии сейсмической расстановки существует возможность ввода соответствующих статических временных поправок во все (9216) зарегистрированные трассы с целью их приведения к единой линии наблюдений (в нашем случае линия первого от забоя ряда ПП). Это способствует не только большему накоплению целевого отраженного спереди сигнала в суммарном волновом поле (рис. 4в), но и подавлению волн, отраженных от не представляющих интереса областей околзабойного пространства (снизу, сбоку, сзади). Не подавленной остается ось синфазности от границы (поворот камеры № 10), расположенной под небольшим углом к оси выработки.

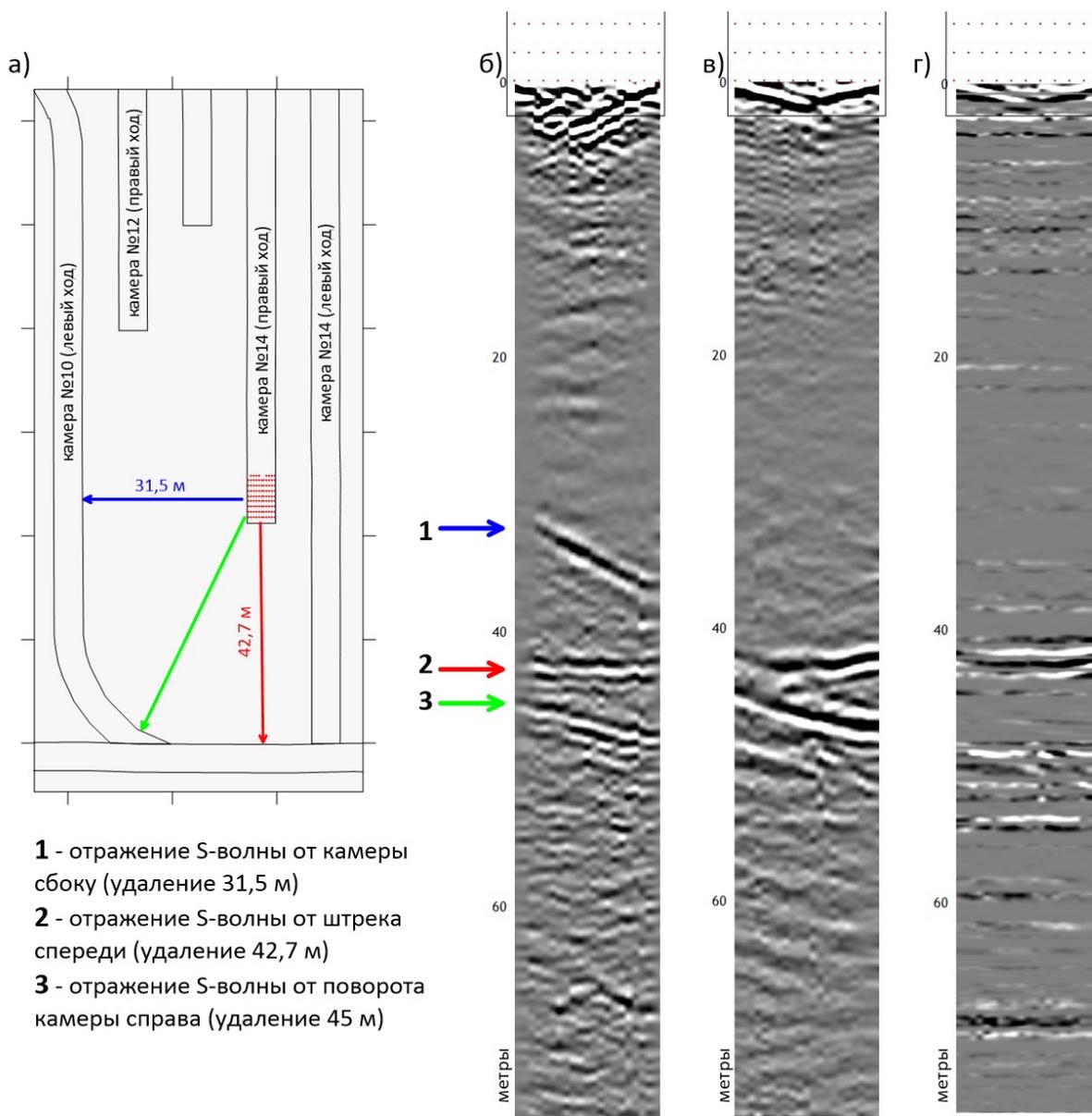


Рис. 4. Результаты обработки сейсмоакустических данных с выделением отражений от контролирующих объектов: а) отражатели на схеме наблюдений; б), в), г) результаты обработки

Данная проблема может быть решена с помощью применения процедуры когерентного усиления по суммарному временному разрезу. За счет умножения амплитуд сигнала на коэффициент когерентности, рассчитанный для всей совокупности трасс в скользящем временном окне постоянной ширины, происходит значительное подавление

ние негоризонтальных осей синфазности. В итоговом волновом поле (рис. 4г) остаются только горизонтальные оси синфазности, соответствующие отражениям от объектов, находящихся строго в конусе распространения волн вперед забоя. Такая же процедура может быть применена к волновым полям после пространственной трансформации для получения различных азимутов оси конуса обзора. В результате в волновых картинах будут проявлены только волны, однократно отраженные от плоскостей, расположенных нормально к оси конуса подсветки (рис. 5).

Представленные результаты позволяют сделать следующие основные выводы. Методика сейсмоакустической локация объектов вокруг забоя выработки базируется на использовании отраженных поперечных волн вертикальной поляризации. При возбуждении колебаний ударными источниками в почву выработки возле забоя значительная часть энергии поперечных волн сосредоточена в горизонтальном направлении и распространяется вдоль обрабатываемого пласта. Подавление нецелевых отражений от невертикальных отражателей обеспечивается за счет направленного суммирования трасс, зарегистрированных в рамках площадной расстановки по методике перекрывающихся наблюдений. Конус подсветки в конкретном азимутальном направлении будет определяться размерами зоны Френеля, зависящей от несущей частоты зарегистрированных колебаний и упругих характеристик окружающего массива.

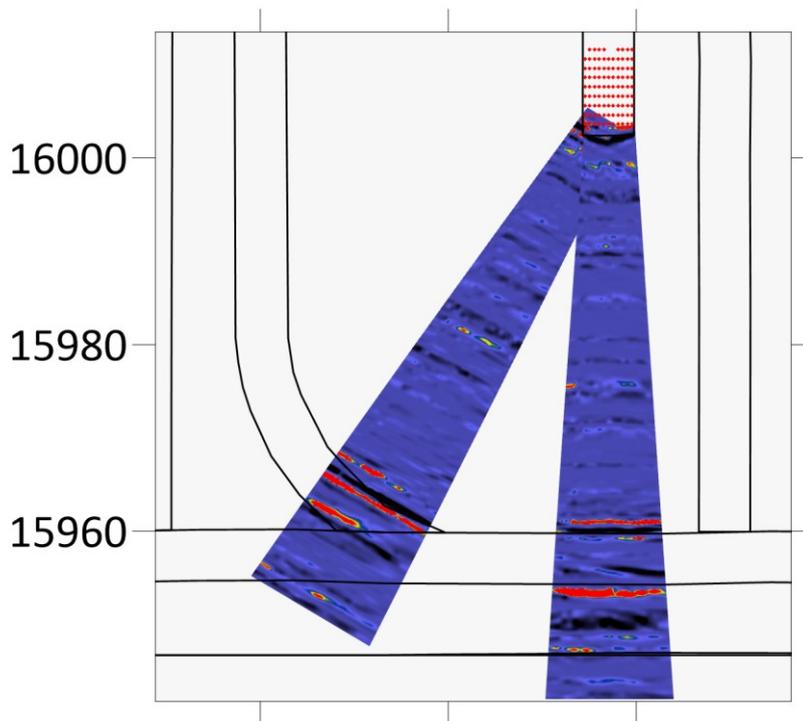


Рис. 5. Пространственное сопоставление горнотехнической обстановки впереди забоя и итоговых представлений волновых полей отраженных S-волн для разных азимутов

Основные перспективы развития предлагаемой методики связаны с разработкой программных алгоритмов на базе процедуры пространственной миграции Кирхгофа для всех возможных комбинаций «источник–приемник», позволяющей с минимальными временными затратами локализовать целевые объекты в любом направлении, находясь непосредственно в забое выработки.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабкин А.И. Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.16: защищена 21.11.01 / Бабкин Андрей Иванович. – Пермь, 2001. – 20 с.
2. Санфиоров И.А., Бабкин А.И., Ярославцев А.Г. Комплексные методические решения в шахтной сейсмоакустике // Геофизика. – 2014. – № 5. – С. 10-15.
3. Бабкин А.И. Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2010. – № 1. – С. 261-267.
4. Трифионов А.С., Тиркель М.Г., Туманов В.В., Архипенко А.И. Методические аспекты и технические особенности сейсмоакустической локации из забоя подготовительной выработки // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2008. – № 1. – С. 157-160.
5. 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.
6. Способ впередизабойной локации: Авт. св-во СССР 1824605: МПК G 01V 1/00. (2000.01) / Мясников Ю.Г., Трифионов А.С., Азаров Н.Я., Анциферов А.В., Тиркель М.Г.; патентообладатель Укр. фил. ВНИИ горн. Геомеханики и маркшейдерского дела. – № 5005940. заявл. 02.07.1991; опубл. 30.06.1993.
7. Анциферов А.В., Глухов А.А., Анциферов В.А. Шахтный сейсмический прогноз тектонических нарушений по отраженным волнам методом локации // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 6. – С. 131-139.
8. Анциферов А.В., Глухов А.А., Туманов В.В. О методе прогноза дизъюнктивов угольных пластов и приуроченных к ним зон скопления метана // Горное эхо. – 2023. – № 2 (91). – С. 35-42. – DOI: 10.7242/echo.2023.2.7.
9. Kneib G., Leykam A. Finite-difference modelling for tunnel seismology // Near Surface Geophysics. – 2004. – V. 2, 2. – P. 71-93. – DOI: 10.3997/1873-0604.2004005.
10. Otto R., Button E., Bretterebner H., Schwab P. The Application of TRT – True Reflection Tomography – at the Unterwald Tunnel // FELSBAU. – 2002. – V. 20, № 2. – P. 51-56.
11. Писецкий В.Б., Лапин С.Э., Зудилин А.Э., Патрушев Ю.В., Шнайдер И.В. Методика и результаты промышленного применения системы сейсмического контроля состояния горного массива «Микон-ГЕО» в процессе подземной разработки рудных и угольных месторождений // Проблемы недропользования. – 2016. – № 2. – С. 58-64.
12. Ярославцев А.Г., Тарантин М.В., Жикин А.А. Учет направленности источников сейсмических колебаний при решении горно-геологических задач // Горный журнал. – 2023 – № 11. – С. 37-42. – DOI: 10.17580/gzh.2023.11.06.

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.69

DOI:10.7242/echo.2024.1.13

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ ПОЖАРНОГО ТРУБОПРОВОДА ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА

С.А. Бублик, М.А. Семин, О.С. Паршаков, Д.В. Ольховский, А.В. Зайцев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В настоящей статье рассмотрены особенности математического моделирования переходных гидродинамических процессов в гидравлической сети пожарного трубопровода и системы водоотлива подземного рудника. Предложена модификация системы уравнений гидравлического удара, заключающаяся в учете дополнительных граничных условий, моделирующих различные объекты гидравлической сети, учете постепенного опустошения трубопровода в результате потребления воды работающей горной техникой.

