



Горный институт  
УрО РАН

# Горное эхо

Научно-технический журнал  
2023 № 4 (93)

ISSN 2658-5227

12+

# Горное эхо

**Научно-технический журнал**  
2023 № 4 (93)

**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

- Каменских Н.Ю., Богомаз М.В.* Характеристика условий почвообразования в пределах горного отвода над Кунгурской Ледяной пещерой ..... 3
- Каменских Н.Ю., Наумкин Д.В.* Морфологические признаки почв в условиях разлива соленых источников в окрестностях Усть-Игума (Александровский район, Пермский край) ..... 9
- Наугольных С.В., Наумкин Д.В.* Палеоэкология и палеоихнология нижнепермских отложений района г. Красноуфимск (Свердловская область) ..... 19

### МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

- Евсеев А.В., Васильева Е.Л.* Анализ процесса деформирования междукамерных целиков по результатам инструментальных измерений на поверхности и в шахте ..... 39
- Кузьминых В.С.* Построение кривой длительной прочности соляных пород при растяжении по результатам экспериментов на ползучесть ..... 43
- Морозов И.А.* Об оценке устойчивости горных выработок в условиях глубоких калийных рудников ..... 47
- Токсаров В.Н.* Изучение возможности использования микроструктурных параметров каменной соли для оценки величины палеонапряжений ..... 52

### ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

- Геник И.В.* Об обработке долговременных записей гравиметра Autograv ..... 56
- Иванов С.В.* Информационные возможности шахтных сейсморазведочных исследований в соляных рудниках ..... 61
- Симанов А.А.* Использование глобальных цифровых моделей рельефа при обработке гравиметрических данных в горной местности ..... 69
- Степанов Ю.И., Кузнецов И.Л., Зубрикова Е.С., Тайницкий А.А.* Теоретические и практические вопросы применения метода естественного поля на калийно-магниевых рудниках ..... 72
- Хохлова В.В.* Первичная обработка гравиметрических данных в условиях резко расчлененного рельефа ..... 79
-

**РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА****И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА**

<i>Воробьев В.И., Князев Н.А.</i> Многовариантное моделирование как способ оптимизации очагового заводнения на примере залежей с карбонатным типом коллектора месторождений Пермского края .....	83
<i>Гришин Е.Л.</i> Аэрологические риски и барьеры безопасности.....	88
<i>Князев Н.А., Смородских А.С., Кормициков Д.С.</i> Разработка мероприятий по обеспечению безопасной эвакуации горнорабочих через вентиляционные стволы при реверсировании воздушной струи на горнодобывающих предприятиях, расположенных в северных регионах.....	92
<i>Мальцев С.В.</i> Актуальные вопросы разработки математических моделей вентиляционных сетей подземных рудников.....	100
<i>Ольховский Д.В., Залазаев О.Д.</i> Обоснование возможности применения газовой калориферной прямого нагрева для условий калийного рудника.....	105
<i>Пугин А.В., А.В. Богомяков А.В., Агеева К.М.</i> Определение рационального режима формирования ледопородного ограждения или его размораживания на основе многовариантного математического моделирования.....	115
<i>Суханов А.Е., Мальцев С.В.</i> О необходимости технического обследования главной вентиляционной установки после окончания нормативного срока службы для выбора варианта технического перевооружения калийных рудников.....	123
<i>Тацкий А.В.</i> Анализ влияния величины отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя на интенсивность воздухообмена в тупиковых горных выработках.....	130

# ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГИДРОЛОГИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 631.4

DOI:10.7242/echo.2023.4.1

## ХАРАКТЕРИСТИКА УСЛОВИЙ ПОЧВООБРАЗОВАНИЯ В ПРЕДЕЛАХ ГОРНОГО ОТВОДА НАД КУНГУРСКОЙ ЛЕДЯНОЙ ПЕЩЕРОЙ

Н.Ю. Каменских, М.В. Богомаз  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье проанализирована информация об условиях почвообразования в районе островной Кунгурской лесостепи. Для изучения выбран наиболее закарстованный участок в пределах ООПТ – горный отвод над Кунгурской Ледяной пещерой. Наиболее подробно рассмотрены факторы почвообразования – почвообразующие породы, растительность, климатические условия, рельеф и возраст почв в виде исторической справки. Дана характеристика почвообразующих пород и их отличительные свойства. Представлен видовой состав растительности над Ледяной пещерой. Сделан анализ погодных условий за последние 5 лет. Детально дана оценка осадкам за 2018, 2019, 2020, 2021, 2022 гг. В среднем за 5 лет большее количество осадков (56%) приходилось на теплое время года. Выполнена морфометрическая характеристика карстовых воронок в пределах горного отвода над Ледяной пещерой. Для оценки использован новый картографический материал Кунгурской лаборатории-стационара. Все воронки сгруппированы по диаметру и глубине. Выявлена тесная корреляционная связь между диаметром и глубиной воронок. Коэффициент корреляции составил 0,86 при 121 паре измерений. Проведена историческая оценка работ по описанию почвенного покрова в районе островной Кунгурской лесостепи.

**Ключевые слова:** горный отвод над Кунгурской Ледяной пещерой, факторы почвообразования, почвообразующие породы, растительность, климат, рельеф, возраст почв.

Неотъемлемой частью природных ландшафтов является почвенный покров. Почва связывает растительность, атмосферные явления и горные породы. Разнообразие условий почвообразования на территории Пермского края обуславливает разнообразие почв. При этом в различных почвах повторяются одни и те же процессы, существенно различающиеся лишь интенсивностью своего проявления [13, 17].

Особенностью части территории Пермского края являются опасные геологические процессы: карст, суффозия, провальные процессы [3]. Основной район проявления карста – юго-восточная часть края – Кунгурская лесостепь. Большая часть территории Кунгурского муниципального округа входит в район островной Кунгурской лесостепи, уникальный с точки зрения зональности. Уникальность островной Кунгурской лесостепи в том, что этот участок является самым северным участком ковыльной степи в Европе. Здесь совместно произрастает лесная и степная растительность [11]. Этот район неоспоримо может служить источником информации о направленности и проявлении почвенных процессов в условиях лесостепи.

Территория ООПТ Историко-природного комплекса «Ледяная гора и Кунгурская Ледяная пещера» является ценной с точки зрения условий почвообразования площадкой для комплексного исследования почв, формирующихся в районах карста. Многолетние наблюдения за Ледяной пещерой и прилегающими территориями дают целостную картину о карстовых процессах на территории ООПТ. Исследования почвенного покрова, как связующего звена между компонентами заповедной территории, не проводилось. В связи с этим существует необходимость исследования почвенного покрова карстующихся территорий и сравнительного анализа свойств почв карстовых воронок и почв зонального характера. *Целью* данной работы является сбор имеющейся инфор-

мации и анализ условий почвообразования в районе ООПТ Историко-природный комплекс «Ледяная гора и Кунгурская Ледяная пещера». *Объект исследования* – горный отвод над Кунгурской Ледяной пещерой.

Кунгурский район как часть Пермского края относится к территории Западного Предуралья и занимает восточную его часть, состоящую из предгорий и западных хребтов горной полосы Урала [10].

По данным Н.Я. Коротаяева в Кунгурском муниципальном районе основной фон *почвообразующих пород* составляют элювиально-делювиальные лессовидные глины и суглинки, образовавшиеся из глин, мергелей и известняков пермской системы [7]. Среди лессовидных суглинков встречаются карбонатные и бескарбонатные разновидности, что служит основанием для уверенности былой карбонатности. Довольно часто в элювиально-делювиальных отложениях встречаются единичные экземпляры галек диаметром 2-3 см. Толщина элювиально-делювиальных отложений лессовидных глин и суглинков наибольшая на выровненных плато [2].

По гранулометрическому составу элювиально-делювиальные отложения в большинстве случаев являются глинами и редко тяжелыми суглинками. Как у покровных суглинков, так и у элювиально-делювиальных отложений, преобладающей является лессовидная фракция (0,05-0,01 мм). Следовательно, те и другие отложения являются лессовидными. В них также много иловатых частиц (менее 0,001 мм). Наблюдается тенденция увеличения лессовидности и уменьшения количества ила у покровных суглинков по сравнению с элювиально-делювиальными отложениями [7].

Такие свойства материнских пород дают генетический материал для образования почв с низкой кислотностью и высоким содержанием органического вещества. В результате этого почвы Кунгурского муниципального округа отличаются относительно высоким плодородием, хорошей структурой, неплохими физико-химическими свойствами, близкой к нейтральной реакции почвенного раствора, широкой пригодностью для выращивания большого количества видов сельскохозяйственных растений.

Флора и растительность территории горного отвода над Ледяной горой отличается своеобразием. Березовые рощи с одноярусным древостоем в среднем занимают 30% территории. Их растительный покров в основном злаково-разнотравный. Имеются насаждения сосны (*Pinus sylvestris*) с развитыми кустарниковым и травяно-кустарничковым ярусами разной плотности. В логах и воронках обычны березняки орляковые (*Bethula pendula*, *Pteridium aquilinum*). Остальная часть занята разнотравно-злаковым пастбищем, где сочетаются луговые и степные фитоценозы. Луговые фитоценозы представлены коострецовыми группировками (*Bromopsis inermis*) с участием *Phleum pratense* и практически не развитым разнотравьем. Встречаются луга с преобладанием овсяницы луговой (*Festuca pratensis*), вейниковые луга с участием коротконожки перистой (*Brachypodium pinnatum*). Для платообразной равнинной части характерны остепненные луга. Эта часть травостоя находилась длительное время под сильным воздействием бессистемного выпаса. В настоящее время это злаково-разнотравные группировки ежи сборной (*Dactylis glomerata*), овсяницы луговой (*Festuca pratensis*), пырея ползучего (*Elytrigia repens*). Из разнотравья клевер ползучий (*Trifolium pratense*), подмаренник белый (*Galium album*), лабазник обыкновенный (*Filipendula vulgaris*) и другие [12].

Наибольший интерес в Нечерноземье представляют степи. На выровненных участках Ледяной горы и по опушкам – разнотравно-перистоковыльные, на пологих склонах – разнотравно-перистоковыльные с разнообразным составом содоминирующих видов разнотравья (шалфей степной (*Salvia stepposa*), земляника лесная (*Fragaria vesca*), лабазник обыкновенный (*Filipendula vulgaris*)). На склонах – шелковистополынно-разнотравно-перистоковыльные степи. На склонах с выходом пород – каменистые степи с общим проективным покрытием 20-60% [12].

Травостой карстовых воронок в основном представлен зарослями орляка обыкновенного (*Pteridium aquilinum*), крапивы двудомной (*Urtica dioica*), сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria*) и др. Нередко по краям воронок или на дне встречаются кустарники: ирга круглолистная (*Amelanchier ovalis*), клен ясенелистый (*Acer negundo*). В целом, наибольшее число видов, произрастающих над Ледяной пещерой, это представители семейства: Asteraceae – 37 (13,2%), Poaceae – 29 (10,3%), Rosaceae – 27 (9,6%) [1]. Это еще раз доказывает практическую значимость изучения почвенного покрова и почвенных процессов на территории заповедников.

Климатические особенности Кунгурского округа формируются под влиянием атлантических воздушных масс, которые приносят много влаги. Частые циклоны смягчают ход температуры, зимой приносят оттепели, а летом прохладную погоду. Безморозный период в г. Кунгур обычно продолжается 4,1 месяца (128 дней), примерно с 18 мая по 23 сентября, редко начинаясь раньше 28 апреля или после 5 июня и редко заканчиваясь до 3 сентября или после 12 октября (данные за период 2018-22 гг.) [18].

Важную роль в почвообразовании играет вертикальная миграция почвенной влаги. Миграция влаги обуславливает вертикальное распределение веществ в почвенной толще (дифференциацию на горизонты) и обеспечивает значительные изменения по вертикали влажности почвы, просачивание влаги через толщу почвы в почвообразующие породы и далее. Низходящие токи влаги в карстовых районах вызывают не только размывание горных пород, но и приносят в подпочвенные горизонты продукты вымывания из верхней части земной поверхности. В результате происходит миграция органического и минерального вещества далеко за пределы профиля [15].

Миграция влаги в данном районе весьма закономерна, так как район относится к зоне достаточного увлажнения с неравномерным выпадением осадков. Более влажный сезон длится 7,1 месяца – с 18 апреля по 20 ноября с более чем 23% вероятностью того, что заданный день окажется влажным. Более сухой сезон длится 4,9 месяца – с 20 ноября по 18 апреля. Месяц с наименьшим количеством дождливых дней в г. Кунгур – февраль [18, 19] (рис. 1).

Динамика поступления осадков на поверхность земли по декадам за последние 5 лет отражена на рис. 1. (по данным Кунгурской метеостанции).

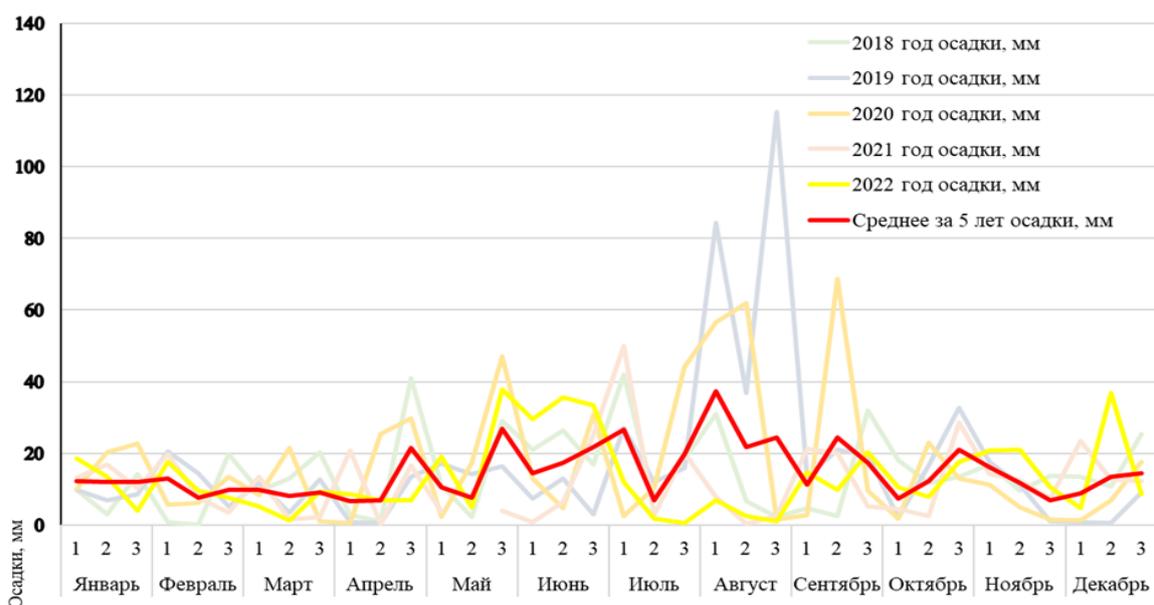


Рис. 1. Количество осадков за периоды 2018-22 гг., мм

По средним многолетним данным 68% осадков приходится на летний период с мая по октябрь [4]. За пять последних лет 56% осадков приходилось на летний период. На рисунке видно, что большая часть осадков за периоды 2018-22 гг. поступала на поверхность в теплое время года. Несмотря на то, что большинство осадков приходится на летние периоды, в 2021 году и в 2022 году наблюдались засушливые периоды, что несомненно влияет на вынос веществ вниз по профилю.

В связи с этим большой интерес вызывает явление возникновения геохимических индикаторов в почвенном профиле и их связь с геохимическими индикаторами природных процессов в подземных карстовых ландшафтах.

Согласно схеме геоморфологического районирования Пермского края, представленной Л.А. Шимановским, Кунгурский район относится к Сылвенско-Иренской наклонной карстовой низине расположенной на западном склоне Уфимского выступа и в Бабинской депрессии, а также на западном склоне новейшего Уфимского свода с амплитудами от 25 до 200 м, увеличивающимися к востоку. Наклон пород и уменьшение амплитуд новейших поднятий к западу определили общий пологий уклон поверхности в западном направлении [16].

В геоморфологическом отношении район горного отвода над Ледяной пещерой относится к северной суженной оконечности Уфимского плато, представляющего собой платообразную возвышенность [8]. В морфоструктурном отношении он находится на стыке двух структур первого порядка: Уфимского морфосвода и Предуральского сложного морфоподнятия. Здесь развит III ярус рельефа – плоская аккумулятивно-денудационная равнина с высотами 180-220 м, а в долинах рек I ярус – низменность с высотами 80-100 м. Суммарная расчлененность рельефа составляет 0,06-0,08 [16]. Водораздельное плато Ледяной горы сложено гипсами и ангидритами пермского возраста, которые чередуются с маломощными слоями известняков и доломитов. В разных местах широтный разрез этих отложений составляет от 50 до 1525 м. На обрывистых берегах Сылвы эти породы выходят на дневную поверхность, а на водоразделе покрыты мощным чехлом песчано-глинистых четвертичных отложений древних террас [12].

Явление сульфатного карста на территории Кунгурского муниципального округа влечет за собой образование карстовых форм рельефа [5]. Наиболее распространённая форма рельефа – карстовые впадины различных размеров и формы. Здесь их насчитывается более 3000 [3]. Карстовый рельеф Ледяной горы отличается разнообразием форм. Большинство составляют карстовые воронки (60%), чашеобразные впадины (24%) и блюдца (10%), реже встречаются рвы и колодцы по трещинам оседания (5%), котловины (1%). Наиболее распространены полигенетические формы, в образовании которых участвовали карстовые, гравитационные и суффозионные процессы [8].

В нашем случае большое количество воронок дает возможность оценить не только характеристику почв, но и миграцию влаги вниз по профилю, а, соответственно, и вынос вещества за пределы профиля почвы. Для дальнейшего определения методики и объема работ все области карстовых воронок в пределах горного отвода сгруппировали согласно классификации Г.А. Максимовича [9]. Результаты морфометрической характеристики карстовых воронок представлены в таблицах 1 и 2.

В пределах горного отвода над Ледяной пещерой насчитывается 121 карстовая воронка разной величины. Для анализа использовали материалы топографической съемки поверхности ледяной горы в пределах горного отвода 2021-22 гг. (фонды стационара).

В целом, карстовые воронки занимают 10% поверхности горного отвода над Ледяной пещерой, что составляет 464 шт. на 1 км<sup>2</sup>.

Таблица 1

Морфометрическая характеристика карстовых воронок по диаметру  
в пределах горного отвода над Кунгурской Ледяной пещерой

Показатель	Градации показателя величины воронок по диаметру			
	небольшие до 5 м	обычные 5-25 м	большие 25-100 м	огромные более 100 м
Количество, шт.	11,0	93,0	17,0	–
Число воронок в %	9,0	76,9	14,1	–
Плотность на 1 км <sup>2</sup> , шт.	42,2	356,6	65,2	–
Средний диаметр, м	4,0	9,5	34,5	–
Площадь, м <sup>2</sup>	163,3	8570,8	17361,0	–
Средняя площадь, м <sup>2</sup>	14,9	92,2	1021,2	–

Большую часть территории горного отвода над Кунгурской Ледяной пещерой занимают воронки диаметром от 5 до 25 метров (определены как обычные воронки [10]). Их плотность составляет 42,2 шт. на 1 км<sup>2</sup>. Концентрация воронок на небольшой площади дает возможность изучения динамики почвенных процессов как с биологической, так и с практической точки зрения. Смыв материала, характер эрозионных процессов будут интересны в научных изысканиях и в практическом применении для прогноза эрозионных процессов.

Таблица 2

Морфометрическая характеристика карстовых воронок по глубине  
в пределах горного отвода над Кунгурской Ледяной пещерой

Показатель	Градации показателя величины воронок			
	мелкие до 1 м	неглубокие 1-5 м	обычные 5-25 м	глубокие более 25 м
Количество, шт.	20	81	12	6
Средняя глубина, м	0,66	1,81	7,46	11,32

Анализ воронок по глубине в пределах горного отвода над Ледяной пещерой показал, что глубина воронки и ее диаметр имеют тесную корреляционную связь – чем больше диаметр воронки, тем она глубже. Коэффициент корреляции для 121 пары измерений составил 0,86. Такая связь и наличие большого числа идентичных воронок дает возможность дать оценку почвенным катенам воронок с наибольшей вероятностью повторяемости свойств.

Возраст почв отражает изменения свойств почвы, ее морфологию и, в целом, память почвы. Основной характеристикой памяти почв является ее профиль [14, 17]. Первые сведения о почвах Пермской области, и в том числе Кунгурского района, были получены к 1801-02 гг. Описание «грунта земли» Н.С. Попова (1804) не дает представления о почвенном покрове, но описание лесостепных почв между реками Сылвой и Иренью подтверждено современными исследованиями [7]. Более подробно почвы в Кунгурском районе впервые были описаны Р.В. Ризположенским в 1894-1907 гг. В своих работах он сосредоточил свое внимание на морфолого-генетических признаках почв Пермской губер-

нии, в том числе и Кунгурского уезда. По предположению Н.Я. Коротаева (1976), материалы, полученные Р.В. Ризположенским за период 1894-1907 гг. и его коллегами в Предуралье, были использованы В.В. Докучаевым для составления карты Европейской части России 1883 г., где помечены почвы с содержанием гумуса 4-7%, но эта карта мало соответствовала действительности. В 1900 году по инициативе В.В. Докучаева издается карта, составленная Н.М. Сибирцевым, Г.И. Танфильевым и И.Г. Ферхминым. На этой карте южнее г. Кунгура показано довольно большое овальное пятно черноземных почв [6, 7].

Позднее, в 20-е годы XX столетия, начинается большая работа по почвенно-картографическим исследованиям в целях внутрихозяйственного землепользования. В этот период выделены 5 почвенных подзон, в том числе, лесостепная подзона почв. Однако почвы Кунгурской лесостепи оставались долгое время неизученными. В 40-70-х гг. кафедрой почвоведения были созданы почвоведческие отряды. Почвы Кунгурской лесостепи исследовала Т.В. Вологжанина (1958), дерново-карбонатные почвы В.А. Азарина (1959) [7].

На высокой равнине, а также в вогнутых и покатых частях коренных склонов рек Сылвы и Шаквы формируются темно-серые лесные среднеподзоленные, среднесуглинистые почвы. Под лесом на плоских формах рельефа сформировались дерново-подзолистые почвы. Они представлены видами среднеподзоленных почв суглинистого и глинистого гранулометрического состава. Выровненные участки и покатые склоны водораздела занимают дерново-среднеподзолистые почвы. На склонах коренного берега на глинистом элювии известняков залегают дерново-слабоподзолистые почвы. В понижениях почвенной массы высокой равнины среди дерново-подзолистых почв формируются дерново-подзолистые глееватые почвы как результат развития восстановительных процессов [2, 7].

Большая часть этих работ и исследований была посвящена почвам сельскохозяйственного назначения и почвам зонального характера. Почвенные катены карстовых воронок практически не изучены.

По природе почвообразовательного процесса почвы Кунгурской лесостепи имеют высокое плодородие и успешно используются в сельском хозяйстве. В результате сельскохозяйственного использования почвы приобретают иное строение и происходит их деградация. Почвенный покров Ледяной горы претерпевал заметное антропогенное воздействие. Длительный интенсивный нерегулируемый выпас, стихийные дороги, места для пикника, свалка мусора оставили свой экологический след. Изучение почвенного покрова заповедных территорий дает возможность понять направленность процессов и выявить пути окультуривания почв в процессе их использования. Почвенные процессы, происходящие в пределах горного отвода, идентичны процессам, происходящим на территории Кунгурского муниципального округа. Поэтому результаты исследования могут быть полезны сельскохозяйственным производителям в области питания растений и применения удобрений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Владыкина А.В. Флора и растительность ООПТ «Ледяная гора и Кунгурская Ледяная пещера» (Пермский край) // Фундаментальные и прикладные исследования в биологии и экологии: сб. статей по материалам регион. науч. конф. (19 – 23 апр. 2021 г. / ПГНИУ. – Пермь, 2021. – С. 13-16. – DOI: 10.17072/fpibe-2021.
2. Вологжанина Т.В. Серые лесные почвы зоны широколиственных лесов русской равнины: автореф. дис. ... д. с.-х.н.: 06.01.03 / Вологжанина Таисия Васильевна. – М., 1984. – 54 с.: ил.
3. Дорофеев Е.П. Провалы Ледяной горы // Карст и гидрогеология Предуралья. – Свердловск, 1979. – С. 49-53. – (Тр. Ин-та геологии и геохимии. Вып. 140).
4. Кадебская О.И. Геоэкологическое состояние Кунгурской Ледяной пещеры и прилегающей территории, ее охрана и рациональное использование: дис. ... канд. географич. наук: 25.00.36 / Кадебская Ольга Ивановна. – Пермь, 2004. – С. 14-15.