Ключевые слова: рудник, пожарный трубопровод, математическое моделирование, гидравлический удар, водораспределение.

Эффективная эксплуатация системы водоснабжения подземных рудников имеет решающее значение для обеспечения производственной мощности добычи полезных ископаемых и безопасности труда горнорабочих. Неотъемлемым элементом эффективной эксплуатации таких систем является математическое моделирование, являющееся полезным инструментом, ускоряющим и упрощающим анализ и проектирование разветвленных сетей шахтных трубопроводов [1]. Однако динамический характер потока воды в системах трубопроводов подземных рудников создает дополнительные трудности при анализе и управлении переходными процессами при изменении параметров работы отдельных узлов системы (клапаны, резервуары, редукторы, потребители воды и пр.). Быстрое изменение параметров таких узлов может сопровождаться таким явлением, как гидравлический удар. Он характеризуется быстрыми колебаниями давления, возникающими в результате внезапных изменений скорости или направления потока, может привести к повреждению оборудования, сбою системы и угрозам безопасности, если его правильно не понять и не принять эффективные меры [2].

Последнее невозможно без проведения предварительного теоретического анализа с использованием таких моделей, которые с достаточной степенью детализации способны воспроизвести картину распределения основных гидродинамических характеристик потока как при стационарных, так и при переходных режимах работы систем трубопроводов подземных рудников. Одной из таких моделей являются классические уравнения гидравлического удара [2, 3], которые обеспечивают основу для прогнозирования переходных процессов давления и динамики потока в сети трубопроводов. Оно включает в себя уравнения неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

и движения

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\lambda v |v|}{2d} = 0, \quad (2)$$

где p – статическое давление, Па; t – время, с; v – средняя продольная скорость воды в трубопроводе, м/с; x – пространственная координата вдоль оси трубопровода, м; ρ – плотность воды, кг/м³; c – скорость звука в воде, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; z – перепад высот, м; λ – гидравлический коэффициент трения; d – диаметр трубопровода, м.

Гидравлический коэффициент трения рассчитывается по следующей методике [4]. В относительно гладких трубах при низких числах Рейнольдса ($Re < \frac{10d}{\Delta}$) величина λ определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (3)$$

В переходной области, соответствующей числам Рейнольдса $\frac{10d}{\Delta} \leq Re < \frac{560d}{\Delta}$, расчет λ производится по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (4)$$

В области высоких чисел Рейнольдса ($Re \geq \frac{560d}{\Delta}$), для которой справедлив квадратичный закон гидравлического сопротивления, гидравлический коэффициент трения вычисляется по формуле Шифринсона:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Здесь Δ – эквивалентная шероховатость, которая чаще всего представляет собой среднюю высоту неровностей на внутренней поверхности трубы, м. Число Рейнольдса Re , используемое для определения закона течения и величины коэффициента трения, определяется по формуле:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}, \quad (6)$$

где μ – динамическая вязкость воды, Па·с.

При расчете λ рассматривались только сопротивления трения прямых участков трубопроводов, в то время как местные сопротивления не учитывались.

Уравнения (1)-(6) используются для определения характеристик потока в отдельных трубах, в то время как для корректной состыковки гидродинамических параметров в узловых соединениях между трубами используются дополнительные граничные условия. Всего нами выделяется шесть видов граничных условий: соединения труб, насос, резервуар, потребитель, вентиль, редуциционный клапан. Для каждого из них записываются соответствующие уравнения. Например, при моделировании соединения труб предполагается равенство входящего и исходящего расхода воды, а также равенство давлений в узле, где соединяются трубы. При моделировании насоса предполагается, что входящий в насос расход равен исходящему, а давление p испытывает скачок, определяемый напорной характеристикой $\Delta p = f(v)$.

Объект резервуар является более сложным, так как здесь предполагается, что статическое давление водяного потока на выходящей из резервуара ветви трубопровода зависит от уровня воды h (м) в резервуаре (см. рис. 1а) по некоторому линейному закону

$$p = \rho g h(t). \quad (7)$$

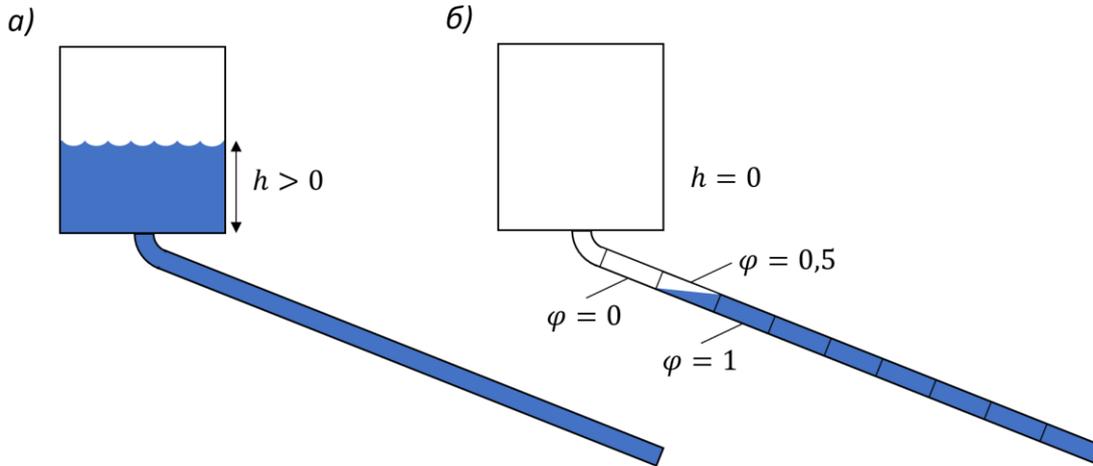


Рис. 1. Ненулевой уровень воды в резервуаре (а) и постепенное опустошение трубопровода при отсутствии воды в резервуаре (б)

Зависящая от времени величина $h(t)$ определяется разницей притока Q_+ и оттока Q_- ($\text{м}^3/\text{с}$) воды из резервуара:

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{S} (Q_+ - Q_-). \quad (8)$$

В случае отсутствия фактических данных о наполненности резервуара более правильным будет представить резервуар в виде трубопровода, через который вода подается в рудник: в этом случае граничное условие упрощается до задания постоянного во времени давления на верхнем конце трубопровода.

В случае, когда резервуар опустошен (т.е. $h = 0$, а его пространство заполнено воздухом), в исходящие из резервуара трубопроводы вместо воды начинает поступать воздушный поток. Классические уравнения (1)-(2) неприменимы для описания течения в таких трубопроводах, частично заполненных водой. А потому для решения этой проблемы модель гидравлического удара была модифицирована и дополнена уравнением переноса объемного содержания воды

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + v \frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0. \quad (9)$$

Здесь φ – объемное содержание воды, $\text{м}^3/\text{м}^3$. Оно принимает значения в диапазоне от 0 до 1. Причем единица соответствует ситуации, когда рассматриваемый малый сегмент трубопровода полностью занят водой, а ноль – ситуации, когда он полностью занят воздухом (см. рис. 1б). Также в рамках данной модели учитываются ситуации, когда трубопровод частично занят водой.

Распределение $\varphi(x)$ оказывает непосредственное влияние на гидродинамические характеристики воды, ранее определявшиеся из решения уравнений (1)-(2). В случае, если в рассматриваемом малом объеме $dV = \frac{\pi d^2}{4} dx$ трубопровода $\varphi < \varphi_{cr}$, трубопровод считается незаполненным, давление принимается равным атмосферному, а уравнения (1)-(2) для этого малого сегмента не решаются. В противном случае при соблюдении условия $\varphi \geq \varphi_{cr}$ характеристики потока в сегменте dV находятся с использованием уравнений (1)-(2). Величина φ_{cr} представляет собой некоторое критическое объемное содержание воды.

Наряду с расчетом основных гидродинамических характеристик потока в уравнениях гидравлического удара важно учитывать распределение поля температур в системе трубопроводов подземных рудников. При использовании систем охлаждения и орошения воздуха важно заранее знать температуру воды, которая будет подана к конечным потребителям (теплообменным аппаратам, испарителям и пр.). Для этой цели математическая модель (1)-(9) также дополняется уравнением переноса теплоты в виде:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k}{\rho c} (T_* - T). \quad (10)$$

Здесь T – температура воды в трубопроводе, °С; c – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С); k – коэффициент теплопередачи через стенку трубопровода, Вт/(м²·°С); T_* – температура воздуха в горной выработке, через которую проложен трубопровод, °С.

Уравнения (9) и (10) дополняются граничными условиями в узловых участках. Для большинства типов узловых соединений принимаются условия постоянства потока величин φ и T . Для соединения трех и более трубопроводов условие немного сложнее. В нем расчет значений температуры T на соединении происходит путем вычисления взвешенного среднего по всем входящим в соединение потокам воды. В качестве веса принимается объемный расход воды Q . Аналогичный подход использовался в [5]. Рассчитанные для каждого соединения значения температуры T задаются в качестве входных граничных условий для трубопроводов, в которые вода втекает из рассматриваемого соединения труб. По объемному содержанию воды φ расчет происходит немного иначе.

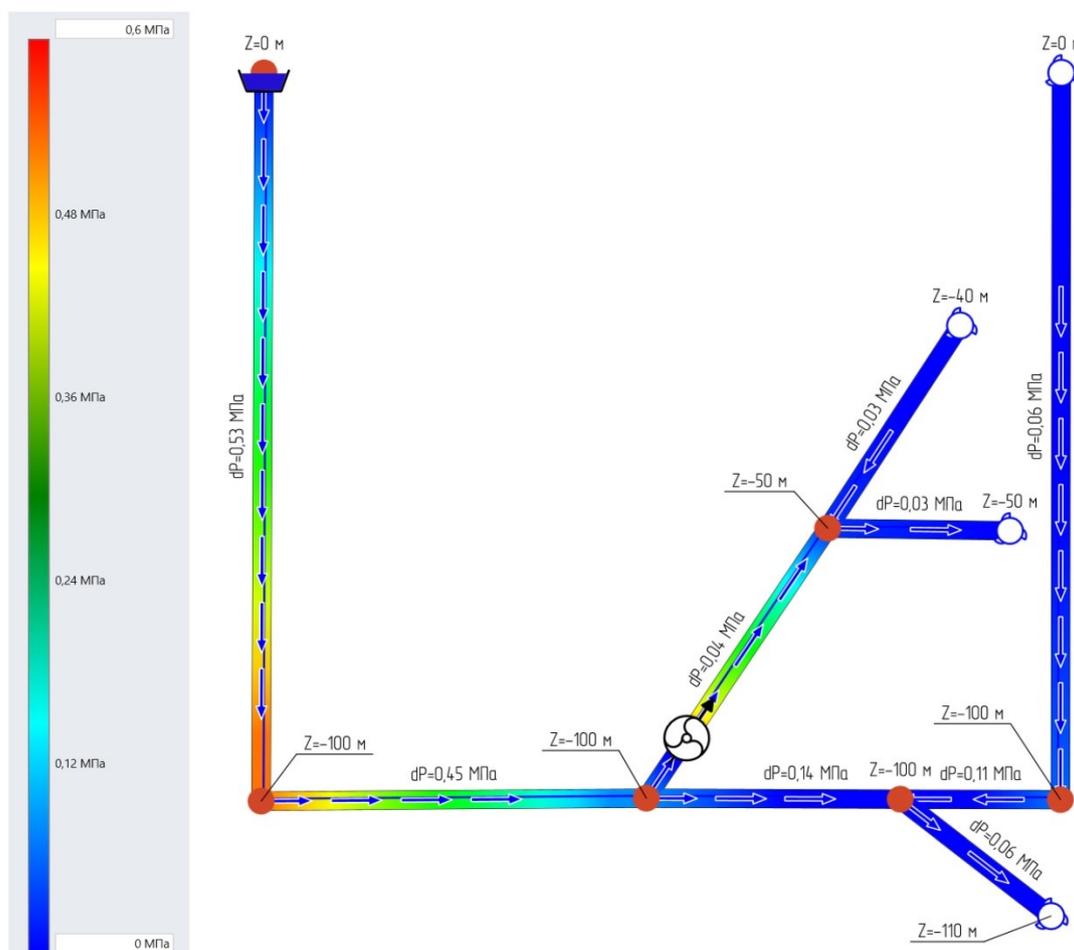


Рис. 2. Распределение давлений воды в системе трубопроводов

Численная реализация системы уравнений (1)-(2) осуществлялась с использованием метода характеристик [6]. Численная реализация системы уравнений (9) и (10) осуществлялась с помощью метода конечных разностей. Программный код написан в среде Visual Studio на языке С# и реализован в качестве отдельного расчетного модуля в аналитическом комплексе «Аэросеть». На рис. 2 представлено рассчитанное в Аэросети распределение давления воды в системе трубопроводов для модельного рудника с двумя стволами и одним подземным горизонтом.

Помимо цветовой шкалы, отражающей величину давления, индикаторами показаны перепады давления воды в трубопроводе, направления течения потока, потребители воды и их высотные отметки. Из рис. 2 видно, что давление воды при прохождении ее через насос возрастает, в результате этого увеличивается и в дальнейшем поддерживается постоянный расход воды на участке трубопровода, идущего до отметки -50 м. При этом трубопровод, конечной участок которого расположен на отметке -40 м, с течением времени опустошается, как и трубопровод правого ствола модельного рудника, потому прирост давления на нижних сопряжениях этих трубопроводов постоянно уменьшается до момента их полного опустошения. Распределение объемного содержания воды представлено на рис. 3.

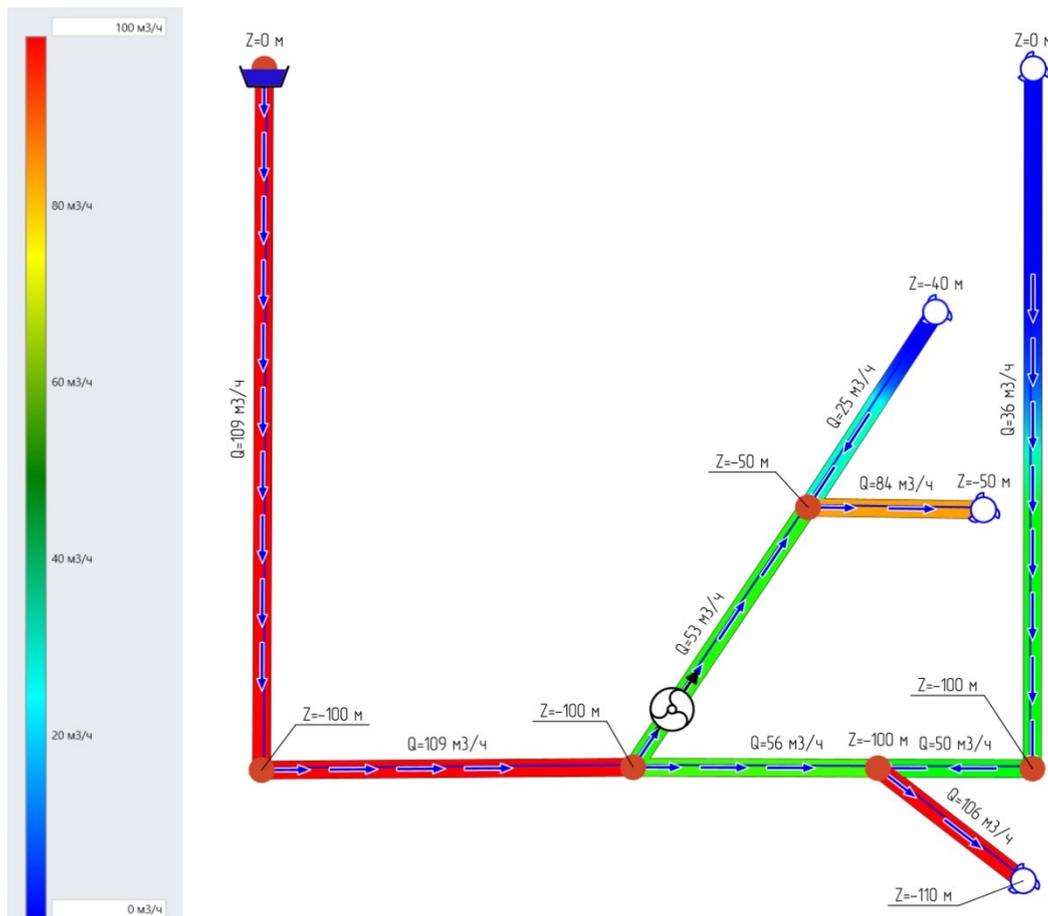


Рис. 3. Распределение объемного содержания воды в системе трубопроводов

Представленный расчет соответствует отдельно взятому моменту времени. В целом картина является нестационарной, так как происходит постепенное опустошение трубопроводов. Следует отметить, что помимо опустошения/наполнения трубопроводов дополнительно на нестационарность гидравлического расчета влияет переменный характер потребления воды и работы насосов.

Таким образом, на основе разработанной модели появляется возможность анализа процессов нестационарного массопереноса, происходящих в шахтных системах водоснабжения и водоотлива рудников, с учетом произвольной топологии и состояния сети трубопроводов, влияния запорно-регулирующих устройств, а также изменения параметров водопотребления. При этом многопараметрическое моделирование гидравлических процессов позволит повысить качество разработки технических решений при проектировании шахтных систем трубопроводов, являющихся неотъемлемой частью технологии и безопасности ведения горных работ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ
в рамках государственного задания
(проекты № 122030100425-6 и № 124020500030-7).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калинин Н.Б., Калинина М.Н. К вопросу о формировании рациональных требований к программно-аварийно-вентиляционному комплексу (для мониторинга, текущего и перспективного моделирования состояния технологических сетей шахт) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – №. 6. – С. 70-73.
2. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. – М.: Энергоиздат, 1981. – 247 с.: ил.
3. Sam Ani H.M.V., Khayatzaheh A. Transient flow in pipe networks // Journal of Hydraulic Research. – 2002. – V. 40, №. 5. – С. 637-644. – DOI: 10.1080/00221680209499908.
4. Раинкина Л.Н. Определение коэффициента гидравлического трения: метод. указания к выполнению лаб. работы / УГТУ. – Ухта, 2000. – 25 с.
5. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 154-161.
6. Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 101-109.

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2024.1.14

ГАЗОНОСНОСТЬ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛЯНОГО ПОРОДНОГО МАССИВА I КАЛИЙНОГО ГОРИЗОНТА ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ В УСЛОВИЯХ РУДНИКА I РУ ОАО «БЕЛАРУСЬКАЛИЙ»

Н.А. Литвиновская
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В статье представлены подробные результаты исследования газоносности и газодинамических характеристик свободного газа соляных пород I калийного горизонта при подработке и надработке горными выработками в различных горнотехнических ситуациях.

Ключевые слова: газоносность, свободные газы, газодинамические характеристики, подработка, надработка, сильвинит, каменная соль, I калийный горизонт.

Введение

Истощение рудной базы I РУ ПАО «Беларускалий» привело к необходимости отработки верхнего сильвинитового пласта I калийного горизонта (рис. 1).

Пласты	Слой	Литология	Мощность, м	Химический состав, %			
				KCl	NaCl	MgCl ₂	H ₂ O
			1,14	3,37	97,02	0,08	6,92
			0,24	4,13	84,5	0,12	5,34
Верхний сильвинитовый пласт	5		0,28	41,52	56,12	0,04	1,16
	4-5		0,473	8,56	78,94	0,16	2,69
	4		0,645	19,68	16,23	0,08	2,67
	3-4		0,20	7,77	87,80	0,08	2,71
3		0,34	41,1	54,4	0,13	2,99	
Средний глинисто-галитовый пласт	2-3		0,665	6,99	84,55	0,15	5,69
Нижний сильвинитовый пласт	2		0,15	38,94	53,79	0,12	4,92
	1-2		0,235	1,47	90,73	0,07	6,04
1		0,63	44,91	49,93	0,08	3,60	
			0,715	1,11	87,75	0,17	7,64

Рис. 1. Геологическое строение I калийного горизонта на шахтном поле 1 РУ

При этом практически сразу же при проведении вскрывающих выработок по породам I калийного горизонта столкнулись с внезапными разрушениями пород почвы, сопровождающимися газовыделениями [1-3]. При изучении этого явления было установлено, что оно имеет техногенную природу. Очаги газодинамических явлений сформировались вследствие неравномерной подработки I калийного горизонта горными работами на II и III калийных горизонтах. Помимо этого, в ходе исследования были установлены наиболее газоносные слои пород и зоны, опасные по газодинамическим явлениям из пород почвы горных выработок [2-4]. Так наиболее газоносными оказались глинистый слой в Среднем глинисто-галитовом пласте, мощный глинистый слой в Нижнем калийном пласте и глинистый слой в подстилающей каменной соли. Давления свободного газа в очагах ГДЯ, сформированных в этих слоях, было достаточно для развития газодинамического явления при расположении кровли подготовительных выработок даже на 0,2 м выше кровли 5-го сильвинитового слоя.

На данный момент запасы Верхнего калийного пласта отработаны, и на предприятии принято решение вовлекать в отработку запасы Нижнего калийного пласта. Для этого подготовительные горные выработки проходятся по Среднему глинисто-галитовому и Нижнему калийному пластам. Привязка кровли подготовительных выработок в слое 2-3. Междупластье между подготовительными выработками и газоносным глинистым прослоем в подстилающей каменной соли составило всего 1,3 м.

При этом выработки проводятся в породах как подработанных горными работами на II и III калийных горизонтах, так и надработанных горными работами на Верхнем калийном пласте. Следует заметить, что опережающая надработка пластов является эффективным региональным методом предотвращения ГДЯ [5, 6]. Однако горнотехническая ситуация, которая сложилась на I калийном горизонте при двойном техногенном воздействии (подработке Вторым и Третьим калийными пластами и надработке Верхним сильвинитовым пластом I калийного горизонта) до настоящего времени не имеет аналогов при отработке калийных пластов и вопрос газодинамической опасности пород почвы горных выработок остается открытым. Следует также отметить, что эффект надработки в слоистых соляных породах имеет свои специфические особенности, обусловленные практически нулевой газопроницаемостью соляных пород нормально к напластованию [7-12]. В связи с этим возникла необходимость дополнительных исследований газоносности и газодинамических характеристик пород почвы проводимых подготовительных горных выработок при подготовке к отработке Нижнего сильвинитового пласта I калийного горизонта.

Методика проведения исследований

Выработки северного направления пройдены в породах, надработанных лавой № 15 (рис. 2). Лава № 15 отработывала запасы верхнего сильвинитового слоя I калийного горизонта. Мощность междупластья составляет 1,2 м.