5. Катаев В.Н., Макстмович Н.Г., Мещерякова О.Ю. Типы карста Пермского // Вестн. Балтийского фед. ун-та им. И. Канта. – 2013. – № 1. – С. 56-66.
6. Кондратьева М.А., Бажукова Н.В. Почвенное картографирование от истоков до наших дней (на примере Пермского края) // Рос. журнал прикладной экологии. – 2019. – № 3. – С. 28-34.
7. Коротаев Н.Я. Почвы Пермской области. – Пермь: Кн. изд-во, 1962. – С. 4-23. – (Природа Перм. обл.).
8. Кунгурская ледяная пещера: опыт режимных наблюдений / ГИ УрО РАН; под ред. В.Н. Дублянского; [отв. ред. А.И. Кудряшов]. – Екатеринбург, 2005. – С. 11 – 21.
9. Максимович Г.А. Основы карстоведения. В 3-х т. Т. 1. Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. – Пермь, 1963. – С. 104-105.
10. Назаров Н.Н. Физико-географическое районирование Пермского Прикамья // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь, 1998. – С. 12-21.
11. Овеснов С.А. Кунгурская лесостепь: феномен или фантом? // Ботанические исследования на Урале: материалы регион. с междунар. участием науч. конф., посвящ. памяти П.Л. Горчаковского. – Пермь, 2009. – С. 270-275.
12. Исследование антропогенного воздействия в пределах историко-природного комплекса «Ледяная гора и Кунгурская ледяная пещера»: Отчет о НИР / Чибилов А.А., Калмыкова О.Г. – 2022. – 75 с. – (Фонды Кунг. лаб.-стационара).
13. Процессы почвообразования: учеб. пособие / сост. С.Е. Витковская. – СПб, 2022. – 39 с.
14. Таргульян В.О., Соколов И.А. Структурный и функциональный подход к почве: почва-память, почва-момент // Математическое моделирование в экологии: материалы III шк. по математич. моделированию сложных биологич. систем. – М.: Наука, 1978. – С. 17-33.
15. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв: автореф. дис. ... д.б.н.; 06.01.03 / Умарова Аминат Батальбиевна – М., 2008 – 50 с.
16. Шимановский Л.А. Геоморфологическое районирование Пермской области // Физико-географические основы развития и размещения производительных сил Нечернозёмного Урала: межвуз. Сб. науч. тр. – Пермь, 1985. – С. 74-84.
17. Щеглов Д.И., Брехова Л.И. Процессы почвообразования: учеб. пособие. – Воронеж: Изд. дом ВГУ, 2016. – С. 18-22.
18. Погода в Кунгуре: сайт. – Текст электронный. – URL: [http://www.pogodaiklimat.ru/history/28326\\_2.htm](http://www.pogodaiklimat.ru/history/28326_2.htm). (Дата обращения: 17.10.2023).
19. Климат и средняя погода круглый год в Кунгур: сайт. – Текст электронный. – URL: <https://ru.weatherspark.com/y/105598/Обычная-погода-в-Кунгур-Россия-весь-год>. (Дата обращения: 17.10.2023).

УДК 502.5:502.4:504.54

DOI:10.7242/echo.2023.4.2

## **МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ПОЧВ В УСЛОВИЯХ ИЗЛИВА СОЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ОКРЕСТНОСТЯХ УСТЬ-ИГУМА (АЛЕКСАНДРОВСКИЙ РАЙОН, ПЕРМСКИЙ КРАЙ)**

Н.Ю. Каменских, Д.В. Наумкин  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В окрестностях населенного пункта Усть-Игум в Александровском районе в месте разгрузки древних рассолоподъемных скважин в пойме реки Усолки с целью изучения степени влияния высокоминерализованных подземных вод на почвенный покров были заложены 4 почвенных разреза. Разрезы заложены с левой и правой стороны соляного ручья на разном расстоянии от его русла. В статье представлено описание растительности в местах заложения почвенных разрезов, определены и описаны почвенные слои, дана морфологическая характеристика почвенной составляющей, полученной в ходе полевых работ.

**Ключевые слова:** рассолоподъемные скважины, условия почвообразования, почвенные слои, растительный покров.

## **Введение**

Яйвинский острожек – место с многовековой историей. Датой его основания считается 1570 г. Интересно это место тем, что в XVI в., во времена активного развития солеварной промышленности, здесь практиковалась добыча рассолов с глубины 30-40 м с помощью матичных труб [1]. Производство соли прекратилось в XVIII в., а остатки матичных труб и скважины по-прежнему изливают соляной раствор на поверхность, формируя соленые ручьи, которые впадают в р. Усолку. До настоящего времени этот район не подвергался выраженному антропогенному воздействию. На формирование почв в пойме р. Усолки в течение нескольких столетий оказывали влияние природные факторы, в том числе и соленые ручьи с хлоридно-натриевым химизмом. За этот период (с XVIII в.) здесь произошла смена растительных формаций (включая появление и массовое развитие галофитов) и трансформация почвенного покрова – образование вторичного солончака [2].

В условиях Пермского края изучение подобных засоленных почв (вторичных солончаков) представляет особый интерес. В результате длительных разнообразных комбинаций факторов и процессов формируются запечатанные и погребенные почвы, что определяет появление их информационной функции [3]. Память почв позволяет сохранить информацию об условиях почвообразования, обеспечивает возможность изучения влияния прошлых событий на текущую и будущую реакцию земной поверхности. Комплексное изучение исторических фактов и современного состояния окружающей среды в районе солеподъемных скважин невозможно без исследований почвенного покрова. В данной статье представлена часть этой работы – описания морфологических признаков почвы и условий почвообразования в месте разлива соленых источников.

## **Условия формирования почв в пойме реки Усолки**

Территория района исследований с рассолоподъемными скважинами находится на северо-востоке центральной части Пермского края в 20 км от г. Александровска (рис. 1).

Климат изучаемой территории умеренно-континентальный. В течение года господствует воздух умеренных широт с Атлантического океана, поэтому погода в течение суток неустойчива. Для района характерна продолжительная холодная зима (135-140 дней) и короткое теплое лето (безморозный период – 90-95 дней). В холодное время года на территории господствуют ветра юго-западного, южного и северо-западного направления. Поступление северо-западных воздушных масс приводит к значительному выпадению осадков, повышению температуры в зимнее время и понижению летом. Средняя температура января  $-15^{\circ}\text{C}$ , июля  $+17^{\circ}-18^{\circ}\text{C}$ . Снеговой покров (средняя высота 80-90 см) держится 170-180 дней. Вторжение южных циклонов вызывает зимой метели со снегопадами, гололеды, летом обильные дожди. Осадки в основном выпадают в летние месяцы, менее всего в феврале-марте. Нередко в первой половине лета наблюдается засуха. Летние осадки выпадают в виде кратковременных интенсивных дождей, иногда в виде ливней. Общий объем осадков 650-700 мм в год. В конце октября – начале ноября появляется устойчивый снеговой покров [4].

В географическом отношении данная территория относится к Восточно-Русской ландшафтно-геохимической провинции, к области денудационной равнины Предуралья и к району Соликамской равнины. В геологическом отношении она расположена в Предуральском краевом прогибе, в южной части Соликамской депрессии, в пределах Усть-Игумского соляного вала. Непосредственно под четвертичными отложениями здесь залегают нижнепермские отложения уфимского яруса (представленные шешминским и соликамским горизонтами), и филипповского горизонта кунгурского яруса [5].

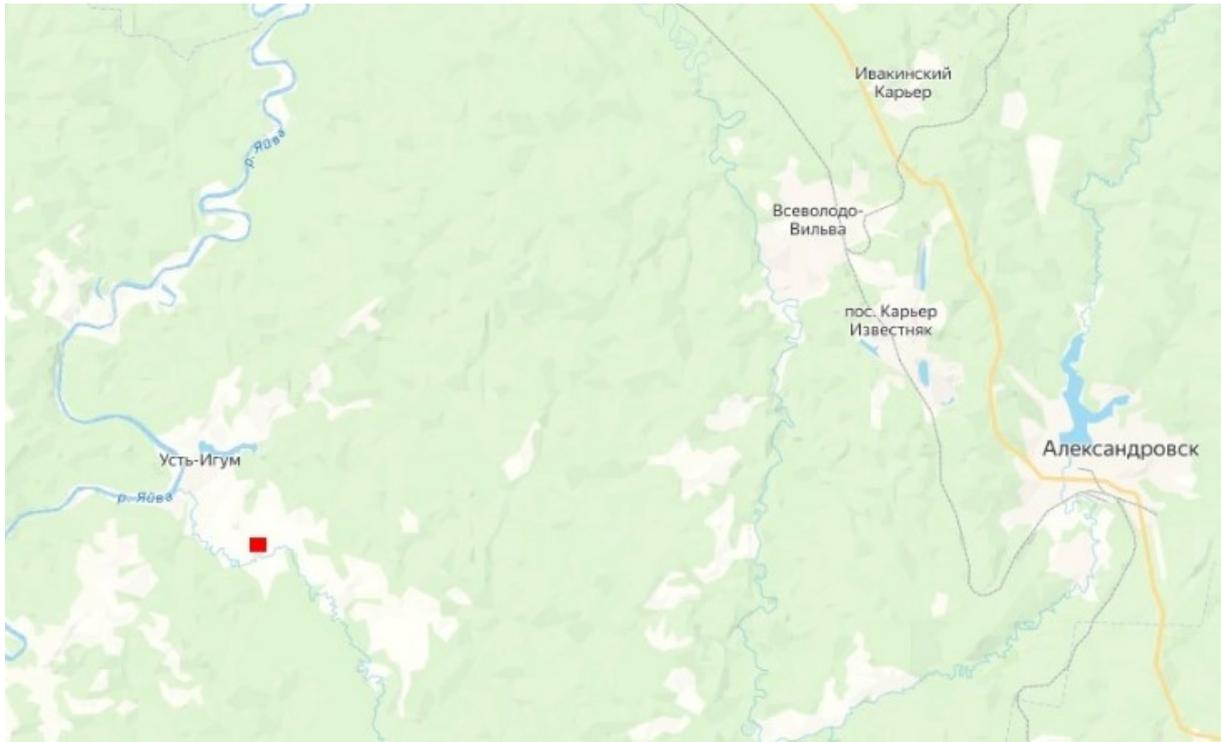


Рис. 1. Местоположение рассолоподъемных скважин (Александровский район, Пермский край)



Рис. 2. Расположение почвенных разрезов

Рельеф территории равнинный и низменный. По геоморфологическому районированию границы изучаемого участка входят в Приуральскую депрессию. Река Усолка принадлежит к Камско-Вишерскому округу. Основные черты округа: равнинный характер рек, большая залесенность, заболоченность и закарстованность бассейнов, мощные толщи легкоразмываемых аллювиальных накоплений, очень небольшие перепады высот, низкие речные берега и широкие долины, извилистость речных русел. Группа древних рассолоподъемных скважин расположена на правом берегу р. Усолка, левого притока р. Яйва. Пять скважин находятся на пойменной террасе в 80-120 м от р. Усолка. Скважины образуют два ручья, которые стекают в р. Усолка [2], рис. 2.

Полевые исследования проводились в июне 2023 г. На первоначальном этапе исследований было выкопано 4 почвенных разреза глубиной 110-130 см и 4 почвенных прикопки. Почвенные разрезы и прикопки располагали с правой и с левой стороны ручья, приблизительно на равной отдаленности от его русла. Расположение почвенных разрезов отражено на рис. 2.

Для изучения почв использовали полевой профильный метод. Описание почвенных профилей проводили в разгар интенсивного роста и развития подавляющего числа видов травянистых растений, многие из которых находились в начальной стадии цветения, а большинство злаков в стадии колошения. Для диагностики почвенных горизонтов использовали «Полевой определитель почв» [6]. Почвенные разрезы копали вручную, описание почвенного профиля выполняли по общепринятым методикам, используя сантиметровую ленту, нож, цилиндр для определения

влажности и плотности сложения, портативный рН метр и кондуктометр, 0,1N HCl, лупу. Отбор почвенных образцов проводили согласно ГОСТ 17.4.3.01-83 и ГОСТ 17.4.4.02-84 [7, 8].

В процессе описания растительности в местах закладки почвенных разрезов было отмечено, что из-за недостатка влаги в мае развитие наземной фитомассы и особенно высота травостоя явно находятся ниже нормы. Антропогенное влияние выражено в присутствии сорно-рудеральных видов (лопух паутинистый, крапива двудомная, пырей ползучий). Описание растительности в районе исследований включало число и обилие видов, структурированность травостоя (его расчлененность на горизонты практически нигде не выражена), степень проективного покрытия. Осоки и ситники отдельно не выделяли, поскольку в местах закладки разрезов они отсутствовали (но формировали сомкнутые сообщества вдоль воды и в понижениях с максимальным увлажнением). Для определения растений пользовались иллюстрированным определителем [9]. Сложные видовые агрегаты (роды Лютик *Ranunculus*, Манжетка *Alchemilla*) не разбирались до видов досконально (это совсем не входило в задачи исследования), они принимались *sensu lato*. Часть растений определяли только до рода.

Применяли общепринятые методики учета растений [10-12]. Для оценки обилия использовали широко применяемую в отечественной геоботанике шкалу Друде (табл. 1).

Таблица 1

Шкала Друде для оценки обилия вида в фитоценозе  
(с дополнениями А.А. Уранова)

Шкала обилия Друде	Среднее проективное покрытие, %	Расстояние между особями, см (по А.А. Уранову)
Вид встрече один раз Un ( <i>unicum</i> )	Менее 1	–
Вид растет рассеянно Sol ( <i>solitaria</i> )	3-5	Более 150
Вид обилен, но сплошного покрова не образует Sp ( <i>sparsae</i> )	10-20	100-150
Вид обилен Cop 1-3 ( <i>copiosae</i> )	Cop1 – 30-40 Cop2 – 50-60 Cop3 – 70-90	Cop1 – 400-100 Cop2 – 20-40 Cop3 – не более 20
Очень обильно, сплошь Soc ( <i>socialis</i> )	Более 95	Не более 10 см

В последние 15-20 лет при характеристике количественного участия видов в фитоценозе все чаще пользуются балльной шкалой обилия Браун-Бланке. В ней применяются следующие градации:

- г – вид встречается единично с проективным покрытием менее 1%;
- 0 – проективное покрытие вида – 1-5%;
- 1 – проективное покрытие вида – 5-10%;
- 2 – проективное покрытие вида – 10-25%;
- 3 – проективное покрытие вида – 25-50%;
- 4 – проективное покрытие вида – 50-75%;
- 5 – проективное покрытие вида более 75%.

Мы использовали оба этих метода. В описаниях растительности оценка обилия видов дана в соответствии с классами обилия в табл. 2.

Таблица 2

## Классификация обилия по шкалам Друде и Браун-Бланке

Класс обилия вида	Среднее проективное покрытие вида, %	
	по шкале Друде	по шкале Браун-Бланке
0	Менее 1	Менее 5
1	3-5	5-10
2	10-20	10-25
3	30-90	25-50
4	Более 95	50-75
5	–	более 75

## Описание и диагностика почв

Разрез № 1. Координаты расположения разреза N59°08'23.4060", E57°10'14.2644" (табл. 3).

Таблица 3

## Описание почвенного разреза № 1

Фото профиля	Фото слоя (в сухом состоянии)	Глубина слоя, см	Характеристика
		0-5	Дернина. Серый с оттенками коричневого и темно-серого, сухой, среднесуглинистый, структура комковатая угловатая, рыхлый, густо переплетен корнями растений, переход по цвету, граница ровная.
		6-15 (32)	Темно-серый, сухой, среднесуглинистый, комковато-ореховатый, пористый, рыхлый, имеются обломки кирпича менее 1 см, переход ясный по цвету.
		16-31 (33-45)	Светло-бурый с сероватым оттенком, свежий, тяжелосуглинистый, структура мелкокомковатая, на некоторых агрегатах слабо выражена слоистость. Имеются гумусовые затеки, немного корней, включения белые каменистые пористые белого цвета размером менее 1 см. Переход по структуре и цвету.
		34-48 (46-56)	Светло-бурый с желтоватым оттенком, окраска неоднородная с примесью агрегатов темно-серой окраски. Увлажненный, тяжелосуглинистый, сложение плотное. Структура ореховато-призматическая. Внутри агрегатов имеются охристые ржавые мелкие пятна. Имеются корни растений в небольшом количестве и углистые включения. Переход по плотности и окраске. Граница языковатая.
		71-110	Желтовато-бурый, влажный, тяжелый суглинок, структура непрочная, при высыхании ореховато-призматическая, сложение плотное имеются тонкие поры и микрослоистость, Переход в нижележащий горизонт по цвету.
		Более 110	Аллювиальная глеевая порода. Очень влажная. Выступает вода.

Правый берег р. Усолки, левый берег соленого ручья. Рельеф низменный равнинный.

Высокотравный пойменный луг с нормальным увлажнением. Общее проективное покрытие 100%. Высота травяного яруса – 50-60 см, его вертикальная структура не выражена. Травостой представлен почти исключительно злаковыми (пырей ползучий *Elytrigia repens* (L.) – 4, в фазе колошения), остальные отмеченные виды встречались гораздо реже (крапива двудомная *Urtica dioica* L. – 1; синюха голубая *Polemonium coeruleum* L. – 0; борщевик сибирский *Heracleum sibiricum* L. – 0; осот полевой *Sonchus arvensis* L. – 0). Моховой ярус отсутствует.

Глубина почвенного разреза составила 130 см. Почву с нижнего горизонта извлекали почвенным буром ввиду того, что в данном слое выступает влага. Порода имеет вязкое текучее состояние. Слой на глубине 34-48 см имеет неровную границу. В разрезе он находится на разной глубине – начало на 34-46 см, а его протяженность составила 10-12 см. Этот слой представляет интерес как погребенный верхний горизонт. В его составе обнаружены углистые включения.

**Разрез № 2.** Расположен в непосредственной близости от соленого ручья. Координаты N59°08'24.3816", E57°10'15.1896". Описание разреза – таблица 4.

Таблица 4

Описание почвенного разреза № 2

Фото профиля	Фото слоя (в сухом состоянии)	Глубина слоя, см	Характеристика
		0-3	Дернина, серо-бурый, рыхлый, структура комковато – угловатая, сухой, густо переплетен корнями растений, много органических остатков, граница ровная.
		3-10	Светло-серый с буроватым оттенком, сухой, легкосуглинистый, комковато-ореховатый, тонкопористый, рыхлый, имеются обломки кирпича менее 1 см, переход ясный по цвету. Граница волнистая.
		10-29 (19-39)	Светло-бурый с сероватым оттенком, свежий, тяжелосуглинистый, структура призматическая кубовидная, на агрегатах выражено ожелезнение, плотный, много корней, по корням наличие глея. Переход по структуре и цвету. Граница языковатая.
		30-41 (40-48)	Окраска неоднородная светло-серая. Увлажнен, рыхлый, переход неровный. Структура ореховато-призматическая с признаками микрослоистости. Имеются углистые включения. Переход по цвету и плотности.
		42-74 (49-70)	Желтовато-бурый, влажный, тяжелый суглинок, распадается на комки, структура не выражена, сложение плотное, имеются тонкие поры с ржавыми пятнами. Переход по цвету.
		70-92	Темно-серо-сизый неоднородный, влажный, вязкий, тяжелый суглинок, выражены грани структуры призматической формы, на гранях железистая оглеенность, плотный. Переход по цвету плавный. Граница затечная.
		92 и более (130)	Темно-серо-сизый, выступает вода, структура не выражена, вязкий, опесчаненный, сильно оглеенный.

Высокотравный луг-кочкарник с избыточным увлажнением в непосредственной близости от соляных источников (на левом берегу ручья).

Общее проективное покрытие не достигает 100% (около 80%). Травяной ярус представлен таволгой вязолистной *Filipendula ulmaria* (L.) в стадии бутонизации (3), гравилатом речным *Geum rivale* L. в стадии цветения (3), крапивой двудомной *Urtica dioica* L. (2). Единично отмечены злаки – 0, горичцвет кукушкин *Coronaria flos-cusculi* L. – 0. Общая высота травяного яруса – в пределах 70 см. Моховой ярус отсутствует.

При описании разреза № 2 отмечено, что во втором слое на глубине 8-10 см попадают обломки кирпича, мелкие, менее 1 см. В 4 слое так же имеются углистые включения, что дает возможность предположить наличие погребенного горизонта с глубины 30-40 см мощностью 8-11 см.

**Разрез № 3.** Правый берег соленого ручья. Расстояние от ручья 30 м. Координаты разреза N59°08'27.1392", E57°10'04.4904". Описание разреза в таблице 5.

Таблица 5

Описание почвенного разреза № 3

Фото профиля	Фото слоя (в сухом состоянии)	Глубина слоя, см	Характеристика
		0-5	Светло-серый, сухой, легкосуглинистый, структура ореховатая, рыхлый, густо переплетен корнями растений, переход по структуре.
		6-15	Светло-серый, сухой, легкосуглинистый, комковато-ореховатый, рыхлый, имеются обломки кирпича менее 1 см, переход ясный по цвету. Граница волнистая.
		16-26 (30-40)	Желтовато-бурый, свежий, тяжелосуглинистый, структура призматическая кубовидная, плотный, имеются корни хвоща болотного, по корням наличие глея. Переход по структуре и цвету. Граница карманная.
		37-48 (48-54)	Окраска неоднородная темно-серая. Увлажнен, рыхлый. Структура ореховато-призматическая. Имеются углистые включения, органические остатки дерева. Переход неровный по цвету и плотности. Граница языковатая.
		49-80 (54-80)	Желтовато-бурый, влажный, тяжелый суглинок, распадается на комки, структура не выражена, сложение плотное, имеются тонкие поры с ржавыми пятнами. Переход по плотности. Граница ровная.
		81-92	Темно-серо-сизый неоднородный, влажный, вязкий, тяжелый суглинок, опесчанен, плотный.
		92 и более (130)	Темно-серо-сизый, выступает вода, структура не выражена, вязкий, опесчаненный, сильно оглеенный.

Высокотравный пойменный луг с нормальным увлажнением. Общее проективное покрытие 100%. Число видов существенно выше, по сравнению с травостоем разреза 1. Высота травяного яруса – 50-60 см. Вертикальная структура не выражена. Преобладают злаки – лисохвост луговой *Alopecurus pratensis* L. в стадии колошения и начала цветения (4), мятлик луговой *Poa pratensis* L. (0). Отмечены: подмаренник мягкий *Galeum*

*mollugo* L. (2), хвощ болотный *Equisetum palustre* L. (1), крапива двудомная *Urtica dioica* L. (1), василек *Centaurea* sp. (? – 1), полынь обыкновенная *Artemisia vulgaris* L. (0), манжетка *Alchemilla* sp. (0), лопух паутинистый *Arctium tomentosum* Mill. (0), осот полевой *Sonchus arvensis* L. (0), борщевик сибирский *Heracleum sibiricum* L. (0), тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium* L. (0), зверобой пятнистый *Hypericum maculatum* Crantz (0), лютик едкий *Ranunculus acris* L. (0), герань луговая *Geranium pratense* L. (0). Моховой ярус отсутствует.

**Разрез № 4.** Правый берег соленого ручья. Расположен в непосредственной близости от ручья. Координаты N59°08'25.2888" E57°10'05.0124". Описание разреза представлено в таблице 6.

Таблица 6

## Описание почвенного разреза № 4

Фото профиля	Фото слоя (в сухом состоянии)	Глубина слоя, см	Характеристика
		0-6 см	Светло-серый, сухой, среднесуглинистый, структура ореховатая, рыхлый, густо переплетен корнями растений.
		7-15 см (7-18)	Серо-коричневый, сухой, среднесуглинистый, кубовидная структура, рыхлый, с множественными примесями корневых систем, переход волнистый постепенный (видно по структуре), граница неясная.
		16-33 см (19-37)	Желтовато-бурый, свежий, тяжелосуглинистый, структура ореховато-кубовидная, по граням рыжие затеки и палевая присыпка, плотный, имеются незначительные примеси корней. Переход по структуре и цвету. Граница языковатая.
		34-65 см (38-69)	Окраска серо-коричневая. Увлажнен, плотный. распадается на комки призматической формы. Тяжелый суглинок. Сложение плотное, имеются тонкие поры и слоистость. Переход неровный по цвету и плотности.
		65 (70)- 100 см	Темно-серо-сизый неоднородный, влажный, вязкий, тяжелый суглинок, плотный.
		Более 110 см	Темно-серо-сизый, выступает вода, структура не выражена, вязкий, сильно оглеенный.

Понижение на высокотравном пойменном лугу (на правом берегу ручья). Увлажнение нормальное. Общее проективное покрытие 100%. Высота травяного яруса – 50-60 см. Число видов в травостое минимально, преобладает лисохвост луговой *Alopecurus pratensis* L. в стадии формирования соломины (колошение – единично) – (5). Отмечены: крапива двудомная *Urtica dioica* L. (0), подмаренник мягкий *Galeum mollugo* L. (0), хвощ болотный *Equisetum palustre* L. (0), мелкие осоки *Carex* sp. (0). Моховой ярус отсутствует.

При описании разреза отмечены неясные переходы и границы горизонтов. Границы всех горизонтов неясные языковатые. В профиле нет углистых остатков. Ввиду наличия выступающей воды почву с нижнего слоя отбирали почвенным буром.

Для предварительной диагностики горизонтов и определения классификационной принадлежности почвы все характеристики горизонтов по четырем почвенным разрезам объединены в таблице 7, где дана их сравнительная характеристика.