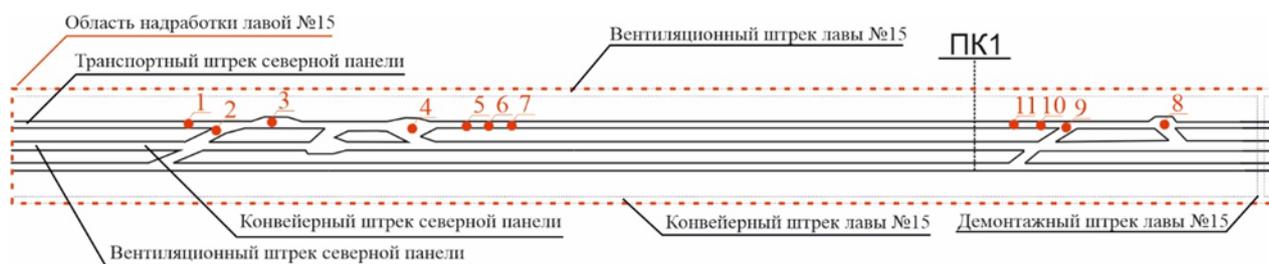


Рис. 2. Расположение исследовательских шпуров и скважин в транспортном штреке северного направления

Исследовательские шпур и скважины бурились в породы почвы транспортного штрека северной панели. Шпур и скважины № 1, 5, 6, 7, 10 и 11 пробурены в выработке шириной 3,0 м. Исследовательские скважины № 2, 3, 4, 8, 9, пробурены в выработке шириной от 4,5 м до 13 м с целью исследования влияния величины пролета выработки на возможность формирования приконтактных скоплений свободного газа в породах почвы.

Группа исследовательских шпуров и скважин № 1-7 бурилась практически по центру выработанного пространства лавы № 15 для исследования влияния надрабтки на газоносность и газодинамические характеристики надрабтанных пород почвы.

Группа шпуров и скважин № 8-11 бурилась вблизи границы зоны надрабтки горными работами на Верхнем сильвинитовом пласте и целика у демонтированного штрека лавы № 15 для исследования влияния на газоносность границ целик-лава. Таким образом, исследования проведены в различных горнотехнических условиях надрабтки. Всего было выполнено более 80 измерений.

Результаты исследований

Различные условия надрабтки не оказали существенного влияния на величину газоносности и газодинамических характеристик. Граница целик-лава не является более опасной по газодинамическим явлениям из пород почвы подготовительных горных выработок. Величина пролета выработки оказалась более значимым фактором, чем граница фронта остановки горных работ. Результаты исследований газоносности и газодинамических характеристик приведены в таблице.

Таблица

Результаты исследования газоносности и газодинамических характеристик пород почвы подготовительных выработок I калийного горизонта в условиях подрабтки и надрабтки

Глубина скважины, м	Пролет 3,0 м			Пролет более 3,0 м		
	Газоносность, м ³ /м ³	Давление, МПа	Нач. ск. газовыделения, л/мин	Газоносность, м ³ /м ³	Давление, МПа	Нач. ск. газовыделения, л/мин
0,5-1,0	0,17	0,191	0,15	0,13	0,190	0,04
1,0-1,5	0,13	0,190	0,08	0,13	0,190	0,05
1,5-2,0	0,18	0,191	0,13	0,12	0,190	0,04
2,0-2,5	0,14	0,190	0,09	0,13	0,190	0,07
2,5-3,0	0,15	0,190	0,11	0,14	0,190	0,07
3,0-3,5	0,13	0,190	0,08	0,14	0,190	0,09
3,5-4,0	0,17	0,190	0,13	0,67	0,197	0,35
4,0-4,5	0,13	0,190	0,13	0,52	0,207	0,63
4,5-5,0	0,33	0,193	0,35	3,42	0,275	4,34

Следует отметить, что в скважине № 3 на глубине 4,5-5,0 м произошло интенсивное газовыделение, не позволившее провести исследование газоносности и газодинамических характеристик, в таблице приведены результаты без этих данных.

Как видно из таблицы, до глубины 3,5 м от почвы подготовительной горной выработки существенных значений газоносности и газодинамических характеристик не наблюдается вне зависимости от пролета выработки. По всей видимости, до 3,5 м наблюдается защитный эффект надработки.

При пролете выработки 3,0 м почти на всех глубинах исследований значения газоносности и газодинамических характеристик остаются фоновыми. Лишь на глубине 4,5-5,0 м отмечено некоторое, но не существенное увеличение показателей газоносности, давления свободного газа и начальной скорости газовыделения. В тоже время на сопряжениях выработок и в местах расширений, где пролет превышает 3,0 м, на глубине 3,5 м и более показатели газоносности и газодинамических характеристик существенные, достигающие максимальных значений на глубине 4,5-5,0 м. Видимо на этих глубинах эффект от надработки сказывается меньше и практически полностью нивелируется эффектом разгрузки и последующих расслоений по глинистым слоям и прослойкам пород почвы при проведении широких выработок (сопряжений и технологических расширений). В этом случае приконтактный свободный газ скапливается в раскрывшихся расслоениях под подготовительными выработками с пролетом более 3,0 м.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Газоносность и газодинамические характеристики верхней части пород почвы, включающей два слоя глины, ранее считавшихся опасными по газодинамическим явлениям из почвы подготовительных горных выработок, незначительны. По всей видимости, надработка лавами способствует расслоению пород и снижению давления свободного газа.
2. Максимальные значения газоносности и газодинамических характеристик характерны для контакта с глинистым слоем, залегающим в 5 м от почвы подготовительных горных выработок северной панели. По всей видимости, влияние надработки на этой глубине уже не сказывается.
3. Пролет выработки оказывает существенное влияние на газоносность и газодинамические характеристики пород почвы I калийного горизонта. В местах сопряжения двух выработок, камерах разворота создаются условия для миграции свободного газа по расслоившимся контактам к центру сопряжений выработок. При этом в камерах разворота, где пролет выработки составляет около 13 м, из исследовательских скважин наблюдались интенсивные газовыделения с начальной скоростью более 25 л/мин.
4. Надработка Верхним силвинитовым пластом I калийного горизонта Нижнего силвинитового пласта в целом оказывает защитное воздействие на породы почвы подготовительных горных выработок. Однако при этом в надработанных породах почвы горных выработок на сопряжениях, технологических расширениях и в камерах разворота в породах почвы на глубине 4,5 м и более формируются приконтактные скопления свободных газов, обусловленные миграцией свободных газов из окружающего массива в образующиеся расслоения по глинистым слоям и прослойкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Береснев С.П., Сенюк В.В., Гончар В.И., Андрейко С.С., Литвиновская Н.А. Исследование механизма формирования опасных по газодинамическим явлениям зон в породах калийного горизонта // Горн. журн. – 2010. – № 8. – С.31-33.
2. Андрейко С.С., Иванов О.В., Литвиновская Н.А. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений из почвы при проходке подготовительных выработок в подработанном массиве соляных пород. – Пермь: изд-во ПНИПУ, 2015. – 159 с.

3. Литвиновская Н.А. Определение параметров мелкошпурового и глубокого профилактического бурения дегазационных шпуров в почву подготовительных горных выработок I калийного горизонта Старобинского месторождения // Вестн. ПНИПУ: Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2011. – № 1. – С. 128-135.
4. Литвиновская Н.А. Прогноз и предотвращение газодинамических явлений из почвы подготовительных горных выработок в условиях подработки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № 4. – С. 180-185.
5. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман А.А. Теория защитных пластов. – М.: Недра, 1976. – 223 с. ил.
6. Южанин И.А., Коптиков В.П., Евдокимова В.П. Решение задач защитной разработки пластов методами математической статистики // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 1. – С. 332-335.
7. Некрасов С.В. Геомеханический анализ состояния пород почвы с газовым очагом в выработанном пространстве длинного очистного забоя / Некрасов С.В. // Проблемы комплексного мониторинга на месторождениях полезных ископаемых: сб. докл.: материалы науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2001 г. – Пермь, 2002. – С. 175-177.
8. Некрасов С.В. Трехмерный геомеханический анализ пород почвы длинного очистного забоя на основе непрямого метода граничных элементов // Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов: материалы междунар. конф. и науч. сес. ГИ УрО РАН. – Пермь, 2003. – С. 228-231.
9. Некрасов С.В. Математическое моделирование геомеханических процессов при наработке лавами выбросоопасного 12 глинисто-мергелистого горизонта в условиях Старобинского месторождения калийных солей / С.В. Некрасов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2003 г. – Пермь, 2004. – С. 266-269.
10. Андрейко С.С., Некрасов С.В. Математическое моделирование геомеханических процессов при слоевой отработке лавами в условиях Старобинского месторождения // Горное Эхо. – 2005. – № 1 (19). – С. 10-16.
11. Некрасов С.В. Геомеханическое обоснование механизма газодинамических разрушений пород почвы сопряжения лава-штрек в рудниках Старобинского месторождения / С.В. Некрасов // Проблемы рудничной аэрологии и безопасной разработки месторождений полезных ископаемых: сб. докл. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию профессора И.И. Медведева / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2004. – С. 56-59.
12. Андрейко С.С., Некрасов С.В. Трехмерный геомеханический анализ условий развития газодинамических явлений из почвы сопряжения лава-штрек в рудниках Старобинского месторождения на основе непрямого метода граничных элементов // Геомеханика в горном деле: докл. междунар. конф. / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург, 2005. – С. 320-327.

УДК 622.363.2

DOI:10.7242/echo.2024.1.15

АНАЛИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН С ПОВЕРХНОСТИ НА ВЕРХНЕКАМСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

Т.А. Лялина

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: в процессе выполненных работ проведён анализ геологических условий газопроявлений при бурении геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении, проведена оценка содержания KCl и $MgCl_2$ для каждого зафиксированного газовыделения по каждому пласту. Большинство газовыделений, а именно 381 из 410, произошли из пластов сильвинито-карналлитовой зоны смешанного состава. Так, 351 газовыделение произошло при $0,78 \leq KCl/MgCl_2 \leq 1,3$ и 30 при $1,38 \leq KCl/MgCl_2 \leq 4$. Остальные 29 произошли для $KCl/MgCl_2 \geq 7,8$. Для сильвинитовой зоны газовыделения наблюдались в пласте Б смешанного и сильвинитового составов для $KCl/MgCl_2 \geq 0,7$. Была построена гистограмма распределения количества газовыделений из поверхностных скважин в зависимости от отношения $KCl/MgCl_2$ для сильвинито-карналлитовой зоны пластов смешанного состава. Количество газовыделений

равномерно убывает при переходе пластов от смешенного в сильвинитовый состав, достигая своего максимума на промежутке $0,8 \leq \text{KCl/MgCl}_2 \leq 1$.

Ключевые слова: газовыделения, геологоразведочные скважины, нефтяные месторождения, нефтеперспективные структуры, газодинамические явления, зоны замещения.

При бурении геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении калийных солей через сильвинито-карналлитовую и сильвинитовую зоны выделяются горючие и ядовитые газы, иногда происходят газодинамические явления [1].

Для решения данной задачи необходимо разработать метод прогноза зон, опасных по интенсивным газовыделениям и газодинамическим явлениям, при бурении геологоразведочных скважин с поверхности на площади Верхнекамского месторождения калийных солей. Для этого необходимо провести анализ геологических условий газовыделений и газодинамических явлений при бурении геологоразведочных скважин на площади Верхнекамском месторождении калийных солей, результаты которого представлены в данной работе.

Первые газовыделения на Верхнекамском месторождении при бурении скважин произошли в 1925 г. Газовыделения, происходящие при вскрытии солей скважинами, бывают разными [2]. Редко слышен шум в скважине и единственно вспенивание промывочной жидкости. В отдельных случаях они осуществляется стремительно, отмечаются выбросами раствора и шлама из скважин на расстояние до нескольких метров в высоту и становятся источником пожара в буровом помещении и на вышке.

Для установления вида газовыделений и газодинамических явлений при бурении геологоразведочных скважин с поверхности создана соответствующая классификация. Все газовыделения и газодинамические явления из геологоразведочных скважин делятся на три вида: суффлярные газовыделения, выбросы газа, выбросы газа и породной мелочи. Деление осуществляется по условиям протекания и результатам закончившегося процесса [3].

Для оценки литологических свойств пластов, из которых происходили газовыделения при бурении скважин с поверхности, вначале была получена диаграмма распределения газовыделений и газодинамических явлений по пластам [4]. Анализ диаграммы демонстрирует, что наибольшая часть газовыделений произошла из мощных пластов карналлитовой зоны. Так, из пласта Е произошло 91, Г – 86, Д – 85 и В – 76 газовыделений.

Одновременно с этим на сегодня не известно воздействие нижележащих месторождений нефти и нефтеперспективных структур на формирование газовыделений и ГДЯ в соляной толще. Ранее было обнаружено, что количество скважин с газовыделениями и газодинамическими явлениями постепенно уменьшается в зависимости от расстояния до нефтяного месторождения [2]. Также установлено, что тяжелые углеводороды C_2H_6 , C_3H_8 и C_4H_{10} не могли образоваться в соляной толще, они могли только мигрировать [5]. Анализ распределения тяжёлых углеводородов в соляной толще показывает, что тяжёлые углеводороды распространены вдоль контуров нефтяных месторождений и нефтеперспективных структур и в пределах полуторакилометровой зоны вокруг них, что может свидетельствовать о миграции их с водными растворами с нижележащих нефтяных месторождений и структур [6, 7].

Анализ геологических условий протекания газовыделений и газодинамических явлений при бурении скважин показал, что газовыделения из скважин часто связаны с зонами замещений. Кроме того, зоны замещения по пластам в плане тяготеют к склону рифа [8]. Это связано с высокой вероятностью образования трещин в соляной толще над склоном рифа [9, 10].

Надари Михайлович Джиноридзе выделял три типа зон замещения: экранированный, открытый и сквозной [11]. Экранированный тип характеризуется тем, что над зо-

ной галитизации промышленных пластов залегает один или несколько пластов сильвинит-карналлитовой зоны, сильвинитового состава. Большинство изученных зон замещения этого типа. Для открытого типа характерно, что все пласты сильвинит-карналлитовой зоны, расположенные над зоной галитизации промышленных пластов, сильвинитового состава. Для сквозного типа характерна галитизация всех пластов сильвинитовой и сильвинит-карналлитовой зон. Газовыделения и газодинамические явления из скважин имеют место быть на всей площади экранированных зон и на периферии открытых и сквозных зон замещения [12]. Отсюда вытекает необходимость исследовать приуроченность к контурам зон замещения меняющийся химический состав пород.

Для каждого зафиксированного газовыделения по каждому пласту проводилась оценка содержания KCl и $MgCl_2$. Оценка проводилась с разделением пластов по литологии на пласты смешанного состава, смешанного состава, преимущественно сильвинитового состава и сильвинитовые пласты [13]. Гистограмма распределения количества газовыделений из поверхностных скважин в зависимости от отношения $KCl/MgCl_2$ для сильвинито-карналлитовой зоны пластов смешанного состава представлена на рис. 1.

Анализ результатов показывает, что большинство газовыделений произошли из пластов смешанного состава. Так, из пластов сильвинит-карналлитовой зоны смешанного состава произошло 381 газовыделение, из них 351 при $0,78 \leq KCl/MgCl_2 \leq 1,3$ и 30 при $1,38 \leq KCl/MgCl_2 \leq 4$. Остальные 29 произошли для $7,8 \leq KCl/MgCl_2 \leq 364$. Анализ распределения количества газовыделений из поверхностных скважин по пластам в зависимости от отношения $KCl/MgCl_2$ для сильвинитовой зоны показывает, что газовыделения наблюдались в пласте Б смешанного и сильвинитового составов для $KCl/MgCl_2 \geq 0,7$.

Анализ геологических условий свидетельствует о приуроченности газовыделений и газодинамических явлений к контуру зон замещения, а меняющийся вокруг зон замещения в процессе формирования химический состав пород позволяет предполагать возможную миграцию из нижележащих нефтяных месторождений и нефтеперспективных структур с водными растворами и газов.

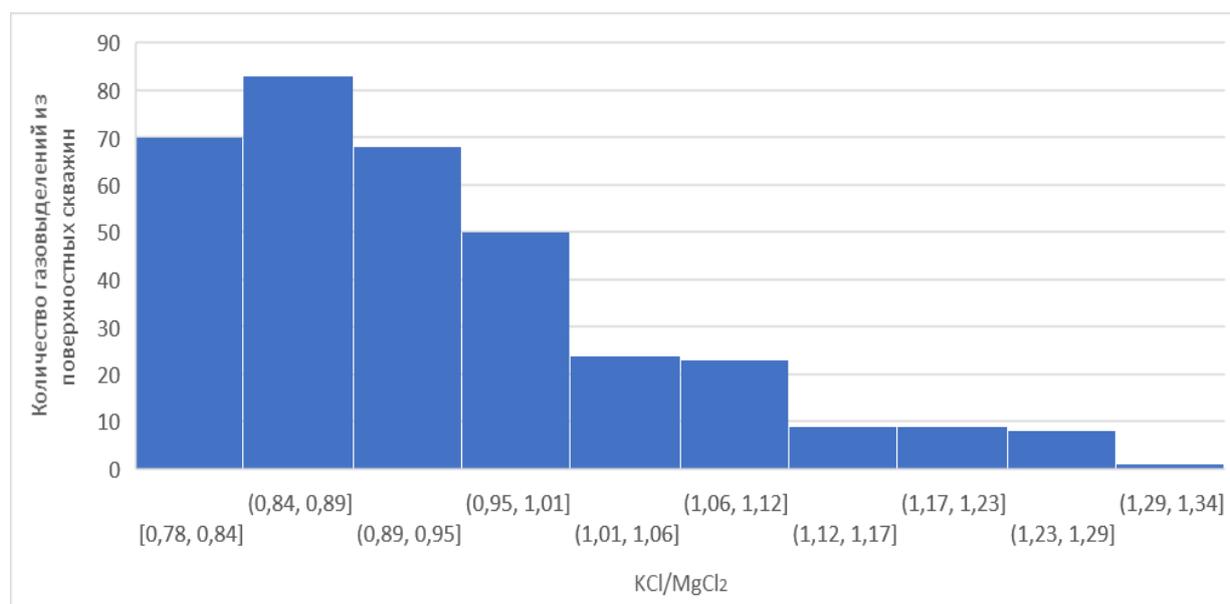


Рис. 1. Гистограмма распределения количества газовыделений и газодинамических явлений из поверхностных скважин в зависимости от отношения $KCl/MgCl_2$

Выводы

1. Установлено, что преобладающее количество газовыделений и газодинамических явлений при бурении геологоразведочных скважин с поверхности произошло из пластов смешанного состава. Так, из пластов сильвинит-карналлитовой зоны смешанного состава произошло 381 газовыделение, из них 351 при $0,7 \leq \text{KCl/MgCl}_2 \leq 1,3$ и 30 при $1,38 \leq \text{KCl/MgCl}_2 \leq 4$. Остальные 29 произошли для $7,8 \leq \text{KCl/MgCl}_2 \leq 364$. В зависимости от отношения KCl/MgCl_2 для сильвинито-карналлитовой зоны количество газовыделений убывает по мере увеличения отношения KCl/MgCl_2 , то есть при переходе пластов от смешанного в сильвинитовый состав.
2. Установлено, что в соляных породах сильвинитовой зоны газовыделения и газодинамические явления при бурении геологоразведочных скважин с поверхности отмечались в пласте Б смешанного и сильвинитового составов в интервале значений отношения $\text{KCl/MgCl}_2 \geq 0,7$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лялина Т.А., Андрейко С.С. Анализ газовыделений из геологоразведочных скважин для безопасного строительства и эксплуатации горных выработок калийных рудников на Верхнекамском месторождении калийных солей // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений: V Междунар. конф. – Екатеринбург: УГГУ, 2016. – С. 193-197.
2. Андрейко С.С., Лялина Т.А. Исследование газовыделений из геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении калийных солей // Изв. вузов. Горн. журн. – 2017. – № 2. – С. 33-38.
3. Андрейко С.С. Газовыделения при бурении геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении // Вентиляция шахт и рудников. Аэропылегазодинамика горных выработок: сб. науч. тр. – Л.: ЛГИ, 1987. – С.16-20.
4. Лялина Т.А. Закономерности газовыделений из геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 240-242.
5. Варушкин С.В. Использование данных о газоносности соленосной толщи Соликамской депрессии для прогнозирования нефтегазоносности подсольевых отложений // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 9.
6. Пospelов Д.А., Литвиновская Н.А. Пospelов Д.А. Влияние нефтеносных структур на компонентный состав свободных газов шахтного поля Соликамского калийного рудоуправления-3 Верхнекамского месторождения калийных солей // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Иркутск, 2018. – С. 319-323.
7. Хузина А.Р. Влияние нефтяных месторождений на компонентный состав газов в пределах шахтного поля БКПРУ-2 // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2016. – № 1. – С.282-285.
8. Чайковский И.И., Галинова О.И., Морозов В.Ю. Тектоническое строение Верхнекамского месторождения: становление новой парадигмы // Горное Эхо. – 2006. – № 1 (23). – С. 21-24.
9. Никифорова А.И. Прогноз строения и свойств калийной залежи на основе сейсмостратиграфического анализа разреза Верхнекамского месторождения: дис. ... к.т.н.; 25.00.16 / Никифорова Анастасия Игоревна. – Пермь, 2013. – 161 с.
10. Барях А.А., Федосеев А.К. Геомеханический прогноз распределения зон трещиноватости в соляной толще Верхнекамского месторождения калийных солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 5. – С. 11-21.
11. Петротектонические основы безопасной эксплуатации Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / под ред. Н.М. Джиноридзе. – СПб; Соликамск, 2000. – 400 с.
12. Лялина Т.А. Исследование закономерностей локализации газовыделений из геолого-разведочных скважин вблизи зон замещения калийных пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 15 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2017. – С. 362-365.
13. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ ОТ РАБОТЫ ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНОЙ МАШИНЫ FAMBITION FL14

М.О. Пересторонин, Е.В. Накаряков
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе представлены результаты измерений фактических газовыделений от погрузочно-доставочной машины Fambition FL14 (производство – Китай) с дизельным двигателем Volvo TAD1350VE (348 л. с.). Измерения выполнены в шахтных условиях для двух режимов работы двигателя – холостой ход и максимальная нагрузка. На основании результатов измерений выполнена оценка экологичности выхлопных газов при работе погрузчика, рассчитана норма подачи воздуха на 1 л. с. мощности двигателя. Оценка выполнена в сравнении со шведским погрузчиком Epiroc Scooptram ST-14, применение которого распространено во многих полиметаллических рудниках России и стран СНГ. Результаты исследования показали, что погрузчик FL14 является менее экологичным, чем его конкурент, погрузчик ST-14. Норма подачи воздуха на 1 л. с. мощности двигателя Volvo TAD1350VE составляет 4,5 м³/мин, что является высоким показателем, однако остается приемлемым для использования машины в условиях российских шахт.