Таблица 7

Сводная таблица характеристик почвенных горизонтов  
в районе излива соляных источников

Слой почвы	Мощность, см (средняя)	Описание	Буквенное обозначение	Название горизонта
1	3-5 (4)	Дернина. Серый, серо-бурый с оттенками коричневого и темно-серого, среднесуглинистый, структура комковатая угловатая, рыхлый, густо переплетен корнями растений, переход по цвету, граница ровная.	AJ	Светлогумусовый
2	7-26 (16)	От светло- до темно-серого, среднесуглинистый, примеси кирпича, корневых систем, переход волнистый, граница неясная.	EL или AU <sub>g</sub>	Элювиальный
3	10-20 (15)	От светло-бурого до желто-бурого, тяжелосуглинистый, структура призматическая, ореховато-призматическая или кубовидная, с признаками микрослоистости. На агрегатах выражено ожелезнение. Плотный, много корней, по корням наличие глея. Переход по структуре и цвету. Граница языковатая.	S	Солончаковый горизонт
4	8-14 (11)	Окраска неоднородная, от светло- до темно-серой. Увлажнен, рыхлый, переход неровный. Структура ореховато-призматическая с признаками микрослоистости. Имеются множественные углистые включения. Переход по цвету и плотности.	H	Погребенный горизонт
5	21-39 (30)	Тяжелый суглинок, распадается на комки структура не выражена, сложение плотное, имеются тонкие поры с ржавыми пятнами. Переход по цвету. Граница карманная.	G	Глеевый горизонт
6	11-39 (25)	Неоднородный по цвету, влажный, вязкий, тяжелый суглинок, опесчанен, плотный.	GC	Переходный
7	Более 92-110 (101)	Темно-серо-сизый, выступает вода, структура не выражена, вязкий, опесчаненый, сильно оглеенный.	C <sub>g</sub>	Аллювиальная глеевая порода

Слои почвы пронумеровали по порядку сверху вниз, мощность горизонтов брали среднюю по 4 разрезам. Для определения использовали только сходные характеристики.

Характер окраски, слоистость агрегатов, наличие глея и другие признаки указывают на поемный режим почвообразования. Наличие углистых включений мощностью 11 см указывает на присутствие в профиле погребенного горизонта. Глубина залегания таких горизонтов в профиле может сильно варьировать, они выделяются при полевом описании, но в типовую формулу профиля не включаются [6]. Таким образом, предполагаемый профиль почвы с учетом погребенного горизонта AJ (AU) – S – G – C. Для уточнения диагностической привязки необходимы дополнительные исследования.

В результате полевых исследований можно сделать вывод, что верхние горизонты сформированы на аллювиальной гумусовой глеевой почве. Верхние горизонты образовались относительно недавно. Дальнейшее их изучение позволит выявить особенности почвообразования на данной территории.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жебелев О.В. Соляной промысел // Геологические памятники Пермского края: энцикл. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2009. – С. 530-537.
2. Хайрулина Е.А., Митракова Н.В., Новоселова Л.В., Порошина Н.В. Трансформация почвенно-растительного покрова в результате влияния изливающихся древних рассолоподъемных скважин на территории Пермского края // Географический вестник. – 2021. – № 4 (59). – С. 113-129. – DOI: 10.17072/2079-7877-2021-4-113-129.
3. Память почв: почва как память биосферно-геосферно-антропогенных взаимодействий / отв. ред. В.О. Таргульян, С.В. Горячкин. – М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 687 с.: ил.
4. Александровск Пермский край: Историко-географич. справ.: сайт. – текст электронный. – URL: <https://aleksandrovsc.wordpress.com/>. (Дата обращения: 30.08.2023).
5. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
6. Полевой определитель почв России / РАСХН. – М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. – 182 с.: ил.
7. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. – Введ. 01.07.84 – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 4 с.
8. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – Введ. 01.01.86 – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 8 с.
9. Иллюстрированный определитель растений Пермского края / Овеснов С.А., Ефимик Е.Г., Козьминых Т.В. [и др.]. – Пермь: Кн. мир, 2007. – 742 с.: ил.
10. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах / [Н.И. Базилевич, А.А. Титлянова, В.В. Смирнов и др.]. – М.: Мысль, 1978. – 183 с.: ил.
11. Гришина Л.А., Самойлова Е.М. Учет биомассы и химический анализ растений: [учеб. пособие]. – М.: МГУ, 1971. – 99 с.
12. Карпачевский Л.О., Воронин А.Д., Дмитриев Е.А., Строганова М.Н., Шоба С.А. Почвенно-биогеоценотические исследования в лесных биогеоценозах. – М.: МГУ, 1980. – 160 с.

УДК 551.736:56

DOI:10.7242/echo.2023.4.3

## ПАЛЕОЭКОЛОГИЯ И ПАЛЕОИХНОЛОГИЯ НИЖНЕПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ РАЙОНА Г. КРАСНОУФИМСК (СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛ.)

С.В. Наугольных<sup>1</sup>, Д.В. Наумкин<sup>2</sup><sup>1</sup>Геологический институт РАН, г. Москва<sup>2</sup>Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** В статье рассмотрены различные аспекты палеоэкологии и палеоихнологии по материалам из отложений артинского яруса (саргинский горизонт, дивьинская свита), обнажающихся в окрестностях г. Красноуфимска (Свердловская область). Установлены два новых ихнотаксона: *Spiralovermetus socialis* Naugolnykh Ichnogen. et Ichnosp. nov., *Aidomonstrum monstrosum* Naugolnykh, Ichnogen. et Ichnosp. nov.

**Ключевые слова:** пермская система, артинский ярус, саргинский горизонт, дивьинская свита, музей карста и спелеологии, палеоэкология, палеоихнология, новые ихнотаксоны.

### Введение

Настоящая работа посвящена истории изучения нижнепермских (преимущественно, артинских) отложений г. Красноуфимска и Красноуфимского района Свердловской области, номенклатуре принимаемых стратиграфических подразделений, стратиграфическому расчленению и корреляции этих отложений, а также тафономическим и палеоэкологическим наблюдениям и выводам авторов.

Именно на основе изучения разрезов, расположенных в черте г. Красноуфимска и его ближайших окрестностях, была создана шкала артинского яруса и, отчасти, кунгурского яруса, а также разрабатывалась и уточнялась стратиграфия нижнего отдела пермской системы в целом, отрабатывались новые методические приемы в составлении геологических карт и корреляционных схем пермской системы (см. подробнее: [1-2]). Однако детальных данных о строении геологических разрезов отложений артинского яруса этого района было опубликовано очень мало. Об этом, например, весьма красноречиво пишет Б.И. Чувашов [3, с. 243]: «...В литературе по стратиграфии пермской системы мы не имеем подробных описаний разрезов г. Красноуфимска».

Часть представленных в статье материалов ранее была опубликована одним из авторов в сокращенном виде и без русского эквивалента [4].

### Исторический обзор

Стратиграфии и палеонтологии пермских отложений, обнажающихся в пределах г. Красноуфимска и в его ближайших окрестностях, посвящен целый ряд публикаций. К концу девятнадцатого века в целом сложились общие представления о последовательности отложений пермского возраста в Приуралье и, в частности, в бассейне р. Уфы (полную историографию см. в [5]). Так, например, профессор Казанского университета А.А. Штукенберг для бассейнов рек Чусовой и Уфы (138 лист геологической карты России) предлагал следующую стратиграфическую последовательность: артинский ярус – песчаники, конгломераты и глинистые сланцы с многочисленными растительными остатками и остатками морских беспозвоночных (преимущественно, аммоноидей); кунгурский ярус, толща (а) – ноздреватый известняк, фациально переходящий в песчанистый известняк, с фауной фузулиид и криноидей (по современной номенклатуре соответствует шуртанской свите саранинского горизонта); толща (b) – известковый плитняк с фораминиферами (по современной номенклатуре соответствует филипповской свите и ее аналогам в составе филипповского горизонта); толща (c) – мергелистый известняк, переслаивающийся с доломитами [6].

Среди детальных работ по стратиграфии и палеонтологии Красноуфимска в первую очередь следует назвать удивительную по полноте и качеству проработки материала монографию Г.Н. Фредерикса [7], выдающегося геолога и палеонтолога, судьба которого сложилась трагически [8; 9]. В монографии Г.Н. Фредерикса были как охарактеризованы формы, описанные ранее другими исследователями, так и описаны и изображены новые таксоны, важные для палеонтологии Красноуфимска: гастроподы *Pleurotomaria* (?) cf. *marconiana* Geinitz, *P.* cf. *grayvillensis* New. et Pratt., *Bulimorpha inornata* Meck. et Worthen, *Macrochilina halliana* Geinitz, *Straparollus minimus* Stukenberg, двустворки *Lima krotovi* Stukenber, *Avicula* sp., *Pterinopecten serdobovae* Frederix, *P. licharevi* Frederix, *P. pseudoradiatus* Frederix, *P. krotovi* Frederix, *Aviculopecten uralicus* Frederix, *Streblapteria* (?) *krasnoufimskensis* Frederix, *S.* (?) *hindiana* Frederix, *Parallelodon* spp., *Edmondia tchernyschewiana* Frederix, *E. gibbosa* Geinitz, *Schizodus rotundus* Brown, мшанки *Fenestella veneris* Fischer, *F. eichwaldi* Stukenberg, *F. plebeja* M'Coy, *F. bifurcata* Fischer, *Phyllopora porosa* Eichwald, *Ph.* (?) *macropora* Eichwald, *Fenestipora foraminosa* Eichwald, *Polypora goldfussi* Eichwald, *P. cyclopora* Eichwald, *P. dendroides* M'Coy, *P. orbicribrata* Keyserling, *P. ornata* Waag. et Pichl., *P. kutorgae* Stukenberg, *Phyllopora porosa* Eichwald, брахиоподы *Camarophoria verneuiliana* Grünwaldt, *Streptorhynchus hallianus* Derby, *Pugnax utah* (Marcou), *Dielasma mülleri* Tschernyschew, *D. itajtubense* Derby, *Rhynchopora variabilis* Stukenberg, *Chonetes dalmanoides* Nikitin, аммоноидеи (гониатиты) *Paragastrioceras jossae* (Verneuil) var. *elipsoidalis* Frederix, “*Gastrioceras*” *karpinskii* Frederix, трилобиты *Griffitides grünwaldti* Möller и многие другие (в списке, приведенном выше, даны исторические названия таксонов, без учета изменившейся номенклатуры).

В известном труде М.Д. Залесского «Пермская флора Уральских пределов Ангариды» [10] был изображен целый ряд ископаемых растений пермского возраста из окрестностей Красноуфимска: *Psygtophyllum cuneifolium* (Kutorga) Schimper (местонахождение Криулино; Залесский, 1927, табл. XXXIII, фиг. 8; этот экземпляр, по нашему мнению, следует отнести к другому виду: *P. intermedium* Naugolnykh; [11]), *P. expansum* (Brongniart) Schimper (местонахождение Криулино; Залесский, 1927, табл. XXXIV, фиг. 1, 2, 5; с. Куторы, р. Уфа, Красноуфимский район; Залесский, 1927, табл. XXXV, фиг. 3), *Pecopteris* sp. (р. Зюрзя, мельница Голубцовых; по современной номенклатуре – местонахождение Александровское, см. Залесский, 1927, табл. XXXIV, фиг. 6), *Dicranophyllum lusitanicum* Lima f. *kriulinensis* Zalessky (местонахождение Криулино; Залесский, 1927, табл. XXXIV, фиг. 7); все эти растительные остатки происходят из кунгурских отложений.

М.В. Круглов [12] и С.С. Осипов [13] показали, что артинские и кунгурские карбонатные отложения Уфимского плато в восточном направлении фациально замещаются терригенными отложениями.

В эти же годы вышла серия блестящих статей А.П. Карпинского, посвященных геликоприонам *Helicoprion bessonowi* Karpinsky (библиографию работ по этой теме см. в [14; 15]), зубные спирали которых были найдены А.Г. Бессоновым, инспектором народных училищ Красноуфимского уезда в Красноуфимске и его окрестностях. Подробный историографический анализ вклада А.П. Карпинского в изучение стратиграфии и палеонтологии пермских отложений Приуралья дан в монографии С.И. Романовского [16].

В.Д. Наливкин [1-2] дал подробный анализ стратиграфии, тектоники, фаций пермских отложений Уфимского плато и предложил реконструкцию последовательности геологических событий при его формировании. К восточной части Уфимского плато примыкает Красноуфимский район. В этих работах дано биостратиграфическое обоснование возраста саргинских рифов: «Возраст саргинских рифов определяется залеганием их на иргинских известняках, охарактеризованных формой *Parafusulina lutugini* (Schellw.) и встречающимися в самих рифах *Parafusulina solidissima* Raus. и *Pseudofusulina makarovi* Raus. [1, с. 156]. Подробное рассмотрение соотношения иргинского, саргинского, саранинского и филипповского горизонтов, а также шуртанской и камайской свит, приведено ниже.

Д.Л. Степанов [17], обсуждая вклад Г.Н. Фредерикса в разработку стратиграфии пермских отложений Приуралья, справедливо отметил, что «ряд названий установленных им стратиграфических единиц, как иргинские, саргинские, дивьинские, сарсинские слои и др., сохранились в литературе по Уфимскому плато» [17, с. 11], одновременно указав на то, что некоторые из положений Фредерикса оказались ошибочными. Тем не менее, именно на схеме Фредерикса были основаны позднее предложенные схемы расчленения артинских отложений Урала. Так, например, в схеме Д.М. Раузер-Черноусовой [18] для отложений артинского яруса использованы иргинский и саргинский горизонты, предложенные Фредериксом.

Обобщенная характеристика мергелей дивьинской свиты и саргинской свиты (саргинских рифов) дана в крупной стратиграфической сводке «Пермская система» [19, с. 221] и в более полной форме приведена в соответствующем томе Стратиграфического словаря СССР [20].

Весьма содержательный профиль, показывающий соотношение глинистых и карбонатных осадков в разрезах у г. Красноуфимск и распределение в них различных групп ископаемых организмов, опубликован Б.И. Чувашовым [21, с. 100, рис. 30]. На профиле прекрасно видно, что на некоторых участках глинистые отложения межрифового заполнения, соответствующие дивьинской свите, фациально замещаются органогенными

рифовыми отложениями, а на других участках согласно перекрывают их, что указывает на некоторую гетерохронность образования рифовых тел. Такие же латеральные переходы мергелей дивьинской свиты и органогенных известняков саргинской свиты показаны и в других работах Б.И. Чувашова [22, рис. 7, 8].

Б.И. Чувашов с соавторами [3] приводит следующую биостратиграфическую характеристику артинских отложений, непосредственно обнажающихся в ближайших окрестностях г. Красноуфимска. Иргинский горизонт: (обнажения у дома отдыха «Сарана»): конодонты *Neostreptognathodus pequopensis* Behnken, *Neogondolella bisselli* (Clark et Behnken); фузулиниды *Pseudofusulina concessa* Viss., *P. paraconcessa* Raus., *P. uralensis* (Raus.), *P. juresanensis* Raus. и др.; саргинский горизонт, дивьинская свита (разрез Рябиновый лог, без послонной привязки, известняковые прослои; послонное описание этого разреза позднее было опубликовано одним из авторов [23]: фузулиниды *Pseudofusulina solida* (Schellw.), *P. uralensis* (Raus.), *Parafusulina solidissima* Raus., *P. tschussovensis* Raus., (мергели и глинистые известняки): аммоноидеи *Artinskia* sp., *Medlicottia orbygnyana* (Vern.), *Paragastrioceras karpinskii* (Fred.), *P. ellipsoidae* (Fred.), *Uraloceras* sp., конодонты *Sweetognathus whitei* (Rhodes), *Neostreptognathodus* aff. *exculptus* Igo, *N. pequopensis* Behnken, *Neogondolella bisselli* (Clark et Behnken).

Данные о микрофациях дивьинской и саргинской свит в контексте развития раннепермских карбонатных органогенных построек Приуралья опубликованы О.Л. Коссовой с соавторами [24].

### Материал

В основу работы были положены личные сборы и наблюдения авторов, ведущиеся в Красноуфимском районе практически с 1984 г. по настоящее время с небольшими перерывами. Кроме этого, были использованы ископаемые остатки, хранящиеся в Красноуфимском краеведческом музее (г. Красноуфимск, Свердловская область) и музее Горного института (г. Екатеринбург, Свердловская область).

Помимо упомянутых выше коллекционных материалов, довольно обширные сборы морской фауны артинского возраста из окрестностей г. Красноуфимска имеются в составе палеонтологической коллекции ведомственного Музея карста и спелеологии Горного института УрО РАН. Они начали поступать в музей с 2014 г., после того, как в г. Красноуфимске стали проходить регулярные палеонтологические коллоквиумы с полевыми выездами для сбора материалов [25; 26]. В рамках настоящей статьи кратко охарактеризована морская составляющая наших сборов из разрезов и местонахождений этого района (палеоботанические материалы, основанные на коллекции ископаемых остатков наземных растений, описаны в отдельной публикации: см. [27]). Коллекторы: Д.В. Наумкин, Н.В. Лаврова, О.И. Осетрова (ГИ УрО РАН); О.В. Абросимова, А.Д. Жержевский (г. Красноуфимск); К.А. Добрянских (г. Пермь). Образцы происходят из местонахождений Красноуфимские Ключики, Соболя, Пудлинговский карьер, Желтый камень, Артя-Шингири, а также непосредственно с территории г. Красноуфимска (Свердловская об.). Хронологические рамки сборов ограничены последним десятилетием – 2014-23 гг.

Всего в настоящее время на музейный учет Музея карста и спелеологии Горного института УрО РАН поставлены 53 единицы хранения палеонтологических образцов из района Красноуфимска, в подавляющем большинстве – морских беспозвоночных (за единственным исключением – зуб акулы *Hybodus* sp.) артинского века красноуфимского Приуралья. В таксономическом отношении они представлены (по убыванию) головоногими моллюсками (17 единиц хранения), брахиоподами (15 единиц хранения), губками, двустворчатыми моллюсками, трилобитами, иглокожими (морские лилии), мшанками, кишечнополостными (конулярии) и фораминиферами (фузулиниды). Пред-

ставители головоногих относятся к родам *Uraloceras*, *Paragastrioceras*, *Artinskia*, наутилоидеям *Metacoceras* и *Dolorthoceras*. Брахиоподы – в основном представители отрядов Productida, Spiriferida и Terebratulida. Поздние трилобиты представлены одним видом *Ditomopyge artinskiense* (Weber).

Многие экспонаты артинской коллекции отличаются крупными размерами и повышенной аттрактивностью [28]. Несмотря на очень ограниченные экспозиционные возможности музея, подборка таких образцов, выставленных сегодня в его постоянной экспозиции, насчитывает 22 экземпляра. Половина из них демонстрируется в тематической витрине «Пермь в Кунгуре», посвященной исключительно палеонтологии пермской системы, подготовленной с целью популяризации палеонтологического природного наследия Уральского региона [29].

### **Некоторые свиты нижней перми Урала. Данные по стратотипам и протологам**

**Камайская свита.** В первоначальном смысле при выделении/установлении камайской свиты ее автор В.Д. Наливкин обособил ее в качестве части иргинской свиты Г.Н. Фредерикса:

«Впервые под названием «иргинского горизонта» Г.Н. Фредериксом [...] были выделены слоистые, кремнистые известняки, обнаженные в основании склонов р. Иргины, возле Н.-Иргинского завода, и вдоль бичевника р. Уфы ниже дер. Чигвинцево. Но, как показали исследования последних лет, к иргинской свите, как понимают ее большинство исследователей, относятся лишь обнажения по р. Уфе. Возле Н.-Иргинского завода выходят более молодые отложения – камайская свита кремнистых известняков. Учитывая, что термин «иргинский горизонт» прочно вошел в литературу и то, что к нему Г.Н. Фредерикс относил также обнажения по р. Уфе, я оставляю его, уточняя лишь районы распространения и **выделяя из него камайскую свиту** саранинского горизонта (п-ж курсив здесь и далее дан авторами настоящей статьи) [1, с. 25].

Таким образом, нарушена логика стратиграфических исследований, поскольку исторический стратотип иргинского горизонта (свиты) находится именно в бассейне р. Иргины у Нижне-Иргинского завода (ныне с. Нижнеиргинское).

В формальном первоописании камайской свиты В.Д. Наливкин приводит следующие сведения:

«Камайская свита кремнистых известняков. Названа мною по имени дер. Камаи, расположенной на левом берегу р. Сылвы, между Кунгуром и с. Усть-Кишерть. Здесь находятся одни из лучших обнажений и видно ее залегание под сылвенскими водорослевыми рифами. Здесь же были сделаны большие сборы мшанок и брахиопод. Эта свита соответствует и нижней части мижуевской свиты Б.В. Милорадовича и В.И. Носаль, а также **иргинским известнякам**, которые многие исследователи выделяли по р. Сылве, между с. Усть-Кишерть и с. Филипповским. **К ней же относится иргинский горизонт**, выделенный Г.Н. Фредериксом [...] возле Н.-Иргинского завода и по р. Саране» И, далее: «Камайская свита совершенно постепенно сменяет вверх по разрезу иргинскую. Граница между ними проводится по исчезновению фузулинид. Кроме этого, первая характеризуется своим особым комплексом мшанок и брахиопод (каким именно, не указано – С.Н.). **К востоку камайская свита фациально переходит в дивью** [1, с. 35].

На то, что камайские известняки должны относиться к саргинскому горизонту, косвенно указывает и сам Наливкин:

«**Саргинские рифы** [...] располагаются на иргинских известняках и фациально переходят в дивью мергели или на западе в глинистые иргинские известняки и **окремненные камайские известняки**» [1, с. 32].

В.П. Горский (цит. по: [20]) приводит следующую характеристику камайской свиты: «Стратотип – устье Камайского лога, между ж.-д. ст. Чикали и Кишертъ, лев. берег р. Сылва. Известняки слоистые окремненные с тонкими пропластками мергеля. М. (мощность – С.Н.) 30-80 м. Содержит *Batostomella tschikaliensis* Trizna, *B. ermakensis* Trizna, *Rhombotripella kamajensis* Trizna, *Polypora mariae* Ravik., *P. sargaensis* Trizna, *Fenestella neoforaminosa* Trizna, *Chaoiella gruenewaldti* Krot., *Costiferina orientalis* Frcks, *Waagenoconcha irginae* Stuck., *Linoproductus cora* d'Orb., *Paucispinifera septentrionalis* Tschern., *Spiriferella salteri* Tschern. Залегают согласно на иргинской св., перекрывается согласно сылвенскими рифами или шуртанской св. Относится к верхам артинского яр.» (цит. по: [20, с. 170]).

Из этого текста прямо следует, что камайская свита должна относиться к саргинскому горизонту, поскольку согласно залегают на иргинских отложениях.

**Шуртанская свита.** Первоначальная характеристика шуртанской свиты, приведенная в протологе, содержит следующие сведения:

«Шуртанская свита глинистых известняков. Эта свита названа мною по имени р. Шуртан, где она впервые была выделена. [...] Лучшими обнажениями шуртанской свиты, как выяснилось после недавних работ В.П. Пнева, являются каменоломни, расположенные на западной и южной окраинах с. Н. Иргины (ныне – с. Нижнеиргинское). Кроме того, она обнажена на левом берегу р. Шуртан в 3 км ниже с. В. Шуртан, в ряде мелких обнажений по рр. Шуртан, Иргине, а также по р. Сылве, между сылвенскими рифами. [...] Шуртанская свита залегают с постепенным переходом на камайской и фациально замещает сылвенские рифы. Кверху она без перерыва сменяется филипповской свитой. В западной части Уфимского плато, где шуртанская свита становится в основном известняковой, отчетливое выделение ее возможно только вблизи сылвенских рифов. Вдали же от них, особенно где сильно развито окремнение, **отделить ее от камайских известняков трудно, и граница между ними становится условной** [1, с. 37].

Возникает естественный вопрос, а как же тогда распознается шуртанская свита со стратотипом на р. Шуртан в районе сылвенских рифов?

Б.К. Лихарев и В.П. Горский (цит. по: [20]) приводят следующую характеристику шуртанской свиты:

«Лучшие обнажения по рекам Сылва, Иргина (у сел Нижнеиргинск), Шуртан. Известняки глинистые, местами окремненные, в верх. части нередко фукоидные. М. (мощность – С.Н.) 5-20 м. Содержит *Chaoiella gruenewaldti* Krot., *Waagenoconcha irginae* Stuck., *Spiriferella saranae* Vern., *Paraparchites sylvaensis* Guss., *P. delicatus* Kotsch., *Healdia distributa* Guss., *Miscrocoeloenella consueta* Kotsch., *Bairdia cumulata* Guss. Залегают согласно на камайской св., перекрывается согласно филипповской св. Фациально замещает сылвенские рифы. Относится к саранинскому гор. артинского яр., или, по другим данным, – кунгурского яр.» (в: [20, с. 442]).

Приведенных выше примеров достаточно, чтобы понять, что ситуация с типизацией основных стратиграфических подразделений верхней части нижнего отдела пермской системы в ранге свит и горизонтов в пределах Среднего Приуралья далека от совершенства. В этих обстоятельствах единственной возможностью добиться максимально корректной стратиграфической привязки палеонтологических образцов является посылное описание изученных разрезов с точным указанием уровня отбора образцов [30]. Именно этой исследовательской тактике и придерживаются авторы настоящей статьи.

### Палеоэкологические наблюдения

Во всех представительных разрезах в пределах Красноуфимска и его окрестностей (рис. 1, 2), в которых обнажаются плитчатые мергели дивьинской свиты, можно услов-

но выделить три пачки: нижнюю пачку темно-бежевых мергелей (LP), с максимальной наблюдаемой мощностью 6 м (разрез Соболя); среднюю пачку серых и синевато-серых мергелей (MP) мощностью от 1 м (разрез Красноуфимские Ключики) до 2 м (разрез Соболя) и верхнюю пачку светло-бежевых и кремовых мергелей (UP), мощность которой равна или превышает 4 м (см. рис. 1, фиг. 3).

Наличие синевато-серой пачки плитчатых мергелей (пачки MP) с максимальным разнообразием органических остатков во всех наиболее полных и представительных из изученных разрезов (Красноуфимские Ключики, За Селекцией, Соболя) указывает на эпизод эвтрофикации морской лагуны, в которой происходило осадконакопление.

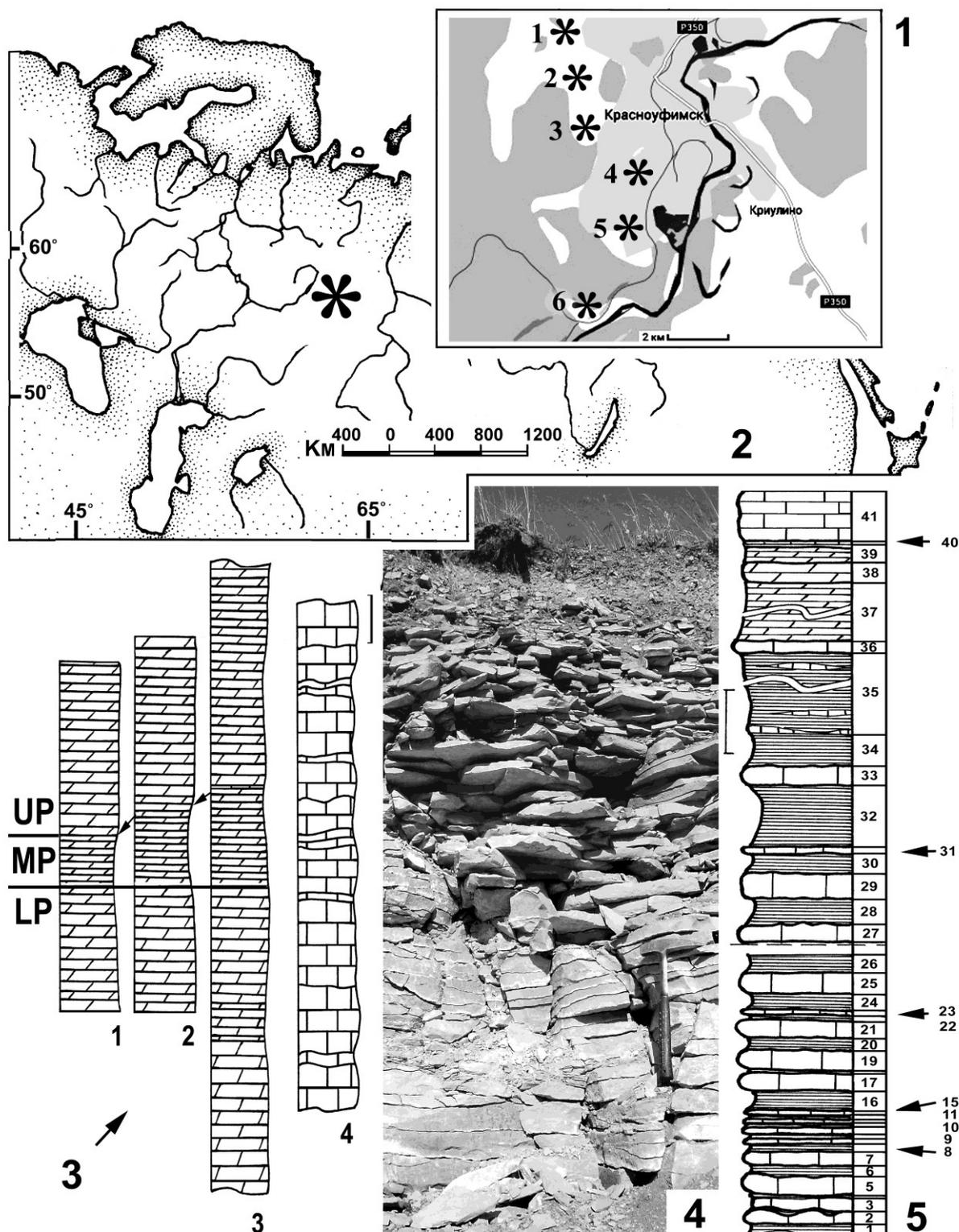
Кратко причинно-следственные связи этого эпизода можно обозначить следующим образом: (1) тектоническое поднятие; (2) интенсификация сноса (в слое появляются гальки); (3) усиление сноса с суши биогенов и макромерных растительных остатков; (4) эвтрофикация лагуны; (5) полное развитие биоценоза, развитие максимальной длины трофических цепей (аннелиды – прикрепленный и подвижный макробентос – нектон, аммоноидеи – крупные рыбы; подробнее см. ниже). Далее происходит стабилизация сноса, приводящая к олиготрофикации лагуны, сокращению биоразнообразия и редукции пищевых цепей.

На разрезе Соболя, также известном как карьер Солнечный (см. выше), одним из авторов (– С.Н.) в 2012 г. был произведен площадной подсчет органических остатков с применением техники для вскрытия учетных площадок и с разбивкой их на квадраты в соответствии с топопланом (рис. 2, фиг. 4, 5).

При расчистке использовался бульдозер, предоставленный МУП Горкомхоза г. Красноуфимска (механик-водитель Крашенинников В.В.). Расчистка производилась на двух уступах карьера: 2-м и 3-м снизу. На втором уступе была расчищена площадь 5000 кв. м, на третьем уступе – 4375 кв. м.

Вся площадь сделанных расчисток была разделена на учетные квадраты со сторонами 25 м (каждый площадью 625 кв. м). В пределах каждого квадрата при подсчете учитывались все макромерные органические остатки. Мелкие фрагментарные акцессории при подсчетах не учитывались. Определение органических остатков производилось преимущественно до рода. Всего было подсчитано 95 органических остатков. На втором снизу уступе (учетная площадка А) подсчитано 78 органических остатков. Литологически, отложения, обнаженные в ходе зачистки второго уступа, представлены синевато-серыми плитчатыми, реже массивными мергелями пачки MP (см. выше). Из ископаемых остатков на втором уступе доминируют целые раковины гониатитов рода *Uraloceras* – 44 экз. Кроме многочисленных уралоцерасов, найдены единичные экземпляры спиральных раковин наутилоидей *Metacoceras* (2 экз.), раковины аммоноидей *Paragastrioceras* (8 экз.), раковины ортоцератоидей *Dolorthoceras siphonocentralis* (Krotov) (3 экз.), фрагменты побегов ископаемых голосеменных растений (17 экз.) и изолированные семена *Ovalocarpus* (4 экз.). При анализе распределения органических остатков по площади учетной площадки намечается отчетливая тенденция к уменьшению количественного участия остатков *Uraloceras* в восточном направлении с одновременным увеличением доли макромерных растительных остатков голосеменных, представленных фрагментами побегов и семенами, в этом же направлении.

На третьем снизу уступе (учетная площадка В) было подсчитано 17 органических остатков. Литологически вмещающие отложения представлены желтовато-белыми и светло-кремовыми плитчатыми мергелями пачки UP (см. выше). Как и на первой учетной площадке, на площадке В безусловными доминантами являются раковины *Uraloceras* (9 экз.). За ними по доле количественного участия идут остатки побегов голосеменных (6 экз.). Также встречены единичные раковины *Dolorthoceras siphonocentralis* (Krotov) (1 целый экз.) и семязачаток *Ovalocarpus* (1 экз.). Как и на втором уступе (учетной площадке А), здесь намечается отчетливый тренд в увеличении количества растительных остатков в восточном направлении, а раковин *Uraloceras* – в западном направлении.

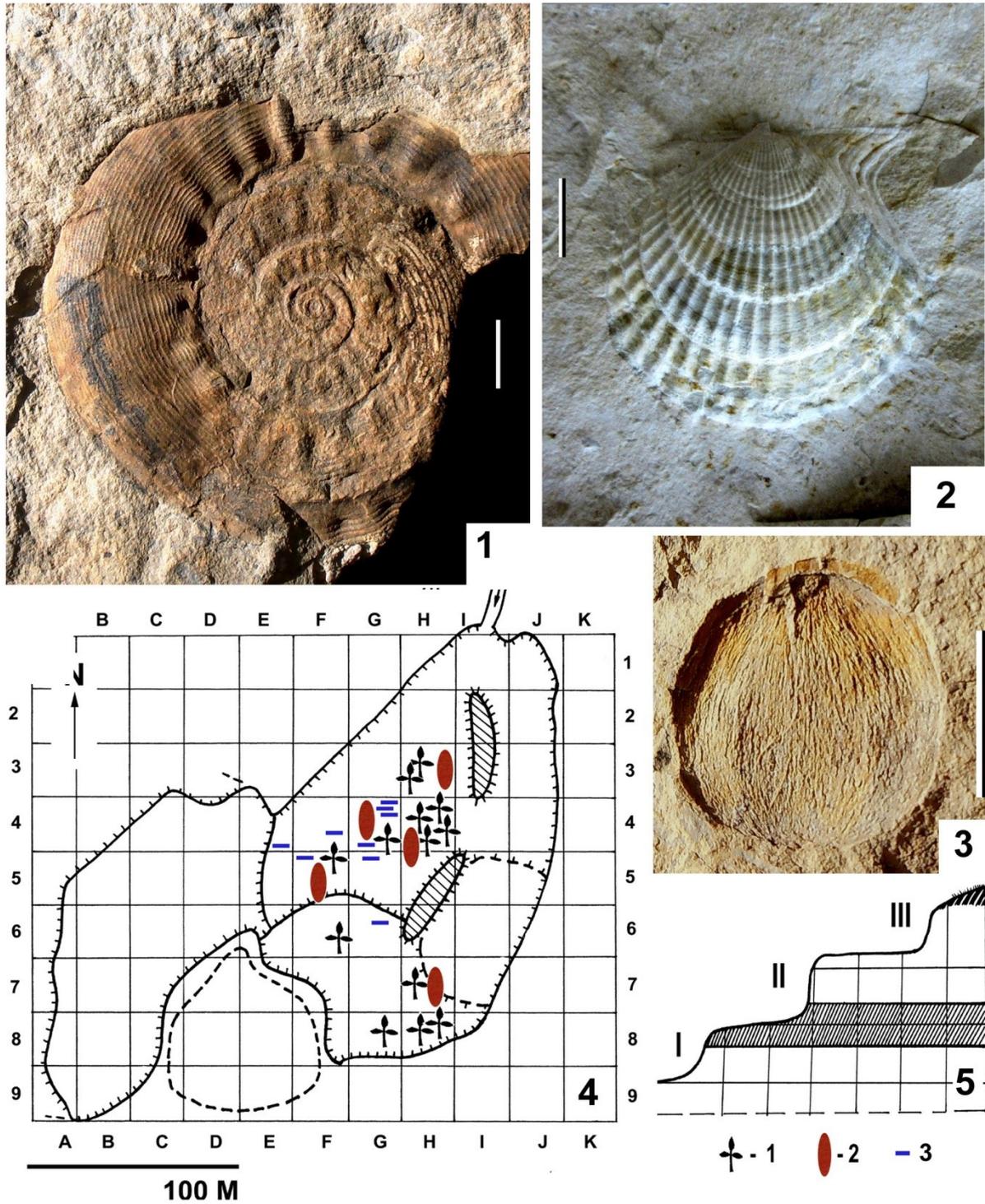


**Рис. 1.** Географическое и стратиграфическое расположение изученных разрезов.

1 – расположение разрезов в г. Красноуфимске и в его ближайших окрестностях:

1 – (1) Красноуфимские Ключики; (2) За Селекцией; (3) Верхнее Никитино; (4) Дивья гора; (5) Соболя;

(6) Рябиновый Лог; 2 – район исследований; 3 – стратиграфические колонки основных изученных разрезов: (1) Красноуфимские Ключики; (2) За Селекцией; (3) Соболя; (4) – верхняя часть разреза Соболя; 5 – послойное расчленение разреза Рябиновый Лог. Длина масштабной линейки для фиг. 3 и 5 – 1 м; на фиг. 1 и 2 масштаб дан на фигурах; на фиг. 4 для масштаба показан геологический молоток



**Рис. 2.** Некоторые представители дивинской палеобиоты и планиграфическое распределение некоторых ископаемых остатков на среднем и верхнем уступах карьера Соболя.

1 – *Paragastrioceras* sp. (местонахождение – карьер Соболя); 2 – пектиноидный двустворчатый моллюск (местонахождение – Пудлинговский карьер); 3 – *Ovalocarpus ovoides* Naugolnykh (местонахождение – Красноуфимские Ключики); 4, 5 – учетная площадка в карьере Соболя и планиграфическое некоторых распределение ископаемых остатков (подробные объяснения см. в тексте).

Условные обозначения для фиг. 4: 1 – крупномерные растительные остатки; 2 – семена *Ovalocarpus ovoides* Naugolnykh; 3 – фрагменты древесины. Длина масштабной линейки для фиг. 1-3 – 1 см

Захоронение органических остатков как в пределах учетной площадки А, так и на учетной площадке В, происходило на дне относительно глубокой лагуны (с глубинами до 50-70 м), очевидно, на границе или ниже границы фотической зоны, что препятствовало развитию бентосных организмов, и в особенности тех, которые образуют устойчивые симбиотические связи с фотосинтезирующими организмами (прежде всего, симбиотическими водорослями). Основную биомассу и, далее, мортмассу формировали илоеды (см. раздел «Трофические связи компонентов дивьинской палеоэкосистемы»).

### Основные экологические группировки

#### (1) Зарывающийся подвижный бентос

Безусловно, основной объем биомассы в фации межрифового бассейна в Красноуфимском саргинском (дивьинском) биоме продуцировали относительно небольшие, но очень многочисленные червеобразные организмы, оставившие следы своей жизнедеятельности практически во всей толще плитчатых мергелей (мергелей дивьинской свиты саргинского горизонта) Красноуфимска и его окрестностей. К сожалению, точная таксономическая принадлежность этих организмов остается неопределенной. Исходя из типологической экстраполяции со следами жизнедеятельности близкой морфологии, известными из отложений близкого возраста и генезиса, можно предположить, что организмы, оставившие эти следы, могли принадлежать морским кольчатым червям – аннелидам. В описательной части настоящей работы один из морфотипов этих следов описан в качестве новых ихнорода и ихновида *Spiralovermetus socialis Naugolnykh, Ich-nogen. nov. et ichnosp. nov.*

Большое количество следов ползания аннелид, которые буквально переполняют дивьинские плитчатые мергели (рис. 3, фиг. 1-5), со всей определенностью показывает, что биомасса животных, оставивших эти следы, была очень значительной. Разумеется, такой богатый и относительно легкодоступный пищевой ресурс не мог быть невостребованным в дивьинском палеобиоценозе. По мнению авторов, именно аннелиды, доминировавшие в составе зарывающегося подвижного бентоса красноуфимской палеоэкосистемы, были трофической базой существования крупных хрящевых рыб из группы эвгенеодонтид – геликоприонов (рис. 5, 6, фиг. 3, 4) и, возможно, других их ближайших родственников.

Как и некоторые современные хрящевые рыбы, обладающие рострумами (например, рыба-пила *Pristis pectinatus* Latham), геликоприоны могли «выпахивать» своей симфизной зубной спиралью из грунта аннелид и других мелких беспозвоночных, а затем поглощать их, втягивая в ротовую полость. Эта гипотеза была высказана Б.И. Чувашовым [22, с. 19] и позднее подтверждена находками предполагаемых следов от симфизных спиралей, оставленных на плотном дне и найденных в верхнеартинских отложениях у с. Поташка Артинского района Свердловской области [31, с. 21, табл. IX, фиг. 1]; см. здесь рис. 6, фиг. 2, 5, где встречаются и симфизные спирали геликоприонов [1]. Бентосные организмы, в отличие от аннелид, обладавшие раковинами, сначала попадали на боковые дробящие зубы геликоприонов, где раковины раздавливались или раскалывались. Однако зубная спираль могла использоваться и как режущий инструмент при смыкании нижней и верхней челюстей [15]. Об этом красноречиво свидетельствуют находки раковин аммоноидей с залеченными прямыми шрамами от укусов [25, рис. 2, А, В; 31, табл. VIII, фиг. 1, 2]; см. здесь рис. 6, фиг. 1. Подробнее трофические предпочтения геликоприонов обсуждаются ниже, в части, посвященной нектону.

Помимо аннелид, в состав подвижного зарывающегося бентоса дивьинской палеоэкосистемы входили немногочисленные и преимущественно мелкие пелециподы и другие бентосные моллюски.

## (2) Поверхностный подвижный бентос

На поверхности дна дивьинского (саргинского) межрифового бассейна обитало относительно немного беспозвоночных, особенно если сравнивать их таксономическое разнообразие с исключительно высоким разнообразием подвижного и прикрепленного бентоса, обитавшего на саргинских рифах.

Из дивьинских беспозвоночных, обитавших непосредственно на поверхности дна саргинского бассейна, следует назвать археогастропод рода *Worthenia* и проэтоидных трилобитов *Ditomopyge artinskiense* (Weber). Очевидно, мягкие илы, покрывавшие дно саргинского бассейна, и граница фотической зоны, препятствовали развитию здесь богатой фауны беспозвоночных, адаптированных к обитанию непосредственно на поверхности морского дна. По этой же причине в дивьинских мергелях практически отсутствуют остатки прикрепляющихся морских беспозвоночных (например, криноидей, мшанок, колониальных кораллов), которые в изобилии начинают встречаться только в переходной к рифовым постройкам зоне (см. описание разреза Рябиновый лог в работе одного из авторов [23]). Исключения составляют известковые и кремневые губки сферической или овоидной формы cf. *Kazania* sp. и др., встречающиеся в отложениях дивьинской свиты хоть и не очень часто, но регулярно, но по-настоящему обильные в нижележащих отложениях иргинского горизонта.

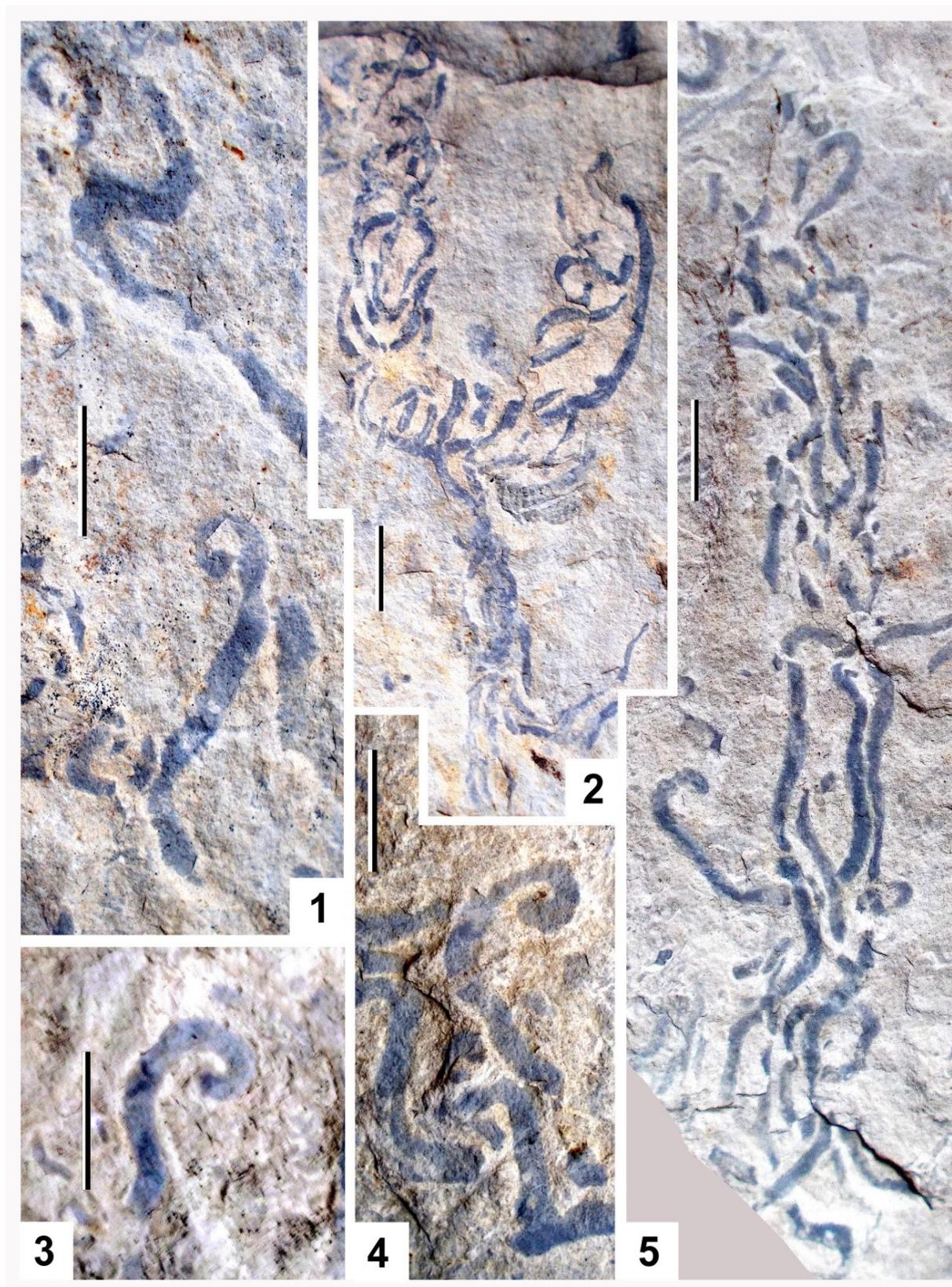
## (3) Нектон

Нектонные организмы были очень многочисленными и довольно разнообразными в дивьинской палеоэкосистеме, хотя их биомасса существенно уступала биомассе аннелид. В отношении таксономического разнообразия, среди дивьинского нектона первое место занимали представители цефалопод, а среди цефалопод – различные аммоноидеи (гониятиты). Чаще других встречаются представители рода *Uraloceras*, реже – *Paragastrioceras*, изредка – *Medlicottia*. Из спиральных наутилоидей встречается род *Metacoseras*. Помимо форм со спиральной раковиной, в дивьинской палеоэкосистеме присутствовали представители так называемых «прямых наутилоидей» (отряды *Orthoceratoidea* и *Pseudothoceratoidea*). Большая часть из них относится к виду *Dolorthoceras siphonocentralis* (Krotov). Ископаемые остатки цефалопод в дивьинских мергелях представлены всеми возрастными стадиями, от миниатюрных ювенильных экземпляров до очень крупных раковин геронтических экземпляров, достигающих нескольких десятков сантиметров в диаметре. Однако средний размер раковин аммоноидей из отложений дивьинской свиты варьирует в пределах 5-7 см. Помимо раковин, встречаются остатки челюстных аппаратов (клювов) аммоноидей (см. [31, с. 27, табл. XI, фиг. 3–5, 7; 32]).

Кроме разнообразных и многочисленных цефалопод, в состав нектона дивьинской палеоэкосистемы входили хрящевые и костные рыбы.

Из костных рыб в дивьинской экосистеме присутствовали палеонисциды, но их ископаемые остатки из красноуфимских местонахождений пока ограничены небольшими фрагментами чешуйного покрова и плавниками, поэтому установить точную видовую и родовую принадлежность большинства из них пока не представляется возможным. В разрезе Красноуфимские Ключики автором обнаружен фрагмент чешуйного покрова *Platysomus* sp. (определение А.О. Иванова, Санкт-Петербургский государственный университет). Средний размер дивьинских палеонисцид, по имеющимся на текущий момент данным, не превышал 40-50 см. В более молодых (кунгурских) отложениях Красноуфимского района (разрез Гониятитовый овраг, расположенный в долине р. Зюрзя, недалеко от д. Подгорной) одним из авторов (– С.Н.) был найден чешуйный покров представителя палеонисцид *Elonichthys* sp. (определение А.С. Бакаева, Палеонтологический институт РАН).

Существенно чаще, чем остатки палеонисцид, в дивьинских мергелях встречаются остатки (в основном, зубы) акул и других хрящевых рыб, включая геликоприона. Новый род хрящевых рыб *Artiodus* Ivanov et Duffin описан по материалам из разреза Красноуфимские Ключики [33].