Ключевые слова: погрузочно-доставочная машина, двигатель внутреннего сгорания, выхлопные газы, экология, норма подачи воздуха.

Введение

До недавнего времени выполнение погрузочно-доставочных операций в одном из крупнейших полиметаллических рудников России выполнялось с использованием шахтных погрузчиков шведских марок Sandvik (модели LH 410, LH 514) и Epiroc (модели Scooptram ST-14 и ST-1030). Однако на сегодняшний день с целью обновления и усовершенствования имеющейся технической базы рудника планируется ввод в эксплуатацию дополнительных погрузочно-доставочных машин (ПДМ). Одним из основных претендентов на эту роль является китайский погрузчик Fambition FL14.

В настоящее время в исследуемом руднике уже используется несколько таких машин с целью практической оценки их технических характеристик в сравнении с имеющимся проверенным временем оборудованием. Одним из показателей оценки является соответствие ПДМ Fambition FL14 стандартам экологичности, предъявляемым к шахтному оборудованию [1, 2]. Причем данный критерий является определяющим в решении о целесообразности масштабного внедрения этого погрузчика на производстве, поскольку от токсичности выхлопных газов зависит качество рудничной атмосферы, влияющее на здоровье горнорабочих и формирующее затраты на вентиляцию [3].

Настоящая статья содержит результаты экспериментальных измерений газовыделений, происходящих при работе ПДМ Fambition FL14 в режиме холостой работы двигателя, а также в режиме повышенной нагрузки, эквивалентной процессу отгрузки горной массы. Исследованию подлежали газы рудничной атмосферы, содержание которых регламентировано п. 151 ФНиП № 505 [4] – углекислый газ CO₂, метан CH₄, диоксид азота NO₂, кислород O₂, угарный газ CO. Измерения выполнены газоанализатором Drager X-am 5600 с возможностью определения концентрации газов в режиме реального времени и верифицированы лабораторным методом при помощи газовой хроматографии отобранных проб воздуха. На основании результатов измерений проведена оценка фактической экологичности погрузчика Fambition FL14 и сделан вывод о целесообразности его масштабного применения в полиметаллических рудниках взамен ПДМ фирм Sandvik и Epiroc.

Описание методики и условий измерений

Измерения газовыделений проводились в двух замерных пунктах сквозной выработки сечением $21,7 \text{ м}^2$ – на свежей струе (до ПДМ) и на исходящей струе воздуха (после ПДМ). Расход воздуха в выработке с машиной в период измерений составлял $34,7 \text{ м}^3/\text{с}$.

Схематичное расположение замерных пунктов [5, 6] при обследовании ПДМ Fambition FL14 в сквозной выработке представлено на рис. 1.

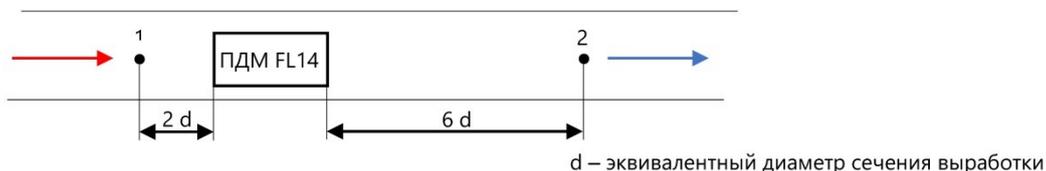


Рис. 1. Схематичное расположение замерных пунктов в сквозной выработке при измерении газовыделений от ПДМ Fambition FL14

Результаты измерений и аналитических расчетов

Результаты измерения газовыделений газоанализатором Drager X-am 5600 приведены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты измерения газовыделений от работы ПДМ Fambition FL14

Замерный пункт	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	Концентрация газов				
		O_2	CO_2	CH_4	CO	NO_2
		%			ppm	
т. 1 (свежая струя)	34,7	20,9	0,05	0	2	0,04
т. 2 (исходящая струя)		холостой ход				
		20,9	0,06	0	3	0,14
		максимальная рабочая нагрузка				
		20,9	0,09	0	2	0,88
Допустимые концентрации		20,0	0,5	0,5	17,0	1,0

Верификация измеренных газоанализатором концентраций газов при помощи газовой хроматографии отобранных проб воздуха на примере исходящей струи воздуха при максимальной рабочей нагрузке на двигатель ПДМ представлена в таблице 2.

Таблица 2
Верификация результатов измерений

Метод измерения	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$	Концентрация газов						
		O_2	N_2	CO_2	CH_4	CO	NO_2	H_2
		%				ppm		
Экспресс-метод (газоанализатор)	34,7	20,9	–	0,09	0	2	0,88	–
Лабораторный метод (хроматограф)		20,828	77,849	0,091	0,0002	1,14	–	0,068
Допустимые концентрации		20,0	–	0,5	0,5	17,0	1,0	–

На основании результатов сравнительного анализа можно сделать вывод о достаточной сходимости методов лабораторного анализа и экспресс-анализа состава рудничного воздуха с учетом измеренных значений концентраций. В связи с этим дальнейшие расчеты будут производиться на основании результатов экспериментальных измерений газоанализатором, представленных в таблице 1.

В целом можно заключить, что, согласно полученным результатам (таблицы 1 и 2), при работе ПДМ Fambition FL14 превышения предельно допустимых концентраций ядовитых и горючих газов не зафиксированы.

В рассматриваемом руднике аналогичное исследование газовыделений от работы погрузочно-доставочных машин выполнялось в 2021 году в рамках работы по *определению и обоснованию минимально допустимых норм подачи воздуха в подземные рабочие зоны машин с ДВС* (обследован весь технологический транспорт рудника) и в 2022 году в рамках *газовой съемки рудника* (обследованы погрузочно-доставочные машины марки Epiroc). Материалы данных исследований, представленные в работах [7, 8], свидетельствуют о том, что на сегодняшний день из всех погрузочно-доставочных машин, применяемых в руднике, наименее экологичными являются ПДМ Epiroc Scooptram ST-14. С учетом этого оценку токсичности китайского погрузчика Fambition FL14 целесообразно выполнять в сравнении с данной моделью ПДМ.

Для определения экологичности ПДМ Fambition FL14 в сравнении с используемыми на руднике ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 выполнен пересчет измеренных концентраций окислов углерода и азота в выхлопных газах на оксид углерода CO (%) по формуле [9, 10]:

$$C_{CO}(\text{с учетом } NO_x) = C_{CO} + 6,5 \cdot (1,53 C_{NO_x} + C_{NO_2}), \quad (1)$$

где C_{CO} – концентрация оксида углерода (CO), измеренная газоанализатором, %; C_{NO_2} – концентрация диоксида азота (NO₂), измеренная газоанализатором, %; C_{NO_x} – концентрация иных оксидов азота (NO_x), измеренная газоанализатором, %.

С учетом приведения концентраций оксидов азота к концентрации оксида углерода по вышеуказанной формуле абсолютное газовыделение от ПДМ (м³/ч) рассчитывается по формуле [11]:

$$I_{CO} = \frac{60 \cdot g_{\text{вых}} \cdot C_{CO}}{100}. \quad (2)$$

В представленной формуле количество выхлопных газов $g_{\text{вых}}$ (м³/мин) определяется по данным технического паспорта машины по формуле для четырехтактного двигателя [11]:

$$g_{\text{вых}} = \frac{V \cdot n}{2}, \quad (3)$$

где V – суммарный рабочий объем цилиндров, м³; n – скорость вращения коленчатого вала, об/с (замеренная при отборе проб, или возможные максимальные обороты из технической характеристики двигателя).

Кроме того, в рамках исследования газовыделений от ПДМ Fambition FL14 и Epiroc Scooptram ST-14 выполнен расчет требуемой нормы подачи воздуха на 1 л. с. мощности двигателя по формуле [3]:

$$q_{\text{лс}} = \frac{60 \cdot Q_{\text{треб}}}{N}, \quad (4)$$

где N – номинальная мощность двигателя машины, л. с.; $Q_{\text{треб}}$ – требуемое количество воздуха для проветривания машины (м³/с), определяемое как максимальное значение по факторам газовыделения оксида углерода (CO), оксидов азота (NO_x) и сгорания кислорода (O₂) [11]:

$$Q_{\text{треб}} = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{CO} \cdot Q}{CO_{\text{ПДК}}} \\ \frac{C_{NO_x} \cdot Q}{NO_{x\text{ПДК}}} \\ \frac{21 \cdot L_0 \cdot N \cdot q}{3600 \cdot \rho \cdot (C_{O_2} - 20)} \end{array} \right. , \quad (5)$$

где C_{O_2} – концентрация кислорода (O_2), измеренная газоанализатором, %; Q – расход воздуха в выработке, $\text{м}^3/\text{с}$; $CO_{\text{ПДК}}$ – ПДК для оксида углерода (CO), ppm; $NO_{x\text{ПДК}}$ – ПДК для оксидов азота (NO_x), ppm; L_0 – количество воздуха, необходимое для сгорания килограмма топлива (14,42 кг); q – удельный расход топлива при номинальной мощности (0,3 кг/кВт·ч); ρ – плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результаты расчета эквивалентных газовыделений от погрузочно-доставочных машин и норм подачи воздуха на 1 л.с. двигателя сведены в таблицу 3. В расчете абсолютных газовыделений от работы ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 использованы результаты экспериментальных измерений газовыделений от машины с наиболее загрязняющим атмосферу двигателем [7, 8].

Таблица 3

Сравнительная таблица

Машина		Fambition FL14	Epiroc Scooptram ST-14
Страна производитель		Китай	Швеция
Год производства		2023	2015
Двигатель		Volvo TAD1350VE	Cummins QSM11
Мощность		348 л.с. 256 кВт	335 л.с. 250 кВт
Класс токсичности	стандарт США	Tier 3	Tier 3
	стандарт стран ЕС	Euro Stage IIIA	Euro Stage IIIA
Абсолютные газовыделения CO и NO_x в пересчете на CO	холостой ход	0,00166 $\text{м}^3/\text{ч}$	0,00273 $\text{м}^3/\text{ч}$
	рабочая нагрузка	0,01806 $\text{м}^3/\text{ч}$	0,01436 $\text{м}^3/\text{ч}$
Норма подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя машины	холостой ход	1,1 $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 л.с.	1,8 $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 л.с.
	рабочая нагрузка	4,5 $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 л.с.	3,6 $\text{м}^3/\text{мин}$ на 1 л.с.

Заключение

В результате оценки токсичности фактических газовыделений, происходящих при работе китайского погрузчика Fambition FL14, в сравнении с газовыделениями от работы шведской ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 получены следующие выводы:

- газовыделения от ПДМ Fambition FL14 в режиме **холостого хода ниже** газовыделений от ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 (наиболее «грязной» машины в исследуемом руднике по состоянию на 2021 г.) **на 39%**;
- газовыделения от ПДМ Fambition FL14 в режиме **рабочей нагрузки выше** газовыделений от ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 **на 26%**;
- норма подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя ПДМ Fambition FL14 в режиме **холостого хода ниже** нормы подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 **на 41%**;
- норма подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя ПДМ Fambition FL14 в режиме **рабочей нагрузки выше** нормы подачи воздуха на 1 л.с. мощности двигателя ПДМ Epiroc Scooptram ST-14 **на 24%**.