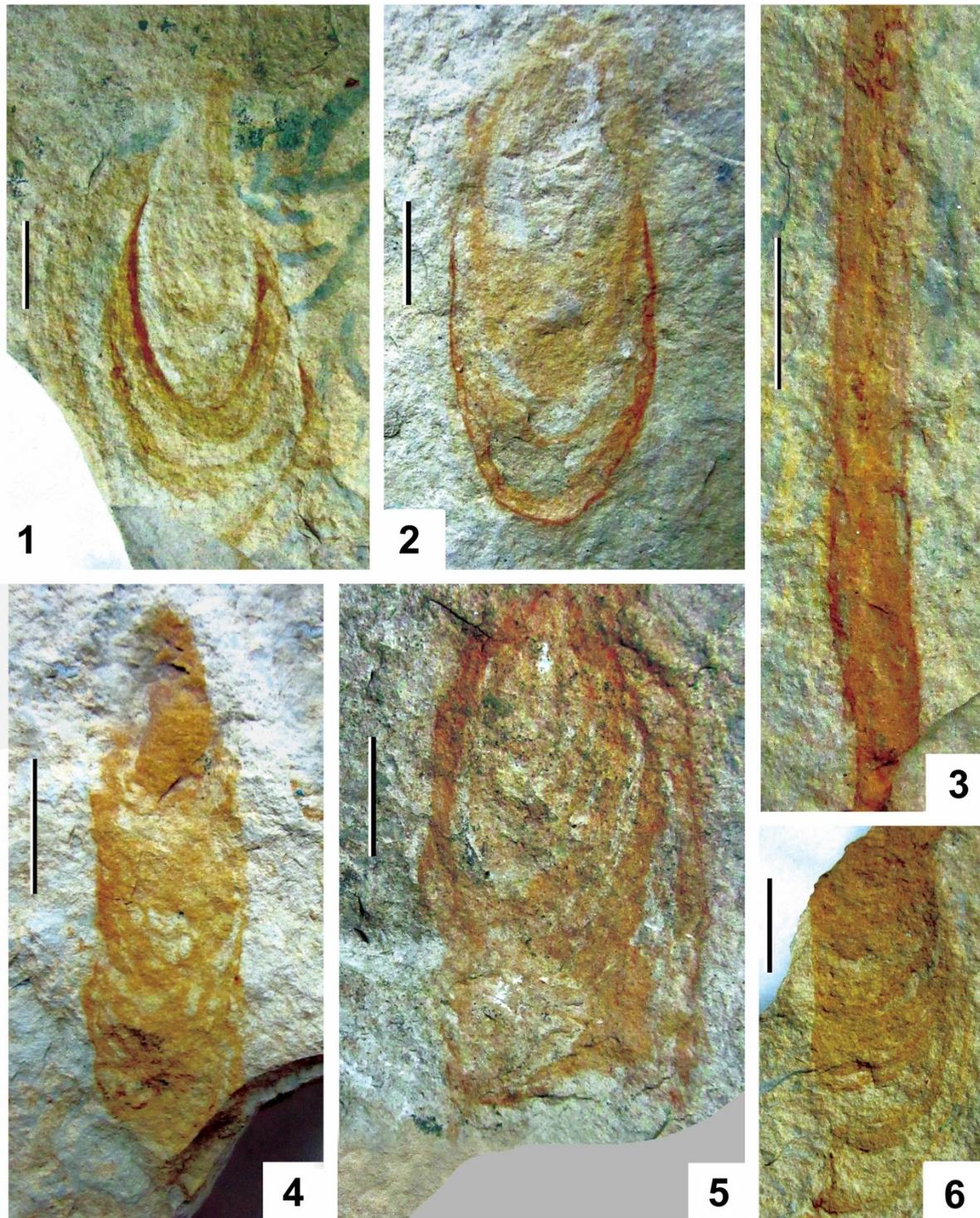


**Рис. 3.** *Spiralovermetus socialis* Naugolnykh, Ichnogen. et Ichnosp. nov.

1 – SV-2; 2 – SV-3; 3 – SV-4; 4 – голотип SV-1; 5 – SV-5.

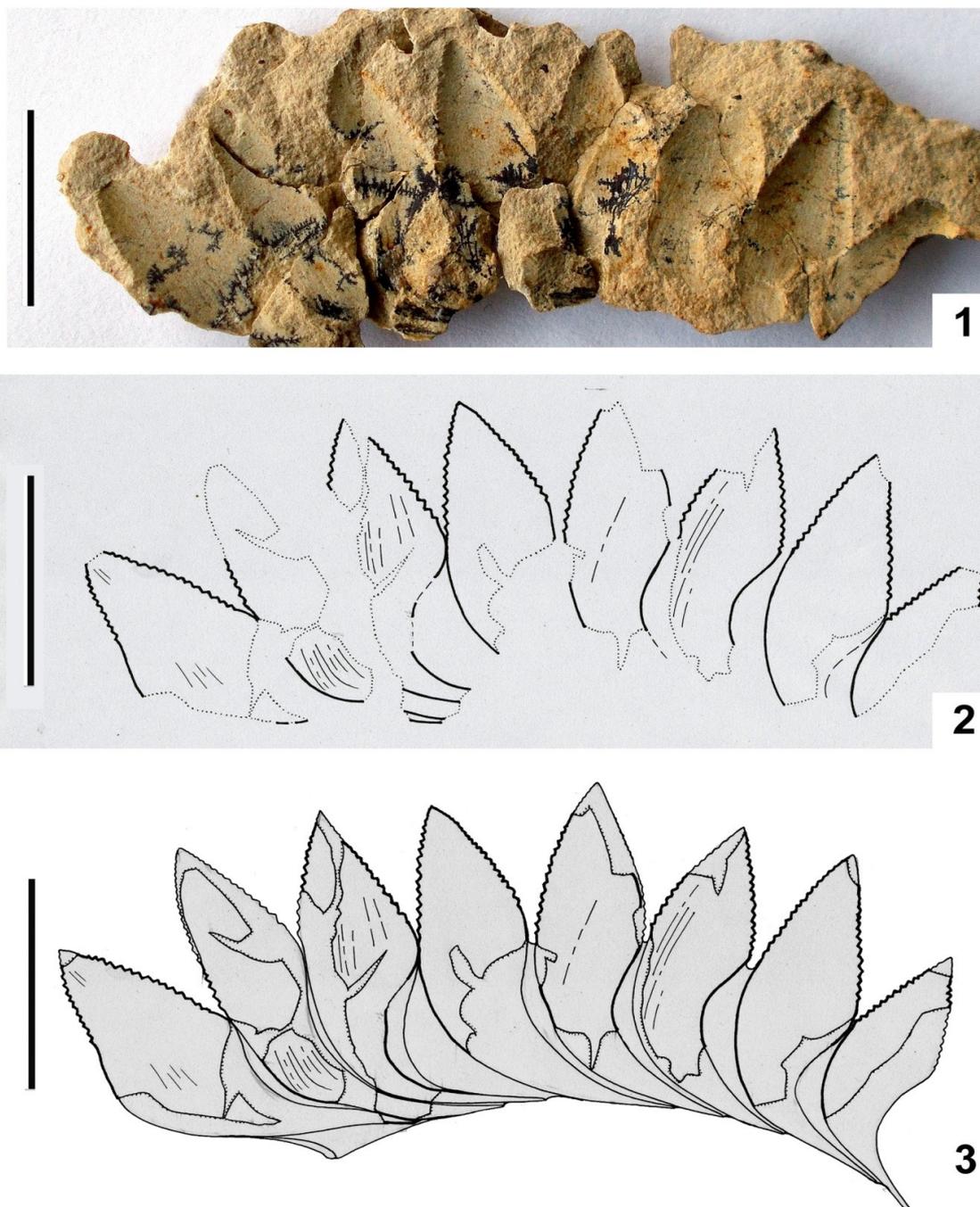
Местонахождения: 1, 2, 4, 5 – карьер Соболя, верхний уступ; 3 – восточный борт Рябиновского лога.

Длина масштабной линейки – 1 см



**Рис. 4.** *Aidomonstrum monstrosum* Naugolnykh, Ichnogen et Ichnosp. nov.  
1 – голотип № AD-1; 2 – AD-2; 3 – AD-3; 4 – AD-4; 5 – AD-5; 6 – AD-6.  
Местонахождение: Соболя, верхний уступ. Длина масштабной линейки – 1 см

Экологическую нишу активного и агрессивного хищника занимали акулы вида *Stenacanthus artinensis* Kozlov, а также *Cladodus* sp., ориентированные в плане трофических предпочтений на питание головоногими моллюсками. Палеонисциды, вследствие своей немногочисленности, не могли составить ктенакантам адекватной кормовой базы. В состав дивьинского нектона также входили эвгенеодонтиды *Helicoprion*, венчавшие пищевую пирамиду (рис. 6, фиг. 3, 4).



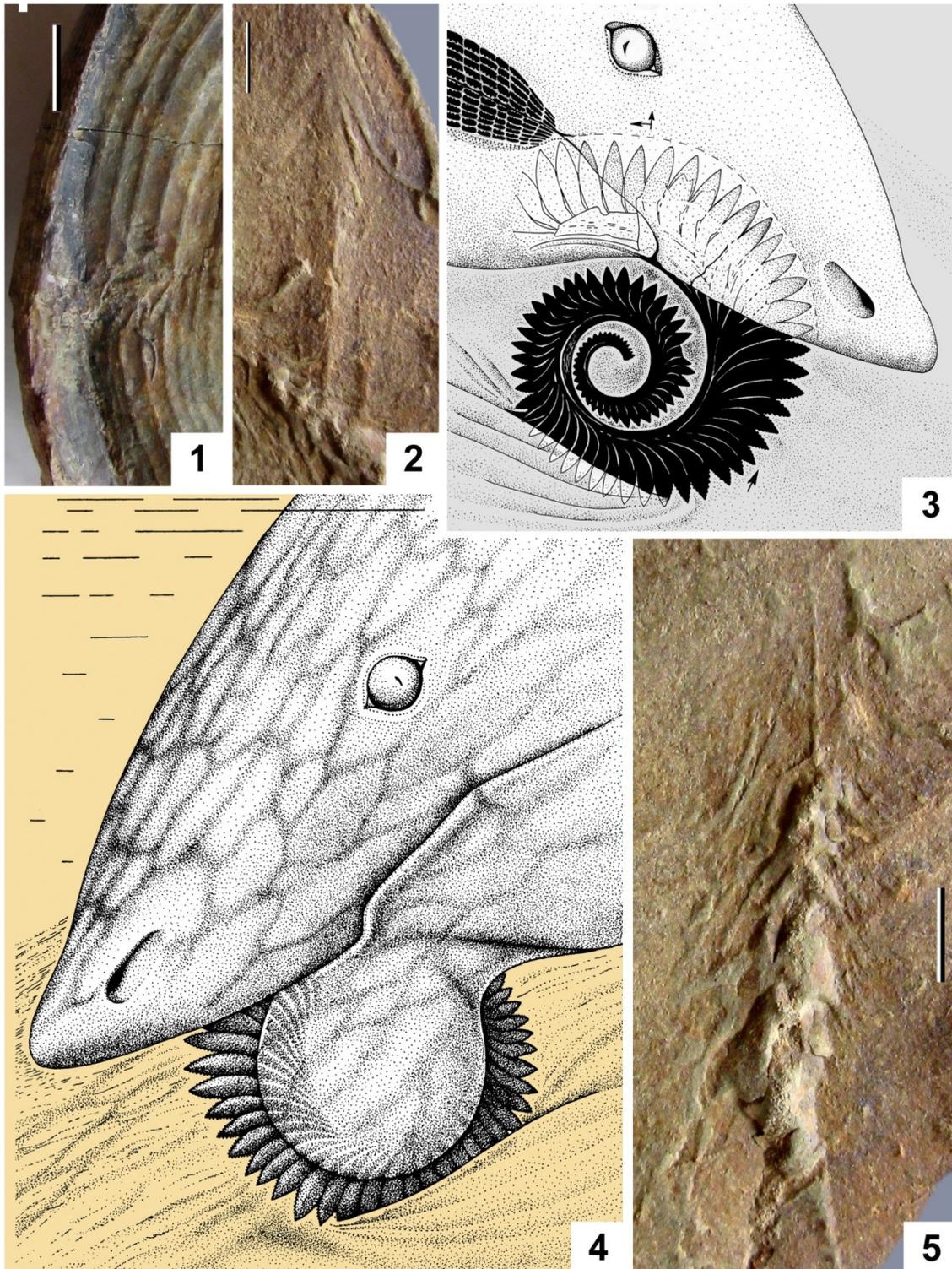
**Рис. 5.** *Helicoprion bessonowi* Karpinsky:

1 – отпечаток фрагмента зубной спирали; 2 – прорисовка этого же экземпляра; 3 – интерпретационный рисунок с реконструкцией морфологии этого же экземпляра.  
 Местонахождение: карьер Соболя. Длина масштабной линейки – 1 см

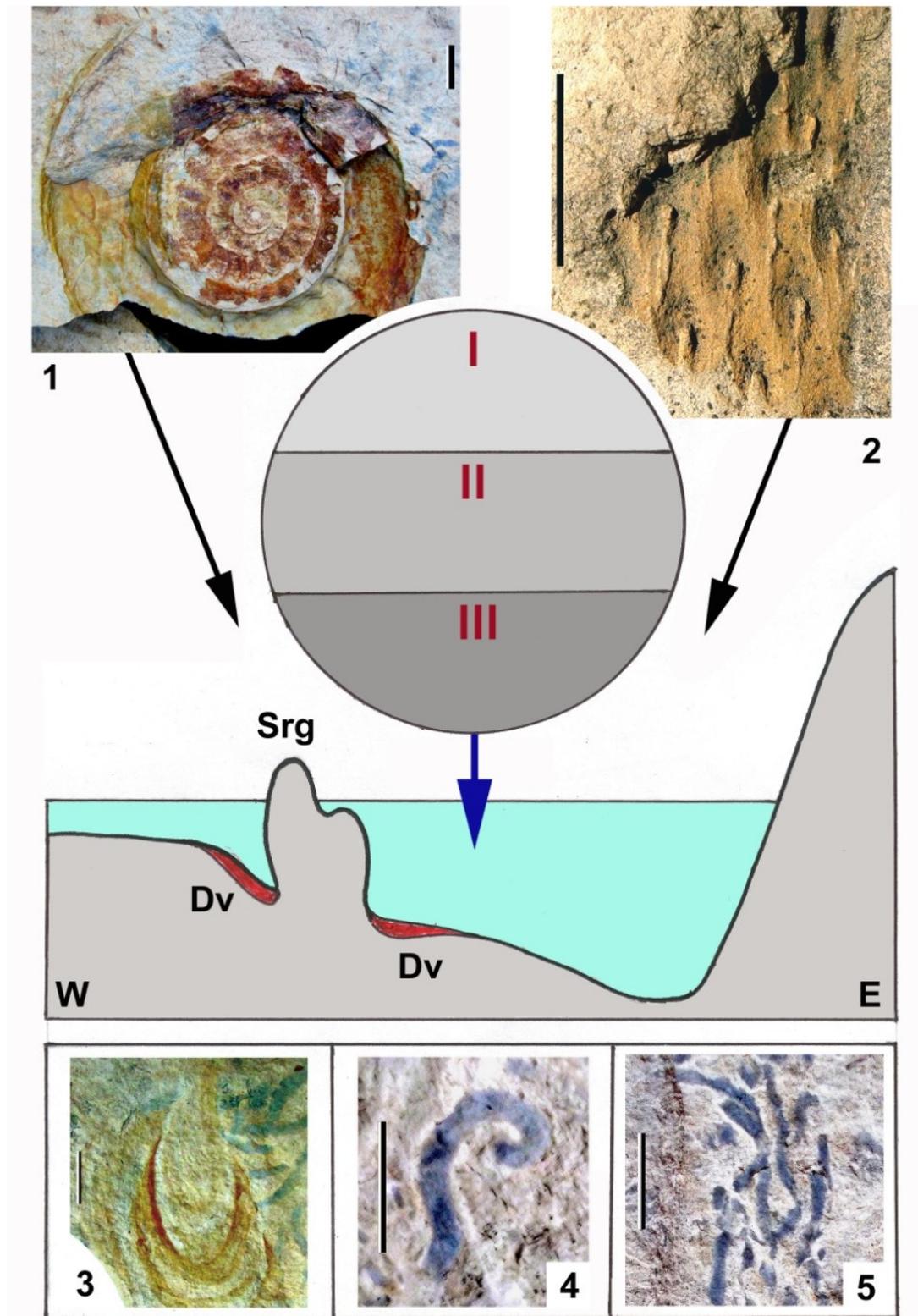
### **Трофические связи компонентов дивьинской палеоэкосистемы**

На вершине трофической пирамиды дивьинской палеоэкосистемы находился крупный нектонный хищник из группы эвгенеодонтид – *Helicoprion bessonowi* Karpinsky, представленный в саргинских ориктоценозах симфизными зубными спиралями (с которыми, собственно, номенклатурно связано название *Helicoprion bessonowi*), боковыми дробящими зубами *Campodus* (по мнению авторов, дробящие зубы геликоприонид несколько различались по форме и, естественно, размерам у молодых и взрослых экземпляров). Высока вероятность того, что именно геликоприонидам принадлежали крупные прямые или серповидно изогнутые ихтиодорулиты, встречающиеся в этих же отложениях [14; 31, табл. XI,

фиг. 8]. Род *Parahelicoprion* Karpinsky авторы рассматривают в качестве младшего синонима рода *Helicoprion*, установленного на фрагментах гигантской симфизной спирали исключительно крупного геронтического экземпляра геликоприона.



**Рис. 6.** *Helicoprion bessonowi* Karpinsky: возможные трофические предпочтения. 1 – шрам, оставленный симфизной зубной спиралью на раковине *Uraloceras* sp.; 2, 5 – следы, оставленные на субстрате симфизной зубной спиралью геликоприона; 3, 4 – предполагаемая реконструкция способа образования следов, оставленных на субстрате в местонахождении Поташка. Местонахождение: карьер Соболя (1), Поташка (2, 5). Длина масштабно линейки для 1, 2, 5 – 1 см



**Рис. 7.** Палеоэкологическая интерпретация полученных данных. 1 – гониатит *Paragastrioceras* sp., представитель консументов второго порядка; 2 – фрагмент коры плауновидного *Ufadendron ufaense* Naugolnykh, пример поступления органики с суши в дивинскую (саргинскую) палеоэкосистему (местонахождение Красноуфимские Ключики); I–III – распределение организмов по биономическим зонам: I – консументы высшего порядка, нектон крупного размера; II – консументы 2-го порядка; III – редуценты и продуценты; W – запад, E – восток, Srg – органогенные постройки саргинской свиты, Dv – отложения дивинской свиты; 3 – *Aidomonstrum monstrosum* Naugolnykh, Ichnogen et Ichnosp. nov.; 4, 5 – *Spiralovermetus socialis* Naugolnykh, Ichnogen. et Ichnosp. nov.

Таким образом, основные «структурные этажи» трофической пирамиды дивьинской палеоэкосистемы выглядели следующим образом: продуцентами были водоросли – крупные макрофиты, верхние части талломов которых находились в фотической зоне. Остатки таких макрофитов относительно редко, но регулярно встречаются в мергелях дивьинской свиты [4, Plate II, fig. 9]. Кроме этого, в фотическом слое, безусловно, обитали мелкие планктонные водоросли, также входившие в число продуцентов дивьинской экосистемы. Приток органических веществ, необходимых для существования донных организмов-деструкторов, также обеспечивался поступлением растительного детрита с суши и «мертвым дождем» из толщи воды. Основными организмами-деструкторами были многочисленные аннелиды *Spiralovermetus*, образывавшие количественное ядро зарывающегося бентоса дивьинской палеоэкосистемы (рис. 7).

Консументами первого порядка дивьинской палеоэкосистемы были многочисленные и разнообразные аммоноидеи (*Uraloceras*, *Paragastrioceras*, *Medlicottia*) и менее распространенные наутилоидеи (*Metacoceras*, *Dolorthoceras*). Роль консументов второго порядка выполняли акулы *Ctenacanthus artinensis* и *Cladodus* sp. Вершину трофической пирамиды занимал консумент третьего порядка – *Helicoprion bessonowi*, одновременно выполнявший функции консументов предыдущих порядков, поскольку в трофическую базу геликоприона входили и аммоноидеи.

Экологическое благополучие и процветание дивьинской палеоэкосистемы полностью базировалось на аннелидах, создававших базовую кормовую основу для консументов и, таким образом, находившихся в основании трофической пирамиды. Как только исчезли условия, необходимые для жизни дивьинских аннелид, палеоэкосистема саргинской морской лагуны закончила свое существование, что ознаменовалось вымиранием подавляющего большинства ее компонентов.

Экологически саргинская палеоэкосистема Среднего и Южного Приуралья имела много общего с экосистемой более молодой (среднепермской) формации Фосфория (*Phosphoria*), отложения которой широко распространены в пределах штатов Айдахо, Монтана, Вайоминг и близлежащих территорий США, примыкающих к Скалистым горам [34; 35]. Здесь, также как и в окрестностях Красноуфимска, рифы соседствуют с фациями межрифового заполнения, в которых встречаются симфизные спирали геликоприонов *Helicoprion ferrieri* Hay [36; 37]. Есть все основания полагать, что трофические взаимосвязи в экосистеме формации Фосфория были близки трофической структуре дивьинской палеоэкосистемы.

### Описание ихнотаксонов

#### *Spiralovermetus* Naugolnykh Ichnogen. nov.

Название рода от «spiral, спиральный» – по форме терминальных частей ходов, и «vermetus» (lat.) – похожий на червя, по спиральной форме, напоминающей форму тела аннелид и некоторых гастропод.

Diagnosis. Narrow belt-shaped traces, sometimes with preserved annelid soft bodies inside traces, with smooth surface, curved or undulated. Terminal portions of traces often spiral or helically curved.

Сравнение. Новый ихнород отличается от наиболее близких родов *Gordia* Emmons 1844 [38], и *Helminthopsis* Heer, 1877 [39; 40] сочетанием извилистой формы основной части следа и крючковидно-изогнутого или спирального окончания следа.

Распространение. Нижняя пермь, артинский ярус; Приуралье.

***Spiralovermetus socialis*** Naugolnykh, Ichnosp. nov.

Рис. 3, фиг. 1–5.

Название вида от «socialis» (lat.) – образующий массовые скопления.

Голотип: SV-1, изображен на рис. 3, фиг. 4; карьер Соболя, верхний уступ; нижняя пермь, артинский ярус, саргинский горизонт, дивьинская свита.

Diagnosis. Same as for the genus.

Описание. Тонкие и относительно длинные, лентиколярные в поперечном сечении следы, как правило, от слабо изогнутых до ундулирующих, сильно изгибающихся. Терминальные части следов часто крючковидно изгибаются иди даже могут быть свернуты в спираль. Средняя ширина следа равна 1–1,5 мм. Длина следов варьирует от 9 до 150 мм. Встречаются следы, размеры которых несколько уклоняются от средних значений. Нередко следы группируются в лентовидные полосы (рис. 3, фиг. 5), которые могут быть прямыми, слабо изогнутыми или могут дихотомировать (рис. 3, фиг. 2). Длина полос достигает 12 см или даже более, ширина – 1–1,4 см. Иногда внутри следа сохраняются остатки мягкого тела червеобразного организма, замещенные вторичными минералами.

Материал. Сто пятьдесят экземпляров хорошей сохранности из местонахождения Соболя; один экземпляр хорошей сохранности из восточного борта Рябиновского лога.

***Aidomonstrum*** Naugolnykh, Ichnogen. nov.

Название рода от «Aid» (lat. greek) – правитель мифологической страны потустороннего мира; «monstrum» (lat.) – чудовище, монстр; т.е., «Монстр Аида».

Diagnosis. Traces of feeding left by volumetary eating organism, which deposited sediment enriched by organic particles. Traces fusiform to oviform, sometimes subcylindric, with well-pronounced concentric inner layers of crescent/semilunar shape.

Сравнение. Новый род отличается от наиболее близкого рода *Diplocraterion* Torell, 1870 [41; 42], своей каплевидной, субцилиндрической или овоидной формой, отсутствием боковых каналов и общей объемной, а не уплощенной формой.

Распространение. Нижняя пермь, артинский ярус; Приуралье.

***Aidomonstrum monstrosum*** Naugolnykh, Ichnosp. nov.

Рис. 4, фиг. 1–6.

Название виде от «monstrosum» (lat.) – чудовищный.

Голотип: изображен на рис. 4, фиг. 1; карьер Соболя, верхний уступ; нижняя пермь, артинский ярус, саргинский горизонт, дивьинская свита.

Diagnosis. Same as for the genus.

Описание. Следы проедания осадка, имеющие каплевидную (рис. 4, фиг. 1, 2, 5), веретеновидную (рис. 4, фиг. 4) или цилиндрическую форму (рис. 4, фиг. 3, 6). Максимальная наблюдаемая ширина следов обычно не превышает 2 см. Длина следов варьирует от 3 до 10 см. Характерной особенностью следов этого вида является характерная полосчатость полулунных очертаний, образованная неравномерным обогащением осадка органическим веществом, переработанным организмом. Органическое вещество замещено оксидами и гидроксидами железа.

Материал. Тридцать экземпляров хорошей сохранности из местонахождения Соболя.

**Благодарности**

Авторы выражают искреннюю признательность А.О. Иванову (Санкт-Петербургский Государственный университет) и А.С. Бакаеву (Палеонтологический институт РАН, г. Москва) за помощь в определении остатков рыб из пермских отложе-

ний, обнажающихся в районе г. Красноуфимск. Работа выполнена в рамках Госзадания Геологического института РАН. Всем коллегам и друзьям, способствовавшим выходу этой работы в свет, авторы глубоко благодарны.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Наливкин В.Д. Стратиграфия и тектоника Уфимского плато и Юрезано-Сылвенской депрессии. – Л., М.: Гостоптехиздат, 1949. – 207 с.: ил., карт. – (Труды ВНИГРИ, нов. сер., Вып. 46).
2. Наливкин В.Д. Фации и геологическая история Уфимского плато и Юрезано-Сылвенской депрессии. – Л., М.: Гостоптехиздат, 1950. – 127 с.: ил. – (Труды ВНИГРИ, нов. сер., Вып. 47).
3. Чувашов Б.И., Дюпина Г.В., Мизенс Г.А., Черных В.В. Опорные разрезы верхнего карбона и нижней перми западного склона Урала и Приуралья. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 369 с.: ил.
4. Naugolnykh S.V. Artinskian (Early Permian) Sea Basin and Its Biota (Krasnoufimsk, Cis-Urals) // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2018. – V. 26, № 7. – P. 722-742.
5. Мазарович А.Н., Фениксова В.В. История исследований пермских отложений Русской платформы и Приуралья. – М.: Изд. МОИП, 1949. – 147 с.
6. Штукенберг А.А. Общая геологическая карта России: Лист 138. Геологические исследования северо-западной части области 138-го листа / Тр. Геол. комитета. – 1890. – Т. 4, № 2. – 115 с.
7. Фредерикс Г.Н. Фауна верхнепалеозойской толщи окрестностей города Красноуфимска Пермской губернии. – Петроград, 1915. — 117 с.: ил. – (Тр. Геологич. комиссии. Нов. сер. Вып. 109).
8. Talent J.A., Archbold N.W., Machlin V.Z. Georgiy Nikolaevich Frederiks (1889–1938): paleontologist, stratigrapher, tectonicist – biography and bibliography // *Earth Sciences History*. – 1995. – V. 14, № 2. – P. 137-171.
9. Пчелов Е.В. Рюриковичи: история династии. – М.: Олма-пресс, 2001. – 477 с.
10. Залесский М.Д. Пермская флора Уральских пределов Ангариды: атлас из 46 табл. Фототипий... – Л.: Геологич. Комитет, 1927. – 52 с. – (Тр. Геологич. Комитета. Новая серия. Вып. 176).
11. Наугольных С.В. Новый вид рода *Psygtophyllum* Schimper из нижней перми Урала // *Палеонтологический журнал*. – 2012. – № 2. – С. 98-107.
12. Круглов М.В. Отложения артинского типа между ст. Кишертъ и Кузино Пермской ж.д. // *Труды геологического института / АН СССР*. – Л., М., 1933. – Т. III. – С. 111-126.
13. Осипов С.С. К стратиграфии верхнепалеозойских отложений Уфимского плато // *Проблемы советской геологии*. – 1933. – № 4, Вып. II. – С. 10-46.
14. Карпинский А.П. Собрание сочинений. Т. I. – М., Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1945. – 521 с.: ил.
15. Lebedev O.A. A new specimen of *Helicoprion* Karpinsky, 1899 from Kazakhstaniian Cisurals and a new, (Suppl. 1). – P. 171-182.
16. Романовский С.И. Александр Петрович Карпинский, 1847-1936. – Л.: Наука, 1981. – 484 с.: ил.
17. Степанов Д.Л. Верхний палеозой западного склона Урала (опыт биостратиграфического анализа). – Л.; М.: Гостоптехиздат, 1951. – 223 с. – (Труды ВНИГРИ, нов. сер., Вып. 54).
18. Раузер-Черноусова Д.М. Стратиграфия верхнекаменноугольных и артинских отложений Башкирского Приуралья // *Фораминиферы верхнекаменноугольных и артинских отложений Башкирского Приуралья*. – М., Л., 1949. – С. 3-21. – (Тр. Ин-та геологии. наук АН СССР. Вып. 105).
19. Пермская система / отв. ред. Б.К. Лихарев. – М.: Недра, 1966. – 536 с.: ил.
20. Стратиграфический словарь СССР. Карбон, пермь. – Л.: Недра, 1977. – 535 с.
21. Чувашов Б.И., Дюпина Г.В. Верхнепалеозойские терригенные отложения западного склона Среднего Урала. – М.: Наука, 1973. – 208 с.: ил.
22. Чувашов Б.И. Пермские акулы семейства *Helicoprionidae* – стратиграфическое и географическое распространение, экология, новый представитель // *Материалы по стратиграфии и палеонтологии Урала*. – Екатеринбург, 2001. – Вып. 6. – С. 12-27.
23. Наугольных С.В. Экология и палеоэкология – решение задач геомониторинга на примере Красноуфимска (Свердловская область) // *Социально-экологические технологии*. – 2018. – № 1. – С. 38-64.
24. Kossovaya O.L., Vachard D., Izart A. Climatic impact on the reef biota in the Cisuralian and Guadalupian (Permian), East European Platform // *Palaeozoic Climate Cycles: Their Evolutionary and Sedimentological Impact / Geological Society*. – London, 2013. – Special Publications. – V. 376. – DOI: 10.1144/SP376.19.
25. Наугольных С.В. Палеонтологические музейные коллоквиумы – новая форма взаимодействия академической науки и региональных музеев // *Грибушинские чтения – 2013. Кунгурский диалог: тез. докл и сообщений IX Междунар. соц.-культ. форума*. – Кунгур, 2013. – С. 394-395.
26. Кадебская О.И., Казанцева А.С., Красиков А.В., Наумкин Д.В. Экспедиционная и научная деятельность Кунгурской лаборатории-стационара в 2019 году // *Горное эхо: прил. к науч.-техн. изданию ГИ УрО РАН*. – 2019. – С. 36-39.

27. Наумкин Д.В. Ископаемые растения Уральского региона в составе палеонтологической коллекции музея карста и спелеологии Горного института УрО РАН: комплектование, описание, использование // Горное эхо. – 2022. – № 1 (86). – С. 25-39. – DOI: 10.7242/echo.2022.1.4.
28. Наумкин Д.В., Осетрова О.И. Некоторые итоги работы музея карста и спелеологии в 2017-2018 годах // Горное эхо. – 2019. – № 1 (74). – С. 20-26. DOI: 10.7242/echo.2019.1.5.
29. Наумкин Д.В., Осетрова О.И. Пермь в Кунгуре. К популяризации палеонтологического природного наследия музейными средствами // Всероссийские научные чтения памяти Ильменского минералога В.О. Полякова. – 2022. – № 23. – С. 94-99.
30. Naugolnykh S.V., Bicknell R.D.C. Ecology, morphology and ontogeny of *Paleolimulus kunguricus* – a horseshoe crab from the Kungurian (Cisuralian) of the Cis-Urals, Russia // Lethaia. – 2022. – V. 55, № 1. – P. 1-13.
31. Наугольных С.В. Палеонтология Красноуфимска. – М.: Медиа-Гранд, 2016. – 72 с.: ил.
32. Mironenko A.A., Naugolnykh S.V. Lower and upper jaws of the Early Permian goniaticid ammonoids // Lethaia. – 2022. – V. 55, № 4. – P. 1-9.
33. Ivanov A.O., Duffin C.J., Naugolnykh S.V. A new euselachian shark from the Early Permian of the Middle Urals, Russia // Acta Palaeontologica Polonica. – 2017. – V. 62, № 2. – P. 289-298.
34. Sheldon R.P. Physical stratigraphy of the Phosphoria Formation in northwestern Wyoming // Geological Survey Bulletin. – 1957. – P. 105-185.
35. Wardlaw B.R. (Ed.). Studies of the Permian Phosphoria Formation and related rocks, Great Basin – Rocky Mountain region // Geological Survey professional paper. – 1979. – V. 1163. A–D. – P. 1-22.
36. Hay O.P. A new genus and species of fossil shark related to *Edestus* Leidy // Science. New. Series. – 1907. – V. 26. – P. 22-24.
37. Bendix-Almgreen S.E. New investigations on *Helicoprion* from the Phosphoria Formation of south-east Idaho, U.S.A // Biologiske Skrifter Danske Videnskabernes Selskad. – 1966. – V. 14. – P. 1-54.
38. Wang Y., Lin J.P., Zhao Y.L., Orr P.J. Palaeoecology of the trace fossil *Gordia* and its interaction with non-mineralizing taxa from the early Middle Cambrian Kaili Biota, Guizhou Province, South China // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2009. – V. 277, №1-2. – P. 141-148.
39. Fillion D., Pickerall R.K. Ichnology of the Upper Cambrian? to Lower Ordovician Bell Island and Waban groups of eastern Newfoundland, Canada // Palaeontographica Canadian. – 1990. – V. 7. – P. 1-41.
40. Buatois L.A., Mángano M.G., Maples C.G., Lanier W.P. Ichnology of an Upper Carboniferous fluvio-estuarine paleovalley: The Tonganoxie sandstone, Buildes Quarry, eastern Kansas, USA // Journal of Paleontology. – 1998. – V. 72. – P. 152-180.
41. Fursich F.T. On *Diplocraterion* Torell 1870 and the significance of morphological features in vertical, spreiten-bearing, U-shaped trace fossils // Journal of Paleontology. – 1974. – V. 48, № 5. – P. 952-962.
42. Cornish F.G. The Trace-Fossil *Diplocraterion*: Evidence of Animal-Sediment Interactions in Cambrian Tidal Deposits // Palaios. – 1986. – V. 1, № 5. – P. 478-491.

# МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.831

DOI:10.7242/echo.2023.4.4

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ И В ШАХТЕ

А.В. Евсеев, Е.Л. Васильева  
Горный институт УрО РАН, г.Пермь

**Аннотация:** В статье приведены результаты исследования процесса деформирования и разрушения целиков во времени. Выполнен анализ графиков нарастания оседаний земной поверхности и сопоставление результатов с измерениями на замерных станциях в очистных камерах. Определена величина продольной деформации междукамерных целиков, при достижении которой наблюдается увеличение скорости оседания земной поверхности. Полученные результаты могут быть использованы для прогноза развития деформаций междукамерных целиков, оседания земной поверхности и планирования выполнения закладочных работ на руднике.

**Ключевые слова:** междукамерный целик, конвергенция, оседание земной поверхности, деформирование, устойчивость, критическая деформация.

Мониторинговые исследования, проводимые маркшейдерскими подразделениями на рудниках Верхнекамского месторождения, играют важную роль в обеспечении безопасности ведения горных работ и предотвращении затопления выработанного пространства пресными водами. В соответствии с требованиями нормативных документов выполняются массовые измерения оседаний и горизонтальных смещений грунтовых реперов на земной поверхности [1, 2] и осуществляется контроль горизонтальной конвергенции в очистных камерах [3]. По скорости деформирования судят об устойчивости междукамерных целиков (МКЦ) и на основе таких измерений принимают решение о необходимости применения мер охраны водозащитной толщи и подработанных объектов. Результаты мониторинга являются также исходной информацией для калибровки математической модели при прогнозировании развития оседаний земной поверхности. Выработанное пространство в такой ситуации представляется средой с пониженными по отношению к породам соответствующего пласта механическими свойствами без учета особенностей отработки камерного блока. Изменение модулей деформации во времени полностью определяются графиками нарастания оседаний земной поверхности.

Отдельный интерес представляют шахтные исследования, направленные на детальное изучение процессов деформирования выработанного пространства. Чаще всего сооружаются наблюдательные станции, оборудованные глубинными и контурными реперами, что позволяет как контролировать смещение на контуре выработок, так и определять распределение деформаций в приконтурной зоне. Для измерения используются нивелиры, ленточные экстензометры, тахеометры, лазерные рулетки и т.д. Средства измерения и периодичность контроля выбирается исходя из интенсивности деформационных процессов и требуемой точности. Результаты являются исходной информацией для калибровки математической модели при решении вопросов устойчивости кровли камер, междупластья и целиков в различных горно-геологических и горнотехнических условиях.

Для установления взаимосвязи между процессами деформирования междукамерных целиков и оседанием земной поверхности выполнен сопоставительный анализ результатов измерений. Рассмотрен один из характерных участков, расположенный на 1 ЮЗП рудника БКПРУ-4. Пласт АБ отработан в 2010 году, ширина камер  $a_{AB}$  составляет 5,5 м,

ширина МКЦ  $b_{AB}=6,5$  м, высота камер  $m_{AB}=3,1$  м, степень нагружения целиков  $C_{AB}=0,32$ . Пласт КрII отработан в 2013 году со следующими параметрами:  $a_{крII}=5,5$  м;  $b_{крII}=6,5$  м;  $m_{крII}=5,0$  м;  $C_{крII}=0,4$ ; мощность междупластья АБ-КрII составляет 3,9 м. Замерная станция оборудована в 2013 году, первый цикл измерений на земной поверхности выполнен в 2009 году. Измерения деформаций камерного блока выполнялись на комплексных замерных станциях [4] одновременно на обоих обрабатываемых пластах в течение 7 лет, после чего выполнена гидравлическая закладка участка. На рис. 1 приведены выкопировка с плана горных работ на пласте КрII (на пласте АБ выработки располагаются соосно) и вертикальный разрез камерного блока. На рис. 1б показано вертикальное смещение контролируемых точек, расположенных по оси камер, относительно почвы нижнего пласта. На рис. 2а приведены графики оседания земной поверхности с 2009 по 2020 годы. На рис. 2б и рис. 2в приведены графики поперечного деформирования целиков относительно глубинного репера, расположенного на расстоянии 2,0 м от контура.

Как и следовало ожидать, наиболее интенсивно деформируются целики на пласте КрII, расчётная степень нагружения которых выше, чем на пласте АБ. На момент завершения измерений на пласте КрII продольная деформация целиков составляет 3,5%, на пласте АБ – 0,7%. Междупластье сохраняет свою устойчивость, расслоения за весь период наблюдений не превышают 20 мм. Величина оседания земной поверхности определяется суммарной продольной деформацией целиков. Важно отметить, что скорость оседания земной поверхности, как и скорость поперечной и продольной деформации целиков за весь период наблюдения сохранялась постоянной. Таким образом, на начальном этапе до достижения критических деформаций скорость их ползучести является величиной постоянной и определяется степенью нагружения.

В процессе деформирования целиков происходит увеличение степени их нарушенности. С течением времени это приводит к снижению прочности пород и, соответственно, уменьшению несущей способности целиков. При постоянной нагрузке, определяемой весом вышележащей толщи, происходит увеличение степени нагружения МКЦ, сопровождаемое увеличением скорости оседания земной поверхности. При этом ускорение оседаний наблюдается после достижения критических деформаций.

В качестве примера, иллюстрирующего увеличение скорости, проанализирован другой участок горных работ, где к настоящему времени оседания земной поверхности достигли 950 мм (рис. 3, репер 98). На участке отработаны 2 пласта АБ (2012 год) и КрII (2013 год). Ширина камер по обоим пластам составляет 5,5 м, ширина целиков – 5,4 м. Вынимаемая мощность по пласту АБ равна 3,1 м, по пласту КрII – 5,2 м. Расчётная степень нагружения по пластам АБ и КрII составляет 0,35 и 0,4 соответственно. В 2019-21 гг. выполнена закладка выработанного пространства по пласту КрII.

На рис. 4 показан график оседания репера 98 во времени. Начиная с момента отработки до 2018 года оседание земной поверхности происходило с постоянной скоростью и достигло 300 мм. В 2019 году отмечено увеличение скорости оседания, связанное по всей видимости с достижением целиками критических деформаций и изменением их несущей способности. Выполнение гидрозакладочных работ в период с конца 2019 по 2020 год на пласте КрII также отразилось на скорости оседания земной поверхности. После окончания закладки скорость стабилизировалась на прежних уровнях.

В ходе обследования выработанного пространства в 2019 году горизонтальная конвергенция в отработанных камер на пласте АБ составляла 15-25 см, на пласте КрII – 40-45 см. В относительном виде горизонтальная конвергенция равнялась 2,5-4,5% и 6,5-8,0% на пластах АБ и КрII соответственно. Согласно выполненным ранее исследований [5] отношение поперечных деформаций целика к продольным составляет 1,6, следовательно, расчётная продольная деформация целиков равнялась 1,6-2,8% и 4,1-5,0% на пластах АБ и КрII соответственно. В абсолютном виде это составляло 50-85 мм на пласте АБ и 230-280 мм на пласте КрII.

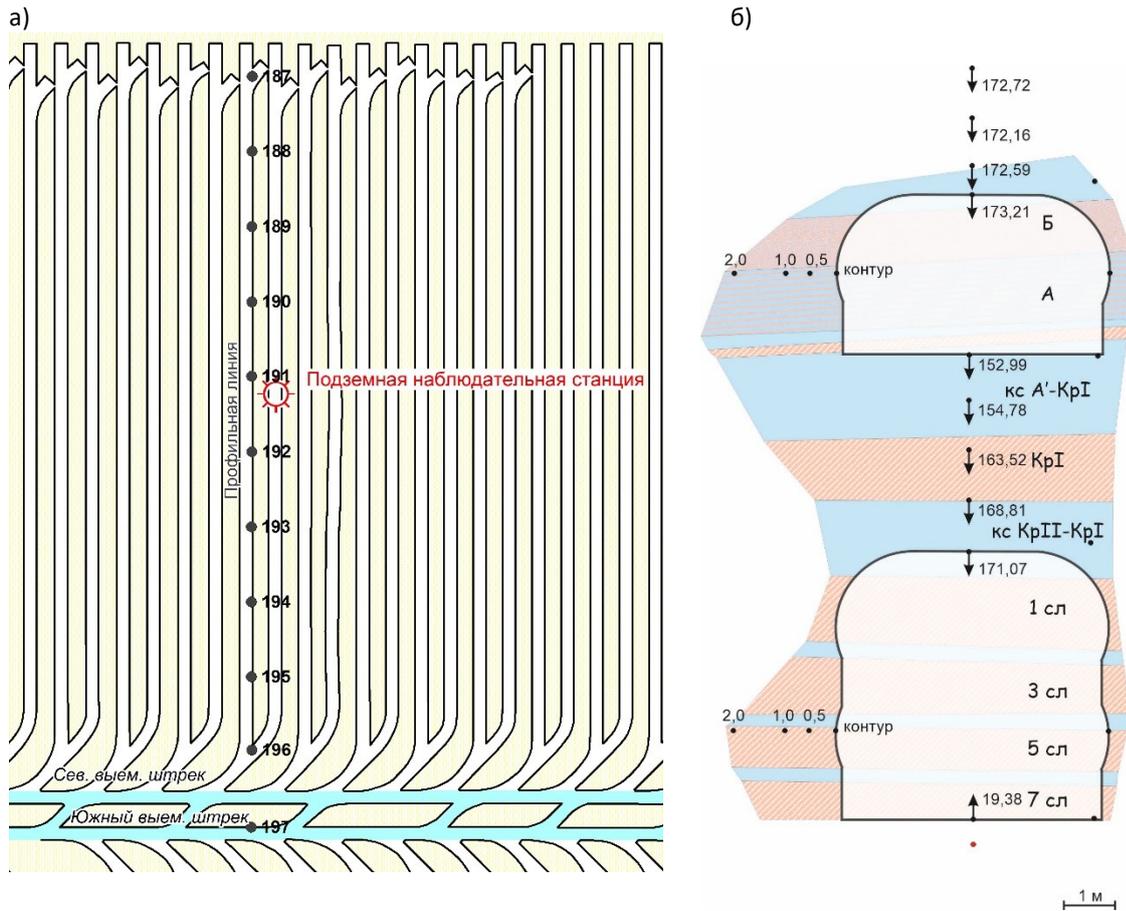


Рис. 1. Выкопировка с плана горных работ (а) и смещение контролируемых точек в междупластье и кровле пласта АБ за период с 11.2013 г. по 12.2020 г.

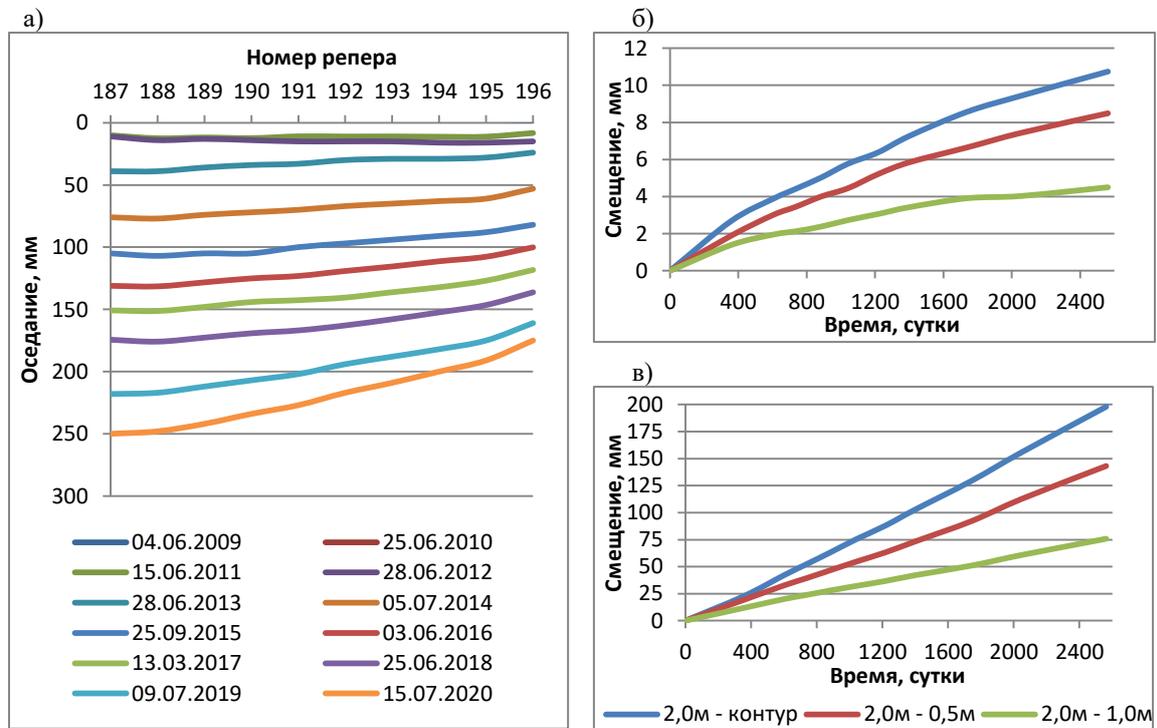


Рис. 2. График нарастания оседаний земной поверхности (а) и поперечного деформирования междукамерных целиков на пластах АБ (б) и КрII (в)

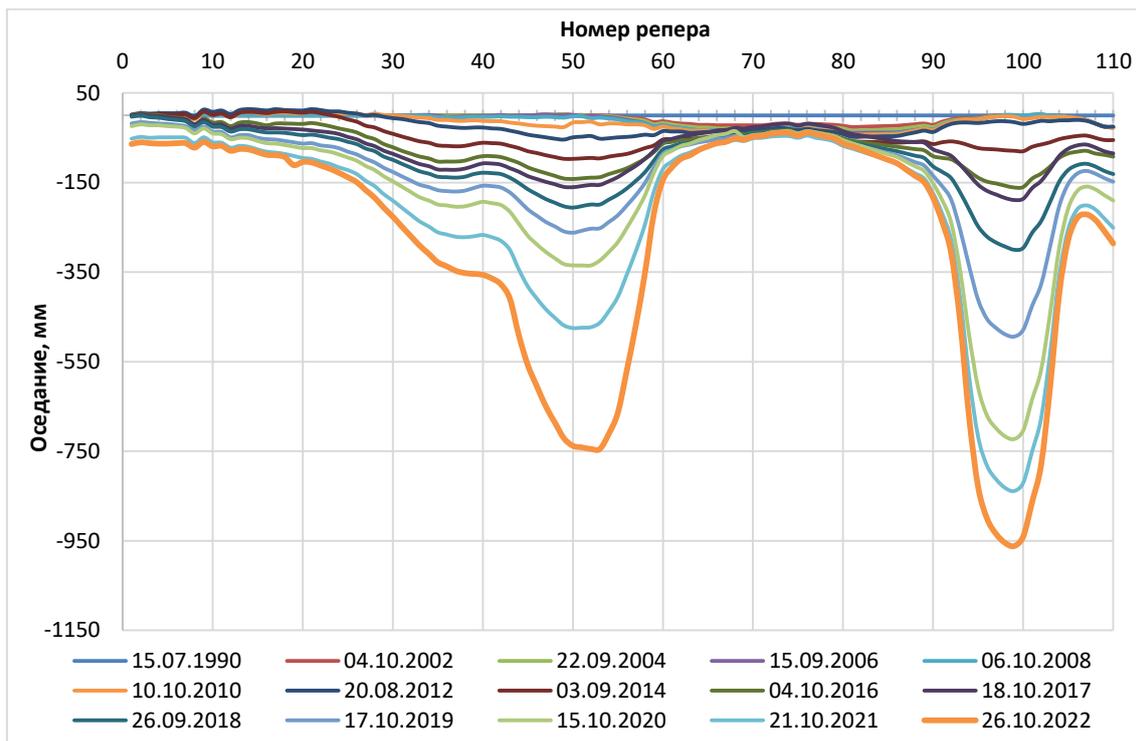


Рис. 3. Графики нарастания оседаний земной поверхности по профильной линии

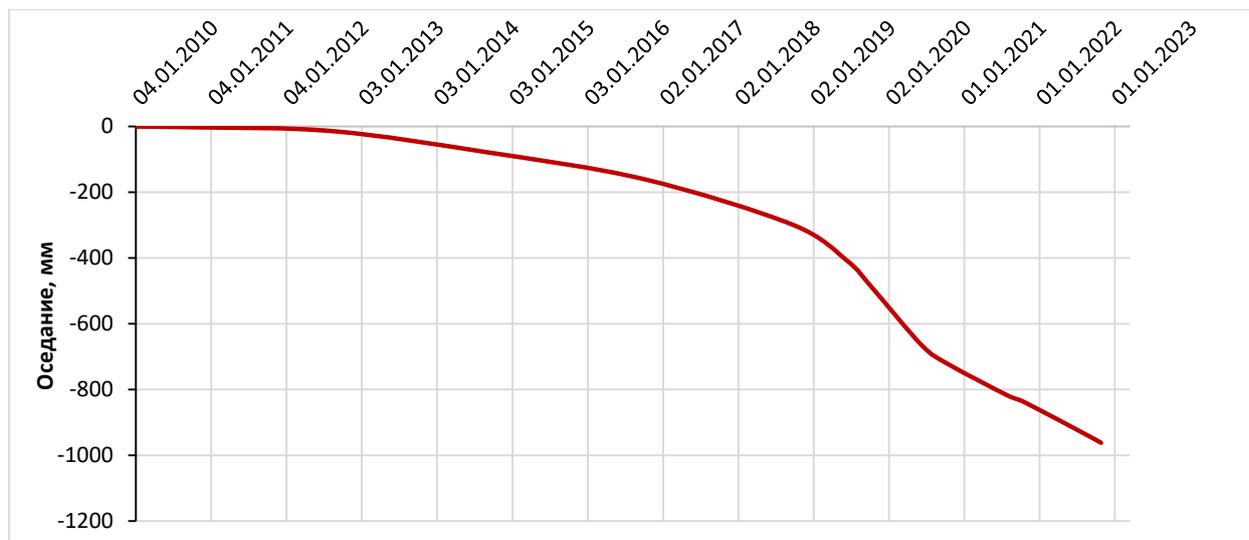


Рис. 4. График оседания репера 98 во времени

Таким образом, на основании анализа графиков нарастания оседания земной поверхности и результатов контроля деформаций МКЦ установлено, что в пределах экспериментального участка критическая продольная деформация МКЦ составляет около 5%. При достижении этой величины наблюдается увеличение скорости оседания земной поверхности.