На основании полученных результатов и с учетом того, что экологичность машины необходимо определять по газовыделениям в режиме рабочей нагрузки [5], можно сделать вывод, что исследованный китайский погрузчик Fambition FL14 является менее экологичным по сравнению с ПДМ шведских марок Sandvik (модели LH 410, LH 514) и Epiroc (модели Scooptram ST-14 и ST-1030).

Отмечается, что объем выполненных экспериментальных исследований является недостаточным для использования их результатов в практических расчетах и несет лишь оценочный характер. Для окончательного вывода об экологичности ПДМ Fambition FL14 и целесообразности ее масштабного использования в полиметаллических рудниках России требуется проведение дополнительных измерений с увеличением числа исследуемых машин.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР 124020500030-7).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Control of emissions from new and in-use nonroad compression-ignition engines: Code of Federal Regulations. Title 40, part 1039. – Текст электронный // <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-U/part-1039> (Дата обращения: 25.03.2024).
2. Directive 2004/ 26/EC of the European Parliament and of the Council of 21 April 2004 amending Directive 97/68/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures against the emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery // Official Journal of the European Communities – 2004 – L146 – P. 1-107.
3. 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.
4. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
5. Руководство по контролю вредных веществ в рудничном воздухе. – Екатеринбург, 2002. – 250 с.
6. Проведение воздушно-депресссионных и газовых съемок, определение устойчивости проветривания горных выработок и проявления низкотемпературной эманации на объектах ведения горных работ / МЧС России. – М., 2014. – 280 с.
7. Колесов Е.В. CFD-моделирование аэрогазодинамических процессов в тупиковой проходческой выработке при работе в ней дизельной техники // Горное эхо. – 2022. – № 2 (87). – С. 106-113. – DOI: 10.7242/echo.2022.2.17.
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. Кобылкин А. С. Исследование распределения вредных газов в горных выработках с использованием компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 10. – С. 202-207.
10. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. (доп. и перераб.) / ОАО «НИИ Атмосфера». – СПб., 2012. – 224 с.
11. Кузьминых Е.Г., Кормициков Д.С. Анализ методов расчета требуемого количества воздуха для разжижения отработанных выхлопных газов // Горное эхо. – 2020. – № 3 (80). – С. 107-115. – DOI: 10.7242/echo.2020.3.21.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ НА ПРИМЕРЕ СКИПОВОГО СТВОЛА КАЛИЙНОГО РУДНИКА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

М.А. Семин, А.А. Дунькина
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В представленной работе на основании данных температурного мониторинга состояния ледопородного ограждения (ЛПО) скипового ствола строящегося калийного рудника параметризована теплофизическая модель замораживаемого массива пород. Она использована для оценки энергоэффективности работы системы замораживания. Показано, что в условиях достаточно большого интервала замораживания пород для верхних слоев наблюдаются существенные превышения фактической толщины ЛПО над требуемой толщиной, а также имеется высокая доля неэффективно используемой тепловой энергии, затраченной на замораживание пород.

Ключевые слова: искусственное замораживание, ледопородное ограждение, энергоэффективность, моделирование, поле температур, теплота.

Введение

Строительство шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях осуществляется с использованием специальных способов. Наиболее распространенным специальным способом строительства шахтных стволов калийных рудников является искусственное замораживание [1]. В рамках данного способа вокруг проектируемой горной выработки формируется ледопородное ограждение (ЛПО), предотвращающее поступление подземных вод в данную выработку и повышающее устойчивость стенок горной выработки до возведения бетонной крепи.

Далее при работе системы замораживания осуществляется непрерывный температурный контроль за параметрами замороженных пород, целью которого является определение момента достижения требуемых толщин ЛПО во всем интервале замораживания [3]. Процедура искусственного замораживания пород является ресурсозатратной в плане электроэнергии. По оценкам [4], расходы электроэнергии на замораживание пород для одного погонного метра ствола может составлять $3,6 \cdot 10^9$ кДж. По данной причине важно подбирать энергоэффективные параметры работы систем замораживания, соблюдая при этом требования безопасности.

Вопросам энергоэффективного замораживания пород при строительстве стволов посвящен ряд исследований в литературе. В классической работе Н.Г. Трупака [5] предложены основные подходы к управлению холодопроизводительностью замораживающей станции на стадии пассивного замораживания. В работах [3, 6] предложена система непрерывного термометрического контроля, обеспечивающая оперативную и точную оценку состояния замороженных пород для своевременного принятия решений о смене режима работы замораживающей станции. В зарубежных работах [7, 8] рассмотрены принципы прерывистого управления и замораживания по требованию. Принцип замораживания по требованию был существенно развит в работе научной школы Горного института [9, 10]. Также в работе [9] был предложен поинтервальный принцип разрешения проходческих работ под защитой ЛПО. Применительно к калийному руднику в Республике Беларусь он позволил начать проходку двух стволов раньше, чем были достигнуты требуемые параметры ЛПО в наиболее глубоких слоях пород из интервала замораживания. Данный принцип сопровождался непрерывным контролем достижения требуемых толщин ЛПО к моменту начала работ по выемке породы на наименее промороженных глубоких слоях пород. Это позволило существенно уменьшить затраты электроэнергии на работу замораживающей станции на формирование и поддержание ЛПО (на величину более 3 млн. кВт*ч). Однако вместе с тем, по оценкам из

[10], многие слои пород из интервала замораживания для калийного рудника Республики Беларусь по-прежнему были существенно переморожены. Это указывает на потенциальную возможность дальнейшей оптимизации параметров системы замораживания.

Поиск дальнейших путей повышения энергоэффективности систем замораживания при строительстве шахтных стволов требует проведения детального анализа процессов замораживания на примере реальных рудников. По данной причине в настоящей работе на примере строящегося скипового ствола калийного рудника проведен анализ эффективности использования холодильной мощности системы замораживания при формировании ЛПО для различных слоев пород в интервале замораживания.

Объект исследования и исходные данные для анализа

В рамках исследования выполнен температурный мониторинг состояния ЛПО скипового ствола калийного рудника Республики Беларусь. Восстановление температурного поля во всем породном массиве по данным измерений в контрольно-термических скважинах осуществлялось с помощью численного моделирования в программном комплексе «FrozenWall». Параметризованная модель тепломассопереноса также использовалась для оценки энергоэффективности работы системы замораживания. Интервал замораживания имел глубину 185 м и был разделен на 17 слоев с различными теплофизическими свойствами (см. таблицу 1).

Таблица 1

Параметры слоев, залегающих в пределах скипового ствола

№ слоя	Описание породы	Отм. кровли, м	Отм. подошвы, м	Суммарное давление на внешнюю стенку ЛПО, МПа	Проектная толщина ЛПО, м
1	Песок	2,1	18	0,16	0,15
2	Суглинок	18	24,5	0,27	0,31
3	Песок, суглинок, супесь	24,5	33,5	0,30	0,32
4	Супесь	33,5	41,1	0,46	0,49
5	Супесь, суглинок	41,1	50	0,54	0,63
6	Суглинок	50	60,5	0,85	0,86
7	Песок глинистый, супесь	60,5	72,3	1,22	0,86
8	Суглинок	72,3	82,9	1,21	1,39
9	Супесь, суглинок	82,9	97,3	1,29	1,49
10	Мел писчий, супесь	97,3	109,3	1,43	1,77
11	Песок, супесь	109,3	124,4	1,87	1,89
12	Песок, суглинок	124,4	133,7	1,68	2,75
13	Песок	133,7	141,5	1,72	2,82
14	Глина, известняк	141,5	154,8	1,55	1,75
15	Глина, глина аргил.	154,8	162,1	1,69	1,59
16	Глина аргил.	162,1	182,1	1,91	1,82
17	Глина аргил.	182,1	187,1	1,94	2,12

Фактическая толщина ЛПО определялась исходя из рассчитанного поля температур по изотерме, равной -4°C , так как при данной изотерме температура прочного ЛПО достигает -10°C . Далее эта толщина сравнивалась с требуемой толщиной ЛПО, которая рассчитывалась по двум критериям: предельному напряженному (1) и предельному деформированному (2) состояниям [2]:

$$E = \frac{\sqrt{3} \cdot P \cdot h_3}{2 \cdot \sigma_{\text{дл}}}, \quad (1)$$

$$E = 0,5R \left[\left(1 + g(P) \frac{(1-m) \cdot P \cdot h_3^{1+m}}{A(t; \theta) \cdot \Delta^m \cdot R} \right)^{\frac{1}{1-m}} - 1 \right] \quad (2)$$

где P – полное горизонтальное давление, действующее на ледопородный цилиндр Па; h_3 – высота участка ЛПО, не подкреплённого крепью (высота заходки), м.; $\sigma_{дл}$ – предельно-длительное значение предела прочности на одноосное сжатие, определенное для расчетного времени t , Па; R – радиус ствола в проходке, м; m – коэффициент упрочнения замороженных пород (коэффициент нелинейности по напряжениям); A – предельно-длительное значение деформации, Па; Δ – допускаемое по техническим соображениям радиальное смещение внутренней стенки ЛПО, м; $g(P)$ – безразмерная функция от давления бокового распора [2].

Результаты моделирования

Давление, оказываемое на стенку ЛПО растет с глубиной залегания слоев, а потому, как правило, нижние слои требуют больших толщин ЛПО и, соответственно, промораживаются медленнее [11]. Из-за этого верхние слои склонны к перемораживанию в процессе формирования ЛПО требуемой толщины для всего интервала замораживания. В результате произведенных расчетов выявлена закономерность между глубиной залегания слоёв породы и отношением фактической толщины к требуемой (см. рис. 1). Нахождение такого отношения показывает во сколько раз происходит превышение или недостаток толщины ЛПО в слоях.

Исходя из графика зависимости, необходимо отметить следующее. В интервале от 1-го до 7-го слоя наблюдается чрезвычайно высокое превышение фактической толщины от требуемой. В частности, для 1-го слоя это отношение составляет 23,5. В интервале в целом от 8-го до 17-го слоя наблюдается невысокое превышение от требуемой величины (от 1,1 до 2,95), за исключением слоя № 16 – в нем по истечении 4-х месяцев с момента начала замораживания замороженные температуры не достигают -10°C и, следовательно, толщина ЛПО по средней температуре -10°C равна нулю. Несмотря на это в рамках предложенного подхода поинтервального разрешения проходческих работ по истечении 4 месяцев активного замораживания принято решение о начале проходки скипового ствола. Последний подход позволил существенно сэкономить энергозатраты на работу системы замораживания, так как для достижения требуемой толщины в слое 16 необходимо было продолжать стадию активного замораживания еще 3-4 месяца. Однако, как видно из рис. 1, достигнутый сценарий замораживания по-прежнему не является оптимальным в плане энергопотребления, имеется большой потенциал для его дальнейшей оптимизации по критериям затрачиваемой холодопроизводительности и безопасности ведения горных работ.