Полученные результаты могут быть использованы для прогноза развития деформаций междукамерных целиков и оседания земной поверхности по результатам контроля горизонтальной конвергенции очистных камер и для планирования выполнения закладочных работ на отработанных площадях.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта № 20-45-596011 р\_НОЦ\_Пермский край  
и Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000403-1).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по наблюдениям за сдвижением земной поверхности и подрабатываемыми зданиями и сооружениями на калийных рудниках: утв. ОАО «Сильвинит», ОАО «Уралкалий»; согласовано Госгортехнадзор России 26.04.2004 № АС-04-35/336. – СПб, 2004. – 73 с.
2. Технологический регламент по комплексному обеспечению безопасности горных работ и охране недр на рудниках ПАО «Уралкалий»: утв. 16.02.2016, № 253. – 5-е изд.
3. Указания (мероприятия) по защите рудников ПАО «Уралкалий» от затопления и охране объектов на земной поверхности от вредного влияния подземных разработок на Верхнекамском месторождении солей. Ч. 1. Основные положения: утв. ПАО «Уралкалий». – Пермь, Березники, 2022 г. – 117 с.
4. Евсеев А.В. Методика инструментального контроля процессов деформирования камерного блока при двухпластовой отработке сильвинитовых пластов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 13 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2015. – С. 105-107.
5. Барях А.А., Евсеев А.В., Глебова П.А., Васильева Е.Л. Прогноз оседаний земной поверхности по данным измерения деформаций горных выработок // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С.

УДК 622.02+622.2

DOI:10.7242/echo.2023.4.5

## ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

В.С. Кузьминых

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье приведены результаты проведения лабораторных испытаний образцов сильвинита с ВКМКС по схеме долговременного приложения растягивающих усилий. Эксперименты реализовывались на универсальной разрывной машине «Zwick Z050» при постоянных величинах прикладываемых нагрузок от 0,4 до 1,2 МПа, длительность опытов составляла от 7 до 14 суток. По итогам проделанных работ получена теоретическая зависимость длительной прочности при растяжении.

**Ключевые слова:** сильвинит, растягивающее усилие, скорость деформирования, степень нагружения.

В настоящее время для калийных рудников Верхнекамского месторождения весьма важной проблемой является обеспечение безопасных условий ведения работ при добычи полезных ископаемых. При камерной системе разработки, которая применяется на ВКМКС, необходимо уделять особое внимание состоянию кровли горных выработок [1], породы которой, как правило, находятся по действием растягивающих напряжений в течение длительного времени [2, 3]. Поэтому, работы связанные с изучением реологических свойств соляных пород, являются актуальными.

С целью проведения исследования были изготовлены пробы сильвинита призматической формы длиной 250 мм и поперечным сечением 50×50 мм.

Эксперименты проводились на универсальной электромеханической машине «Zwick 050» (максимальное усилие – 50 кН), позволяющей поддерживать постоянное растягивающее усилие с одновременной регистрацией продольных деформаций (рис. 1). Для исключения концевых эффектов, связанных с низкой контактной прочностью солей перед испытанием проводилась подготовка образца, заключающаяся в его цементации в специальных металлических матрицах [4].

Эксперимент состоял из двух частей. Первая часть заключалась в реализации стадии ползучести при вертикальных нагрузках ( $\sigma$ ) 0,4, 0,8 и 1,2 МПа. Период действия растягивающих усилий от 7 до 14 суток. По результатам испытаний по каждому образцу была получена диаграмма деформирования (рис. 2) и определялась скорость установившейся ползучести ( $v_{уст}$ ) на данной стадии.

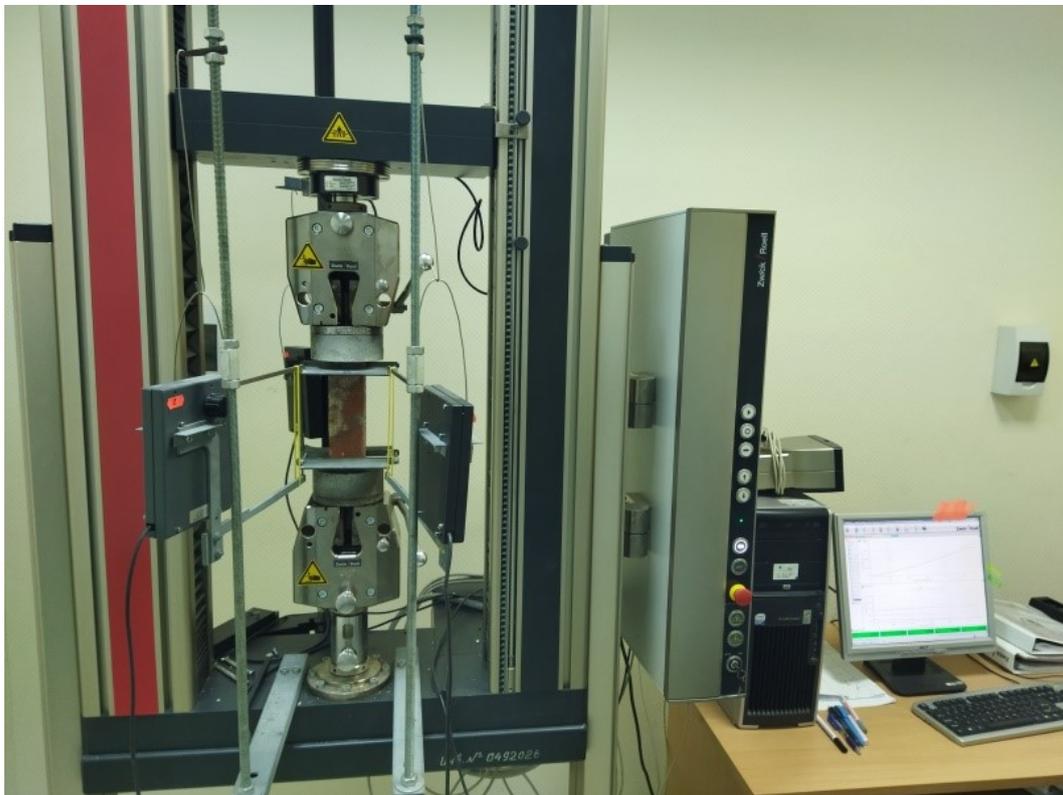


Рис. 1. Внешний вид испытательной машины «Zwick 050»

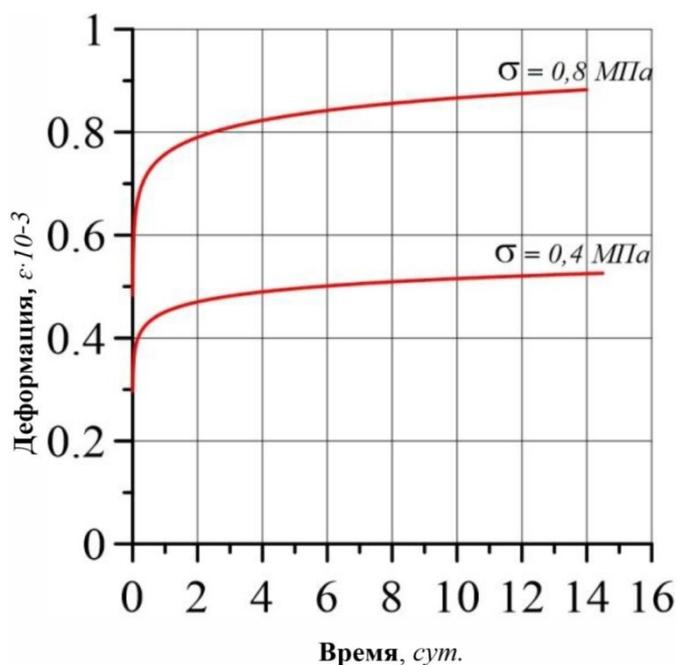


Рис. 2. Диаграммы деформирования по итогам первой части эксперимента

Вторая часть опыта была посвящена нахождению величины «истинной» степени нагружения ( $\sigma_0/\sigma_{np}$ ) путем доведения образца до образования открытой (видимой) трещины на поверхности, что обуславливало его полное разрушение.

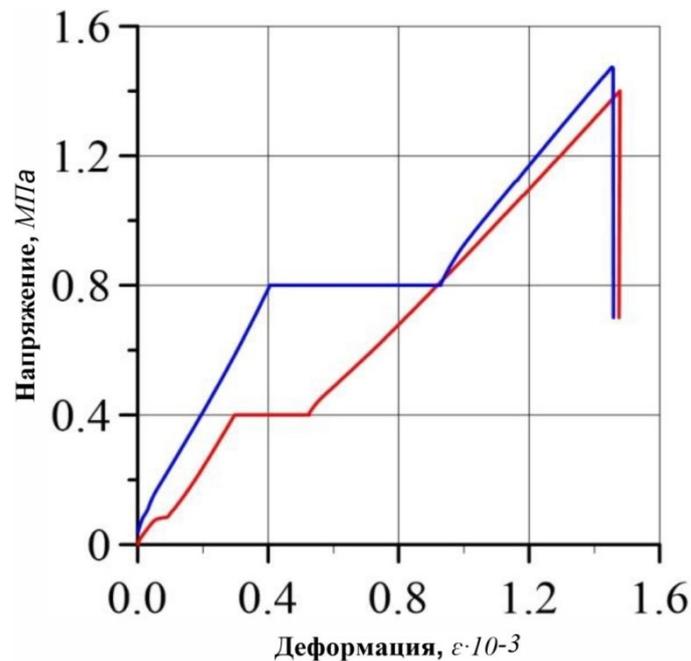


Рис. 3. Вид совмещенных диаграмм

По итогам проведения обеих частей эксперимента для каждого образца был построен график, который совмещал в себе деформационную и прочностную части первой и второй стадии нагружения (рис. 3). При анализе данных диаграмм были получены параметры, которые отображены в табл. 1. Также в таблице приведено оценочное время разрушения ( $t_*$ ) образца, определяемое по формуле:

$$t_* \approx \frac{\varepsilon_{np} - \varepsilon_{mg}}{v_{уст}} \quad (1)$$

Таблица 1

Результаты обработки кривых ползучести и совмещенных диаграмм деформирования

№ обр.	$\sigma$ , МПа	$\sigma_{np}$ , МПа	$\sigma/\sigma_{np}$	$\varepsilon_{mg}$	$\varepsilon_{np}$	$E$ , ГПа	$v_{уст}$ $\cdot 10^{-10}$ , $c^{-1}$	$t_*$ , сут
1	0,4	1,40	0,29	0,00030	0,00148	0,85	0,38	359
2	0,4	1,42	0,28	0,00017	0,00103	1,19	0,17	590
3	0,8	2,03	0,39	0,00048	0,00178	0,95	0,65	231
4	0,8	1,47	0,54	0,00040	0,00146	0,63	0,86	139
5	1,2	1,97	0,61	0,00040	0,00118	0,75	0,89	104
6	1,2	1,64	0,73	0,00108	0,00162	0,93	0,95	0,65
7	1,2	1,08	0,90	0,00146	0,00294	1,01	2,32	0,74
8	1,2	1,02	0,85	0,00083	0,00107	0,87	1,5	0,19

Полученные результаты использовались для построения зависимости, описывающей влияние степени нагружения на скорость установившейся ползучести (рис. 4).

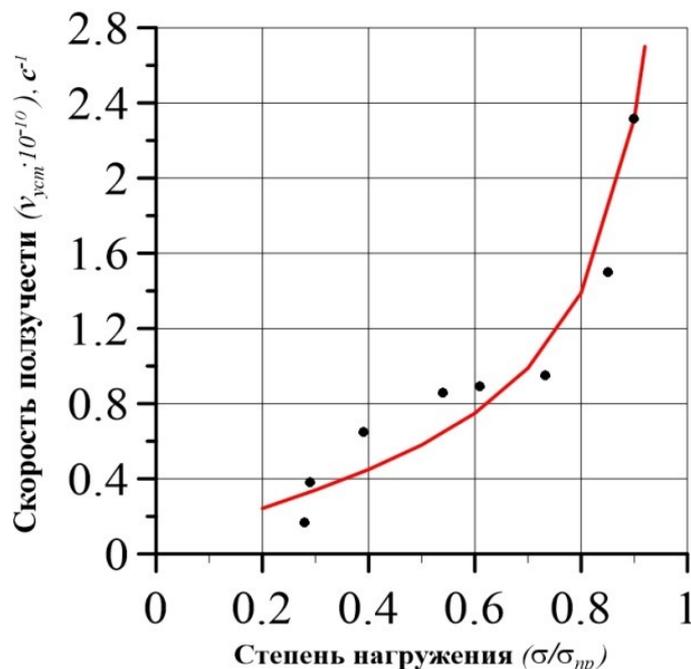


Рис. 4. Зависимость скорости установившейся ползучести от степени нагружения

Вид полученной аппроксимационной зависимости:

$$v_{уст}(\sigma/\sigma_{пр}) \approx 0,58 \cdot 10^{-10} \cdot \left( \frac{\sigma/\sigma_{пр}}{1 - \sigma/\sigma_{пр}} \right)^{0,63}, c^{-1}. \quad (2)$$

Учитывая, что при растяжении горных пород имеет место линейная связь между напряжениями и деформациями, а также с учетом выражения (2), уравнение (1) переписывается в виде:

$$t_* \approx \frac{\sigma_{пр}}{E} \cdot \frac{1 - \sigma/\sigma_{пр}}{v_{уст}(\sigma/\sigma_{пр})}, \quad (3)$$

Полученное время разрушения использовалось для теоретической оценки коэффициента длительной прочности с помощью уравнения:

$$K(t) = K_{\infty} + \frac{1 - K_{\infty}}{e^{at}}, \quad (4)$$

где  $K_{\infty}$  — коэффициент длительной прочности,  $a = 0,011$  — эмпирический коэффициент.

Для построения кривой длительной прочности использовались осредненные физико-механические показатели на растяжение силвинита, составляющие:  $\sigma_{пр} = 1,5$  МПа,  $E = 0,9$  ГПа,  $\sigma_{\infty} = 0,51$  МПа ( $\sigma_{\infty}/\sigma_{пр} = 0,34$ ), рис. 5.

Дальнейшее развитие данных исследований будет направлено на увеличение статической выборки при разных уровнях прикладываемой нагрузки для уточнения и корректировки параметров кривой длительной прочности при растяжении.

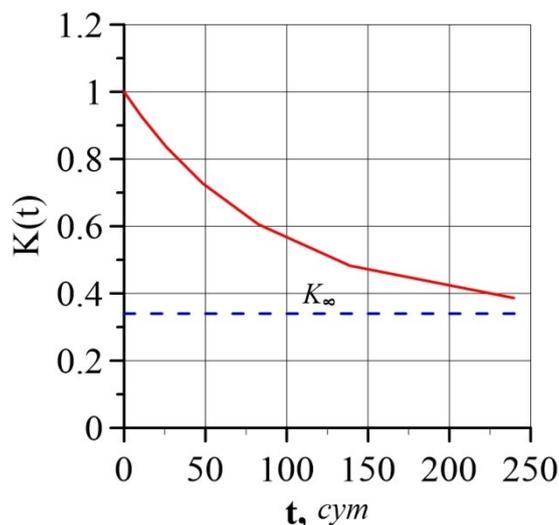


Рис. 5. Кривая длительной прочности

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер 122012000403-1), а также гранта РФФИ № 20-45-596011. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Исследования материалов и вещества» ПФИЦ УрО РАН и ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с.: ил.
2. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
3. Проскураков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 272 с.: ил.
4. Паньков И.Л., Гараева Ю.И. Исследование механических свойств соляных пород при растяжении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 154-157.

УДК 622.2

DOI:10.7242/echo.2023.4.6

## ОБ ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

И.А. Морозов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе приведено описание разработанной и реализованной методом конечных элементов математической модели деформирования вмещающих горные выработки пород для условий глубокого калийного рудника. Модель отражает основные факторы, определяющие устойчивость породных обнажений в рассматриваемых условиях: вид и параметры исходного поля напряжений, слоистость породного массива, ползучесть соляных пород. Для условий опытного участка горной выработки приведены результаты оценки изменения напряженно-деформированного состояния вмещающих горную выработку пород в зависимости от времени.

**Ключевые слова:** соляные породы, ползучесть, устойчивость горной выработки, глубокий рудник.

На сегодняшний день численность населения нашей планеты превысила отметку в 8 миллиардов человек [1]. В связи с этим для целого ряда наиболее густо населенных территорий вопросы обеспечения продовольственной безопасности приобретают особо важное значение. Решение указанной проблемы невозможно без увеличения площади и урожайности земель сельскохозяйственного назначения путем внесения в почву калийных удобрений, источником которых является калийная руда, добываемая подземным (шахтным) способом.

Исчерпание наиболее доступных полезных ископаемых ставит новые задачи перед горной наукой, связанные с необходимостью оценки и прогноза устойчивости горных выработок в сложных инженерно-геологических условиях. Гремячинский калийный рудник – это пример строительства современного предприятия, ведущего горные работы в условиях больших глубин (до 1300 м) при весьма сложных горно-геологических условиях, особенность которых заключается в следующем [2, 3]:

- высокий уровень исходного поля напряжений (24–25 МПа);
- промышленный сильвинитовый пласт средней мощностью около 10 м подстилают карналлитсодержащие породы прочностью не более 10-15 МПа;
- над пластом сильвинита располагаются ангидрит-доломитовые отложения, которые не склонны к проявлению деформации ползучести, а также обладают довольно высокими значениями показателей механических свойств по сравнению с соляными породами.

В настоящее время основная часть подготовительных горных выработок, пройденных в соляных породах Гремячинского месторождения, крепится анкерной крепью. На рис. 1а представлен пример горной выработки, закрепленной семью рядами анкеров в 2022 году. Аналогичные параметры крепления характерны для большей части подготовительных выработок. Но еще в 2018 году был оборудован опытный участок, который закреплен тремя рядами анкеров. Состояние выработки по прошествии 4 лет эксплуатации представлено на рис. 1б.

Анализ фактического состояния закрепленных горных выработок свидетельствует о том, что не всегда увеличение количества рядов анкеров приводит к повышению устойчивости породного обнажения. В этой связи актуальными являются исследования, направленные на оценку устойчивости горных выработок в условиях Гремячинского месторождения с целью определения рациональных параметров анкерного крепления подготовительных горных выработок. Одной из задач, направленных на достижение указанной цели, является обоснование и реализация математической модели деформирования вмещающих горные выработки пород в условиях месторождения методом конечных элементов. Решению указанной задачи посвящена настоящая работа.

а)



б)



**Рис. 1.** Выработки, закрепленные анкерной крепью:  
а – крепление в 2022 году, 7 рядов анкеров; б – крепление в 2018 году, 3 ряда анкеров

Установлено, что основными формами проявления горного давления в выработках, пройденных в соляных породах месторождения, являются пучение почвы и отжим пород боков. На некоторых участках интенсивное деформирование соляных пород приводит к разрыву анкеров и опорных плиток, установленных в сводчатой части кровли. Также в условиях слоистого строения кровли характерным проявлением горного давления является расслоение и отслоение пачек соляных пород.

Учитывая основные особенности деформирования вмещающих горные выработки пород в условиях Гремячинского ГОКа, была разработана и реализована методом конечных элементов математическая модель, которая учитывает возможный переход отдельных участков массива в предельное состояние в соответствии с критериями [4]:

$$\tau_{\text{пр}} = \sqrt{(\sigma_p + \sigma_n)(2\sigma_p - 2\sqrt{\sigma_p(\sigma_p + \sigma_{\text{сж}}^0) + \sigma_{\text{сж}}^0})},$$

$$\sigma_1 = \sigma_p,$$

где  $\tau_{\text{пр}}$  – предельное касательное напряжение, МПа;  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение, МПа;  $\sigma_p$  – предел прочности при одноосном растяжении породных образцов, МПа;  $\sigma_{\text{сж}}^0$  – предел прочности при одноосном сжатии породных образцов, МПа;  $\sigma_n$  – нормальное напряжение, действующее на площадке с  $\tau_{\text{пр}}$ , МПа.

Для соляных пород модель учитывает снижение длительной прочности  $\sigma_{\text{сж}}(t)$  с течением времени по формуле:

$$\sigma_{\text{сж}}(t) = \sigma_{\text{сж}}^0 f(t).$$

Функция  $f(t)$ , характеризующая снижение длительной прочности с течением времени, определяется по формуле [5]:

$$f(t) = C_\infty + \frac{1 - C_\infty}{1 + \beta t^{\alpha_0}},$$

где  $C_\infty$ ,  $\alpha_0$ ,  $\beta$  – эмпирические коэффициенты.

Деформация ползучести соляных пород определялась методом переменных параметров упругости [6, 7]:

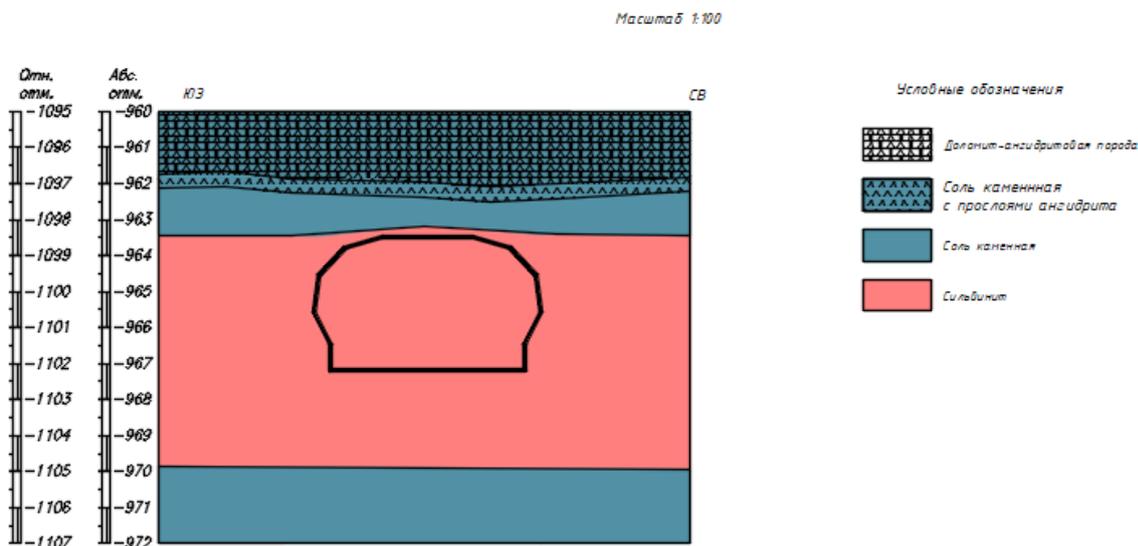
$$E(t) = \frac{E_0}{1 + \Phi(t)},$$

где  $E(t)$  – модуль упругости, соответствующий моменту времени  $t$ , ГПа;  $E_0$  – модуль упругости, соответствующий моменту проходки горной выработки  $t = 0$ , ГПа;  $\Phi(t) = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}$  – функция, характеризующая ползучесть соляных пород, в которой  $\alpha$ ,  $\delta$  – параметры ползучести.

В связи с тем, что одной из форм проявления горного давления в условиях Гремячинского месторождения является расслоение вмещающего горные выработки породного массива, моделирование контактов пород осуществлялось путем включения в расчетную схему ослабленных прослоев малой мощности с пониженными механическими характеристиками.

Параметрическое обеспечение математической модели выполнено с учетом лабораторных исследований породных образцов [8].

Верификация математической модели проведена по данным наблюдений на реперной станции, заложенной в одной из горных выработок, пройденной в один ход комбайном Урал-20Р. Геологическое строение вмещающих выработку пород представлено на рис. 2.



**Рис. 2.** Геологическое строение вмещающих выработку пород в месте оборудования реперной станции

Некоторые результаты тестовых расчетов, выполненных с использованием разработанной и реализованной математической модели, показаны на рис. 3. Оценка напряженно-деформированного состояния выполнена на примере одиночной горной выработки. Геологическое строение вмещающих пород принято в соответствии с разрезом, представленном на рис. 2.

Установлено, что лучшее соответствие результатам натуральных наблюдений даёт модель, в расчетную схему которой включены ослабленные прослои, моделирующие поведение контактов породных слоев (рис. 3б).