Также проведена оценка эффективности холодильной мощности системы в терминах доли неэффективно использованной холодопроизводительности системы замораживания. Оценивалось отношение неэффективно использованной тепловой энергии, затраченной на перемораживание ЛПО сверх требуемой толщины, к полезной теплоте, затрачиваемой на образование требуемой толщины ЛПО со средней температурой -10°C . Полезная и неэффективно использованная тепловые энергии рассчитываются по формулам (3) и (4):

$$Q_{п} = \rho \omega L V_{т} + \rho C_{т} \Delta T_1 V_{т} + \rho C_3 \Delta T_2 V_{т}, \quad (3)$$

$$Q_{н} = \rho \omega L V_{пер} + \rho C_{т} \Delta T_1 V_{т} + \rho C_3 \Delta T_2 V_{т} \quad (4)$$

где ρ – плотность породы n -го слоя, $\text{кг}/\text{м}^3$; ω – количество замерзающей воды, $\text{кг}/\text{кг}$; L – удельная теплота кристаллизации вещества, $\text{Дж}/\text{кг}$; $V_{т,пер}$ – объем породы, необходимый для достижения требуемой толщины ЛПО; объем перемороженной породы м^3 ; $C_{т,3}$ – соответственно в зоне охлаждения и в зоне льда, $\text{Дж}/\text{кг}^\circ\text{C}$; $\Delta T_{1,2}$ – разность температур соответственно, породы и полной кристаллизации; полной кристаллизации и прочного ЛПО, $^\circ\text{C}$.

Рассчитанные значения критерия неэффективно использованной теплоты представлены на рис. 2.

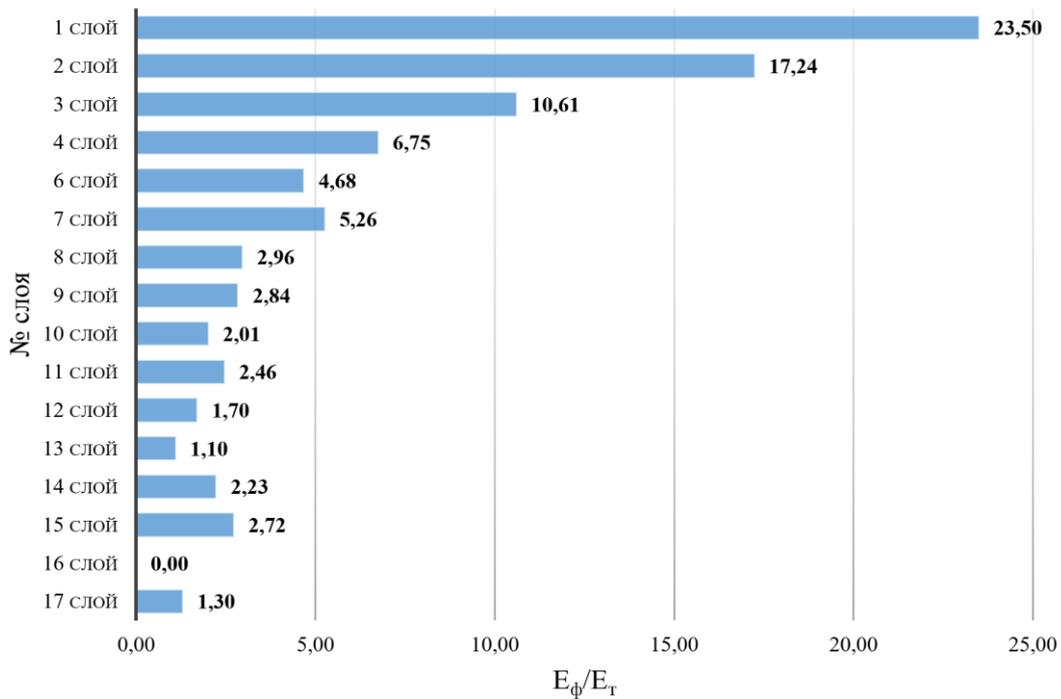


Рис. 1. Зависимость E_{ϕ}/E_T от глубины залегания слоя по истечении 4-х месяцев с момента начала замораживания

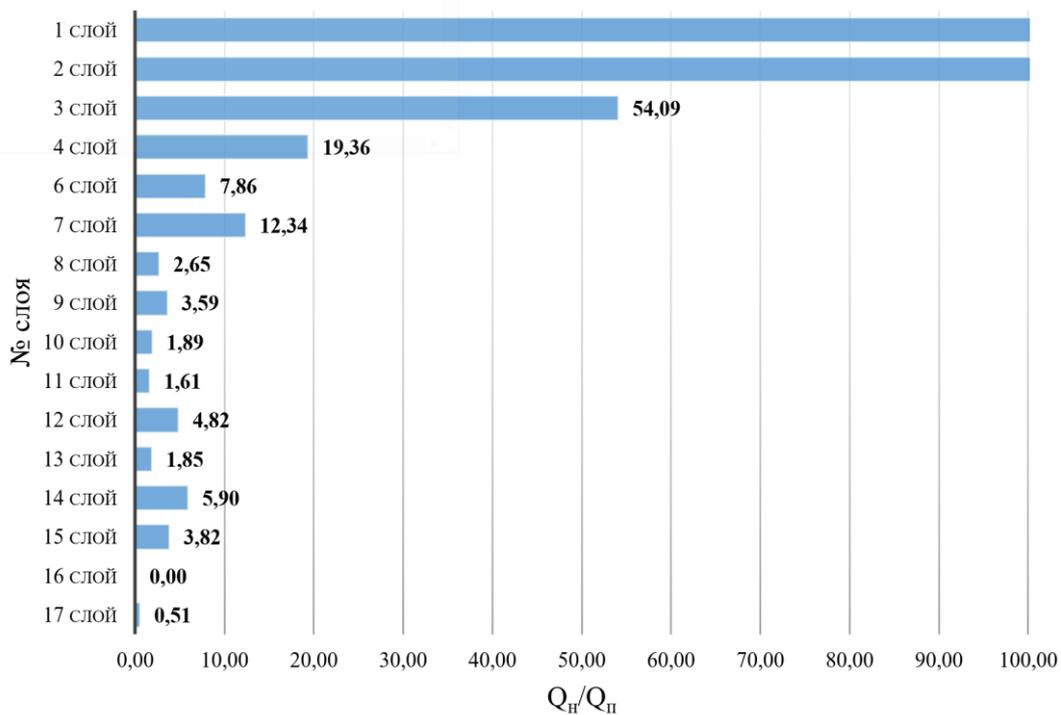


Рис. 2. Зависимость Q_n/Q_n от глубины залегания слоя по истечении 4-х месяцев с момента начала замораживания

Из рис. 2 видно, что в верхних слоях имеются значительные превышения требуемой холодопроизводительности на формирование ЛПО проектной толщины. Для первых двух

слоев превышение в более чем 100 раз. Это связано с тем, что проектная толщина ЛПО для данных слоев очень мала (см. табл. 1). В частности, при такой толщине ЛПО не обеспечивается условие замыкания ледопородного ограждения вокруг проектного сечения ствола.

В [9] упоминается, что искусственное замораживание должно рассматриваться в комплексе с другими технологическими процессами при проходке стволов. Вместе с этим эффективность проходческих работ напрямую зависит от устойчивости незакрепленных стенок шахтного ствола. В случае, если в интервале замораживания не достигается необходимая толщина до проектного сечения ствола, может происходить сильное деформирование породы, её вывалы в очистное пространство. Это повлечет за собой необходимость проведения дополнительных работ по укреплению стенок шахтного ствола и заполнению образовавшихся после вывалов пустот (например, с помощью бетона). В этом смысле перемораживание относительно рыхлых верхних слоев пород является благоприятным фактором.

В современных условиях еще одним значимым фактором при строительстве шахтных стволов является глубина интервала замораживания. С ростом глубины интервала замораживания максимальная нагрузка на внешнюю стенку ЛПО в самых глубоких слоях пород также растет. Это приводит к сильной дифференциации слоев замораживаемых пород по толщинам ЛПО, а также к перемораживанию верхних слоев. Поэтому необходимо сказать, что одним из перспективных путей повышения энергоэффективности является поинтервальный принцип разрешения проходческих работ под защитой ледопородного ограждения. Данный принцип также необходимо совершенствовать с точки зрения оптимизации проектных параметров замораживания в рамках данного подхода.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания (проект № 122030100425-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ольховиков Ю.П. Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников. – М.: Недра, 1984. – 238 с.
2. Kostina A., Zhelnin M., Plekhov O., Pantelev I., Levin L., Semin M. Applicability of Vyalov's equations to ice wall strength estimation // *Frattura ed integrità strutturale*. – 2020. – V. 14, № 53. – P. 394-405. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.53.30.
3. Levin L., Golovaty I., Zaitsev A., Pugin A., Semin M. Thermal monitoring of frozen wall thawing after artificial ground freezing: Case study of Petrikov Potash Mine // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2021. – V. 107. – № статьи 103685. – DOI 10.1016/j.tust.2020.103685.
4. Паланкоев И.М. Разработка конструкции замораживающей колонки зонального замораживания и методика определения эффективности ее работы // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2012. – №. 7. – С. 217-222.
5. Трупаков Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 896 с.: ил.
6. Levin L.Y., Semin M.A., Parshakov O.S. Improving methods of frozen wall state prediction for mine shafts under construction using distributed temperature measurements in test wells // *Journal of Mining Institute*. – 2019. – T. 237. – С. 268-274. – DOI: 10.31897/PMI.2019.3.268.
7. Zhou Y., Zhou G. Intermittent freezing mode to reduce frost heave in freezing soils—experiments and mechanism analysis // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2012. – T. 49, №. 6. – С. 686-693.
8. Alzoubi M.A., Zueter A., Nie-rouquette A., Sasmito A.P. Freezing on demand: A new concept for mine safety and energy savings in wet underground mines // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2019. – V. 29, №. 4. – С. 621-627.
9. Головатый И.И., Левин Л.Ю., Семин М.А., Пугин А.В. Реализация принципов замораживания «по требованию» при строительстве стволов Дарасинского рудника // *Горный журнал*. – 2023. – № 8. – С. 34-39. – DOI: 10.17580/gzh.2023.08.05.
10. Levin L., Semin M., Golovaty I. Analysis of the structural integrity of a frozen wall during a mine shaft excavation using temperature monitoring data // *Frattura ed integrità strutturale*. – 2023. – V. 17, № 63. – P. 1-12. – DOI: 10.3221/IGF-ESIS.63.01.
11. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Контроль и прогноз формирования ледопородного ограждения с использованием оптоволоконных технологий // *Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН*. – Пермь, 2016. – С. 236-238.

**Журнал
ГОРНОЕ ЭХО**

Научно-техническое издание

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук – ПФИЦ УрО РАН

614990, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а, тел. (342) 212-60-08

Издатель

Горный институт УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А; тел. (342) 216-75-02

Техническое редактирование В.В. Трескова
Верстка А.Б. Баталин

Подписано в печать 20.05.2024. Формат 60*84/8. Бумага ВХИ. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 11,63. Тираж 100 экз. Заказ №151149. Бесплатно. Дата выхода в свет 01.06.2024

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР)
(Свидетельство ПИ № ФС77-75332 от 25.03.2019 г.)

Адрес редакции:

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А; тел. (342) 216-75-02;
e-mail: arc@mi-perm.ru; www.mi-perm.ru

Отпечатано в типографии IQ.PRESS

614046, г. Пермь, ул. Барамзиной 42/3, тел.: +7 (342) 240-36-70
e-mail: zakaz@iqpress.ru, www.qpress.ru