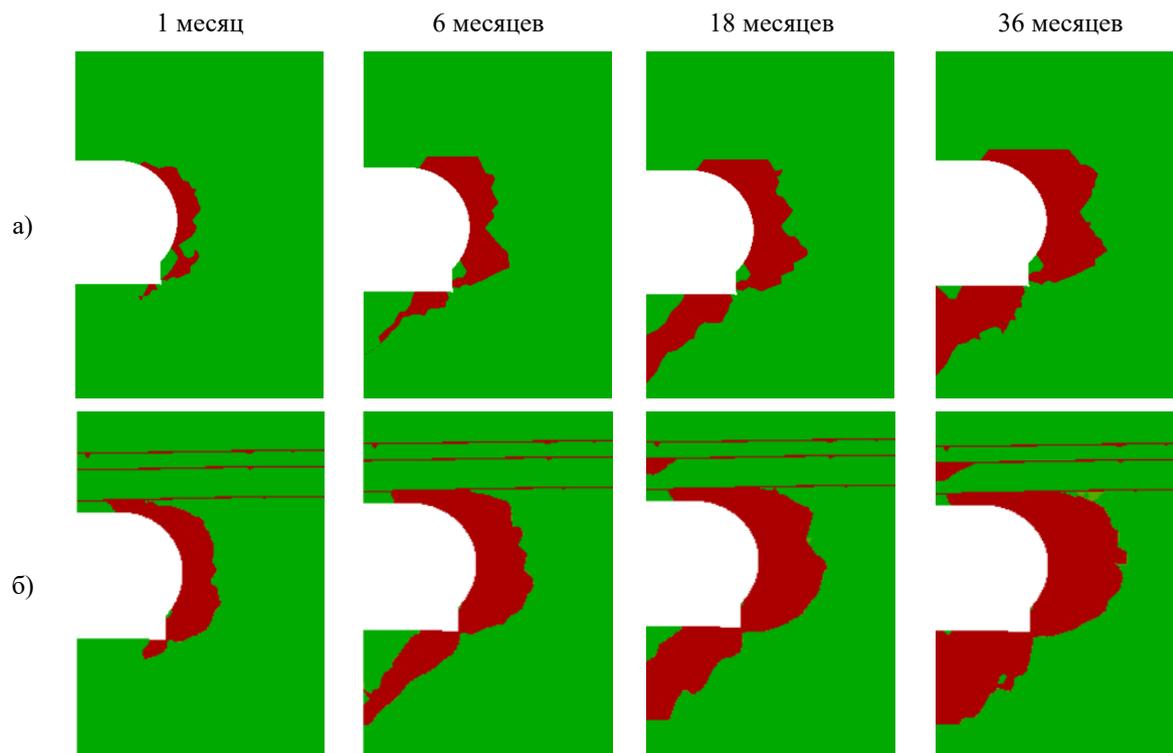
По результатам, представленным на рис. 3б установлено, что уже в первый месяц эксплуатации выработки в рассматриваемых условиях при отсутствии крепления возможно отслоение с последующим обрушением оставленной пачки сильвинита малой мощности в кровле выработки, а в течение 1,5 лет вероятно образование достаточно большой зоны запредельного деформирования в слое каменной соли. При этом расслоение пород кровли возможно до 1,6 м.

На основе сравнительного анализа результатов моделирования (рис. 3) можно сделать вывод о том, что при отсутствии крепления расслоение пород кровли может приводить к снижению устойчивости не только боков, но и почвы, что выражается в увеличении областей запредельного деформирования в боках и почве.

Обобщая изложенное, основными результатами исследования являются следующие:

- разработана и реализована методом конечных элементов математическая модель деформирования вмещающих горные выработки пород, которая учитывает основные факторы, определяющие устойчивость породных обнажений в условиях Гремячинского месторождения: вид и параметры исходного поля напряжений, слоистость породного массива, ползучесть соляных пород;

- для условий опытного участка горной выработки выполнена оценка изменения напряженно-деформированного состояния вмещающих горную выработку пород в зависимости от времени.



**Рис. 3.** Распределение зон запредельного деформирования во вмещающих выработку породах в зависимости от времени: а – без учета влияния контактов пород; б – с учетом влияния контактов пород в виде ослабленных прослоев

Разработанную и реализованную методом конечных элементов математическую модель планируется использовать при многовариантном численном моделировании изменения состояния вмещающих горные выработки пород в условиях Гремячинского ГОКа с целью обоснования рациональных параметров анкерного крепления подготовительных горных выработок.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. UN DESA. World Population Prospects 2022: Summary of Results. – New York: United Nations, 2022. – 52 p.
2. Поспелов Д.А., Токсаров В.Н. Результаты скважинных испытаний по определению деформационных свойств горных пород в условиях глубокого калийного рудника // Горное эхо. – 2023. – № 1 (90). – С. 59-64. – DOI: 10.7242/echo.2023.1.8.
3. Свидзинский С.А., Музалевский М.М., Ковальский Ф.И. Гремячинское месторождение сильвинитов // Новые данные по геологии соленосных бассейнов Советского Союза. – М., 1986. – С. 204-219.
4. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 6. – С. 32-41.
5. Титов Б.В. Исследование и разработка метода определения длительной прочности соляных горных пород при сжатии : дис. ... к.т.н. 05.15.11 / Титов Борис Васильевич. – Березники, 1983. – 248 с.: ил.
6. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород / [отв. ред. Н.С. Булычев]. – Екатеринбург, 1996. – 204 с.: ил.
7. Амузин Б.З. Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1974. – № 6. – С. 162-166.
8. Морозов И.А., Ударцев А.А., Паньков И.Л. Анализ деформирования соляных пород Гремячинского и Верхнекамского месторождений в лабораторных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 10. – С. 16-28. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-16-28.

## ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕННОЙ СОЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ ПАЛЕОНАПРЯЖЕНИЙ

В.Н. Токсаров

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье рассматривается возможность использования микроструктурных особенностей каменной соли и других пород для оценки максимальной величины палеонапряжений. Показано, что в режиме установившейся ползучести каменной соли существует связь между разностью главных напряжений и следующими микроструктурными параметрами: размер рекристаллизованного зерна, размер субзерна и плотность свободных дислокаций. Размер рекристаллизованного зерна является наиболее надежным индикатором величины девиаторного напряжения, а плотность свободных дислокаций, вероятно, наименее надежным. В статье приведены основные формулы и описаны методики оценки дифференциальных напряжений в породном массиве на основе лабораторных исследований.

**Ключевые слова:** каменная соль, размер субзерна, плотность свободных дислокаций, рекристаллизованное зерно, дифференциальные напряжения, пластовая соль, соляной купол, палеонапряжения, микроструктуры.

### 1. Введение

С точки зрения геомеханики результаты исследования микроструктурных особенностей различных пород важны для обоснования оценки максимальных значений палеонапряжений, являющихся основной причиной деформирования пород во времени.

Возможно ли распознать прошлую активность конкретного механизма деформации и исходя из этого определить реологические условия во время деформации? Исследователи дают на этот вопрос в основном утвердительный ответ, мотивируя тем, что механизмы деформации создают относительно характерные микроструктуры, которые можно наблюдать в лабораторных условиях на шлифах [1]. При этом необходимо учитывать, что «память» породы может быть неполной; может сохраниться только самый поздний механизм деформации. В работе [1] отмечается, что «как только будет установлен действующий механизм деформации на основе микроструктур, можно приступить к прогнозированию условий температуры, напряжения и скорости деформации во время деформации, что является основной причиной изучения микроструктур».

Исследователями установлено, что в режиме установившейся ползучести каменной соли (и др. пород) существует связь между уровнем дифференциальных напряжений и следующими микроструктурными параметрами: размером рекристаллизованного зерна, размером субзерна и плотностью свободных дислокаций.

### 2. Взаимосвязь между дифференциальным напряжением и размером рекристаллизованного зерна

Рекристаллизацией называется процесс удаления внутренней энергии деформации, которая остается в зернах после восстановления; она образует границы зерен под большим углом, которые отделяют относительно свободные от деформации зерна друг от друга. В горных породах перекристаллизованная микроструктура характеризуется зернами без волнообразного угасания и с относительно прямыми границами зерен, которые сходятся под углами около 120°.

Рекристаллизация в поле анизотропных напряжений (т.е. дифференциальных напряжений) называется динамической рекристаллизацией. Динамическая рекристаллизация приводит к уменьшению размера зерен, что хорошо известно по лабораторным исследованиям.

Рекристаллизация, происходящая в условиях изотропных напряжений или когда снимается дифференциальное напряжение, называется статической рекристаллизацией, в противном случае известной как отжиг. С точки зрения микроструктуры единственное, что отличает статическую рекристаллизацию от динамической, это относительно больший размер перекристаллизованного зерна. Статическая перекристаллизация снижает энергию внутренней деформации за счет образования относительно крупных зерен без деформации, которые растут, уменьшая общую свободную энергию породы.

Исследования динамической рекристаллизации осложняются двумя различными механизмами, которые приводят к разной деформации микроструктуры: (1) ротационная рекристаллизация (иногда называемая рекристаллизацией *in situ*), при которой постепенное увеличение разориентации субграниц после начальной полигонизации дислокационных структур в конечном итоге приводит к появлению новых границ зерен под большим углом; (2) миграционная рекристаллизация (или рекристаллизация путем миграции границ, вызванной напряжением), при которой миграция разрушения существующих границ зерен проходит через деформированную микроструктуру, заменяя полигонизированный материал новыми областями, свободными от деформаций.

Появление рекристаллизованных зерен обусловлено образованием и движением дислокаций, которые, в свою очередь, зависят от величины дифференциального напряжения. Следовательно, можно ожидать, что существует взаимосвязь между размером перекристаллизованных зерен и величиной дифференциального напряжения. Действительно, эксперименты показали, что характерный диапазон размеров зерен имеет место при определенных условиях напряжения и механизме рекристаллизации. Это означает, что потенциально возможно оценить уровень палеонапряжения по результатам изучения микроструктур, то есть размер перекристаллизованного зерна можно использовать в качестве палеопьезометра [1-6]. Как отмечается в [1] «это потенциально это очень мощный инструмент для понимания деформации, поскольку палеонапряжение, как известно, является сложным параметром для оценки». Хотя в процессе дискуссий точное соотношение не установлено, но общепризнано, что размер перекристаллизованного зерна обратно пропорционален величине дифференциального напряжения

$$\sigma_d = A \cdot d^{-i}, \quad (1)$$

где  $\sigma_d$  – дифференциальное напряжение ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ),  $A$  и  $i$  – эмпирически полученные параметры для минерала,  $d$  – размер зерен в микрометрах (мкм).

Необходимо учитывать, что палеопьезометрия сопряжена со значительной неопределенностью. В целом небольшой размер перекристаллизовавшихся зерен в деформированной породе отражает высокую скорость деформации, большую величину дифференциального напряжения или сочетание того и другого. Эксперименты с горными породами показывают, что соответствующая функция напряжений при перекристаллизации имеет вид  $f(\sigma) = \sigma^n$ , поэтому ее также называют ползучестью с усилением [1, 2]. Значение  $n$  – показатель напряжения, который изменяется, но обычно находится в диапазоне от 2 до 5 для обычных мономинеральных пород.

### **3. Взаимосвязь между дифференциальным напряжением и размером субзерна на примере каменной соли**

Расчеты дифференциальных напряжений и скоростей деформаций в большинстве материалов, деформирующихся в результате процессов дислокационной ползучести, показали, что размер установившегося субзерна обратно пропорционален дифференциальным напряжениям и не зависит от других переменных [6]

$$D = k\sigma_d^{-m}, \quad (2)$$

где  $D$  – средний размер субзерна,  $\mu\text{m}$ ;  $\sigma$  – величина дифференциального напряжения, МПа;  $k$  и  $m$  – материальные константы.

По другим данным при расчете средних размеров субзерен, полученных в процессе динамического восстановления, в формулу добавляется модуль упругости [7]

$$D = k(\sigma_d/E)^{-m}, \quad (3)$$

$E$  – модуль упругости, ГПа.

Исследованиями установлено, что размер субзерен монотонно уменьшается с увеличением разницы напряжений, независимо от температуры и деформации ( $> 1\%$ ).

Для определения среднего размера субзерен шлифы галита анализируются с использованием микроскопии в проходящем и отраженном свете. Перед экспериментом соляные пластины протравливаются в течение 30–50 секунд в различных растворах (5-мольный раствор NaCl, ледяная уксусная кислота и т.д.).

Обзор микроструктурных исследований природных солей показал, что диапазон величины дифференциальных напряжений в массиве составляет  $0,5 \div 5,5$  МПа [8]. Предварительно установлено, что величина девиаторных напряжений в соляном массиве может зависеть от степени деформированности соли и наличия в ней примеси.

#### 4. Взаимосвязь между дифференциальным напряжением и плотностью свободных дислокаций на примере каменной соли

В экспериментах по стационарному деформированию кристаллических материалов плотность свободных дислокаций достигает значения, которое напрямую связано с величиной приложенного дифференциального напряжения. Таким образом, исследователями было сделано предположение, что плотность дислокаций может служить показателем уровня дифференциального напряжения, присутствующего при разрушении горных пород в геологических условиях [2, 9, 10].

Использование плотности дислокаций в качестве палеопьезометра для естественно деформированных пород имеет некоторые ограничения [2], которые связаны с довольно высокой скоростью, с которой плотность дислокаций изменяется в ответ на изменение уровня напряжения. В результате плотность дислокаций, измеренная в естественно деформированной породе, будет свидетельствовать в первую очередь о последнем событии деформации, испытанном породой, или о статическом отжиге после деформации.

Используемые теоретические модели позволяют сделать вывод о том, что плотность свободных дислокаций сильно зависит от напряжения и слабо зависит от температуры через модуль сдвига и вектор Бюргерса. Взаимосвязь дифференциальных напряжений с плотностью дислокаций описывается соотношением [9]:

$$\sigma_d = \alpha \mu b \rho^{1/2}, \quad (4)$$

где  $\sigma_d$  – дифференциальное напряжение,  $\mu$  – средний модуль сдвига,  $b$  – активный вектор Бюргерса,  $\rho$  – плотность дислокаций и постоянная материала. Величина  $\alpha$  изменяется в диапазоне от 0,8 до 5,2 для различных металлов, сплавов, ионных солей и силикатов. Для хлорида натрия ее значение лежит в диапазоне от 0,8 до 1,4 для синтетических монокристаллов высокой чистоты. В работе [11] для анализа данных по различным материалам использовалась более общая взаимосвязь:

$$\sigma_d \alpha \rho^l \quad (5).$$

При этом установлено, что показатель плотности  $l$  варьируется в диапазоне от 0,45 до 3,0. Для каменной соли этот показатель изменяется в интервале от 0,2 до 0,8 [9].

В большинстве случаев плотность дислокаций измеряется путем травления поверхностей кристаллов для получения углублений в местах возникновения дислокаций (метод травления ямок).

Эксперименты по определению плотности дислокаций в зависимости от напряжения в хлориде натрия привели к следующим выводам [9]:

– плотность дислокаций пропорциональна дифференциальному напряжению приблизительно в степени 1,3; плотность дислокаций не зависит от общей величины деформации и температуры при деформировании образцов в режиме вторичной ползучести;

– уровни примесей в образцах не влияют на общую плотность дислокаций, но влияют на соотношение плотностей краевых и винтовых дислокаций; образцы с высоким содержанием примесей демонстрируют более высокую, чем в среднем, плотность краевых дислокаций и более низкую, чем в среднем, плотность винтовых дислокаций.

## 5. Выводы

1. По результатам анализа установлено, что для оценки палеонапряжений в каменной соли пригодны все три рассматриваемых микроструктурных параметра: размер рекристаллизованного зерна, размер субзерна и плотность свободных дислокаций. При этом размер рекристаллизованного зерна является наиболее надежным индикатором величины дифференциального напряжения, а плотность свободных дислокаций, вероятно, наименее надежным.

2. Обзор микроструктурных исследований природных солей показал, что диапазон величины дифференциальных напряжений в массиве составляет 0,5÷5,5 МПа. Предварительно установлено, что величина девиаторных напряжений в соляном массиве может зависеть от степени деформированности соли и наличия в ней примеси.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Van der Pluijm B.A., Marshak S. Earth structure: an introduction to structural geology and tectonics. – 2nd ed. – New York: W.W. Norton, 2004. – 656 p.
2. Twiss R.J. Theory and applicability of a recrystallized grain size paleopiezometer // PAGEOPH. – 1977. – V. 115. № 1-2. – P. 227-244. – DOI: 10.1007/BF01637105.
3. Derby B. Dynamic recrystallization and grain size // Deformation Processes in Minerals, Ceramics and Rocks. – London: Unwin Hyman, 1990. – P. 354-364.
4. Urai J.L., Means W.D., Lister G.S. Dynamic recrystallization of minerals / American Geophysical Union; ed. Hobbs B.E., Heard H.C. – Washington, 1986. – V/ 36. – P. 161-199. – (Geophysical Monograph Series).
5. Prior D.J., Bestmann M., Halfpenny A., Mariani E. Recrystallization and Grain Growth in Rocks and Minerals // Materials Science Forum. – 2004. – V. 467-470. – P. 545-550.
6. Schlöder Z., Burliga S., Urai J.L. Dynamic and static recrystallization-related microstructures in halite samples from the Klodawa salt wall (Central Poland) as revealed by gamma-irradiation // Neues Jahrbuch für Mineralogie-abhandlungen: Journal of mineralogy and geochemistry. – 2007. – № 184 (1). – P. 17-28. – DOI: 10.1127/0077-7757/2007/0079.
7. Carter N.L., Hansen F.D., Senseny P.E. Stress magnitudes in natural rock salt // Journal of geo-physical research. – 1982. – V. 87, № B11. P. 9289-9300. – DOI: 10.1029/JB087iB11p09289.
8. Токсаров В.Н. Микроструктурные особенности и напряженное состояние соляных пород // Горное эхо. – 2021. – № 2 (83). – С. 24-27. – DOI: 10.7242/echo.2021.2.6.
9. Beeman M.L., Kohlstedt D.L. Dislocation density: stress relationships in natural and synthetic sodium chloride // Tectonophysics. – 1988. – V. 148, № 1. – P. 147-161. – DOI: 10.1016/0040-1951(88)90167-9.
10. Tullis J.A. High temperature deformation of rocks and minerals // Reviews of Geophysics. – 1979. – V. 17, № 6. – P. 1137-1154. – DOI: 10.1029/RG017i006p01137.
11. Takeuchi S., Argon A.S. Steady-state creep of single-phase crystalline matter at high temperature // Journal Materials Science. – 1976. – V. 11, № 8. – P. 1542-1566. – DOI: 10.1007/BF00540888.

# ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

УДК 550.83

DOI:10.7242/echo.2023.4.8

## ОБ ОБРАБОТКЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ЗАПИСЕЙ ГРАВИМЕТРА AUTOGRAV

И.В. Геник

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Опыт использования долговременных записей гравитационного поля имеет длительную историю, но только в последние 20-25 лет использование гравиметрических данных, охватывающих длинные временные интервалы, стало достаточно массовым. Этому способствовали появление компьютеризированных гравиметров и специальные спутниковые миссии по наблюдению гравитационного поля.

В статье выполняется анализ подходов к интерпретации длительных наблюдений гравитационного поля и описывается опыт первоначального анализа данных гравитационного поля, полученных при долговременных наблюдениях в феврале-мае 2017 г. гравиметром Autograv.

Традиционные приемы интерпретации длительных регистраций гравитационного поля предусматривают использование небольшого числа легко реализуемых интерпретационных методов: сопоставление графиков, осреднение и вычисление локальных аномалий, Фурье-анализ, корреляционно-регрессионный анализ.

Для исследования исходных данных был создан первый вариант программы анализа временных рядов, включающий: ввод данных, контроль, визуализацию, вычисление описательной статистики, удаление тренда, сглаживание в скользящем окне, спектральный анализ, расчет автокорреляционной функции и доверительных интервалов. Приложение было разработано на языке программирования Python с использованием математических и статистических библиотек этого языка, что позволило воспроизвести имеющиеся подходы к интерпретации долговременных наблюдений гравитационного поля, а также сделать возможным в дальнейшем расширение спектра используемых методов за счет новых и более детальных подходов. В статье приведены некоторые из результатов работы программы.

Дальнейшее развитие программы связано как с использованием всех возможностей языка программирования (хранение в базе данных временных рядов и результатов, что обеспечивает удобство манипуляции с ними; создание клиент-серверного варианта приложения), имеющихся библиотек (построение регрессионных зависимостей; статическое оценивание форм распределений различных данных; новые интерфейсные библиотеки и др.), так и с параллельной обработкой нескольких наборов исходных данных.

**Ключевые слова:** геофизика, гравиразведка, гравиметр, мониторинг, временные ряды, интерпретация, программное обеспечение.

### Введение

В настоящее время можно выделить следующие основные направления, связанные с исследованием долговременных записей гравиметров.

Первое направление включает спутниковые исследования гравитационного поля Земли [17], а также наземные долговременные абсолютные наблюдения, связанные с задачами геодезии и спутниковыми системами навигации [15]. Спутниковые миссии регистрировали временные вариации гравитационного поля для изучения перемещений масс над и под поверхностью Земли: GRACE – изменений массы ледников (вследствие вариаций климата), а также мантийных процессов [16], GOCE – океанских течений [19], CHAMP – атмосферы [18].

Второе направление связано с геодинамическими исследованиями регионального и локального масштабов на геодинамических полигонах для изучения: землетрясений [5], включая, предвестники [2]; вертикальных движений земной коры [9]; зоны перехода суша-море [7]; влияния уровня грунтовых вод [10]; гравитационного поля во время солнечных затмений [13] и др.

Третье направление включает гравиметрический мониторинг месторождений полезных ископаемых. В России это в первую очередь это касается газовых и газоконденсатных месторождений [8, 12], так как имеется значимый гравитационный эффект после замещения газа и газоконденсата водой.

Четвертое направление, относительно новое, связано с длительными одновременными измерениями современными полевыми гравиметрами (Scintrex CG-5 Autograv), расположенными в удаленных друг от друга пунктах наблюдения [3, 4, 11, 14]. В ходе таких наблюдений зафиксированы случаи синхронного повышения интенсивности микросейсмических шумов.

Гравиметры фирмы Scintrex имеют следующие основные характеристики: смещение нуля-пункта за 24 часа составляет не более 0.02 мГал; пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений разности значений ускорения свободного падения в рабочем диапазоне  $\pm 5$  мкГал. При этом характерные гравиметрические аномалии различных объектов и процессов имеют следующие порядки величин и характерные размеры. Аномалии крупных нефтяных месторождений порядка 1 мГал; приливы дают аномалии порядка 0.1 мГал, максимальный эффект лунно-солнечных возмущений около 0.24 мГал; поле около больших зданий и сооружений изменяется около 0.01 мГал; на широте  $50^\circ$  размах суточных изменений гравитационного поля силы тяжести составляет примерно 0.15 мГал; на геодинамических полигонах годовые неприливные изменения силы тяжести порядка сотых долей мГал.

В статье для последнего из указанных направлений рассматриваются вопросы начальной обработки данных полевых гравиметров, охватывающих длинные временные интервалы.

### **Методы и подходы**

Рассмотрим применяемые разными авторами методы обработки долговременных записей гравиметров. Одним из первых приемов обработки данных является вычисление разностных аномалий между экспериментальными данными и принятой моделью [2, 4, 17], при этом в модель могут вноситься поправки за влияние атмосферных, гидрологических и иных факторов [5]. Следующим распространенным методом является построение трендов, зачастую линейных [5], поскольку объем априорной информации ограничен, не давая оснований строить более сложные модели. Осреднение в скользящем окне – еще один распространенный метод [2, 14]. Может выполняться простое сопоставление графиков [2, 3, 14], дополняемое в ряде случаев построением корреляционных матриц [14] или диаграмм [7]. Более углубленная обработка может включать разделение поля на компоненты с разной частотой для анализа спектра исследуемой величины [1, 7]. Применяются иногда и более продвинутые методы, например [16], метод главных компонент для многомерных временных рядов – статистический метод, используемый для уменьшения числа степеней свободы задачи, преобразующий набор коррелированных между собой переменных в набор некоррелированных переменных посредством ортогонального преобразования.

Перечисленные выше методы характерны, пожалуй, для большинства подходов к обработке долговременных записей гравитационного поля. Таким образом, базовый набор методов для обработки долговременных временных рядов гравитационного поля должен включать: осреднение, линейную и нелинейную аппроксимацию данных, спектральный и корреляционный анализ.

### **Результаты и обсуждение**

Отработка методик и создание начального варианта программы обработки и анализа временных рядов проводилась с использованием одной из записей гравитационного

поля, сданной гравиметром CG-5 Autograv. Параметры записи: измерения в период 18.02.2017–03.04.2017; 63382 отсчета; шаг измерений равен 57 с. В файле записи результатов измерений гравиметра имеется следующий набор данных: показания гравиметра (в мГал), вычисляемые как среднее арифметическое отсчетов за один цикл измерения на пункте; стандартное отклонение отсчетов (в мГал), автоматически взятых гравиметром с частотой 6 Гц в течение одного цикла измерений; максимальное отклонение кварцевой системы от вертикали вдоль осей X и Y в течение цикла измерений; температурная поправка (в мГал); величина поправки за лунно-солнечное притяжение (в мГал); длительность одного цикла измерений на пункте в секундах; число забракованных отсчетов в течение цикла измерений; время измерения и дата измерения.

Показания гравиметра изменялись от 6536.732 до 6549.080 мГал за счет смещения нуля пункта или, приблизительно, более 0.2 мГал в день. Количество забракованных отсчетов было равно нулю для каждого измерения.

Для стандартного отклонения получены следующие статистические характеристики (в мГал): минимум 0.007, максимум 1.782, среднее 0.035, медиана 0.031, стандартное отклонение выборки 0.0214, межквартильный размах (Q3-Q1) 0.025, асимметрия 12.213; эксцесс 794.520.

Характеристики других величин, уже учтенные в показаниях гравиметра, следующие. Температурная поправка (в мГал): минимум 0.15, максимум 0.39, среднее и медиана близки между собой и равны 0.250. Поправки за лунно-солнечное притяжение (в мГал): минимум –0.102, максимум 0.046, среднее –0.047, медиана –0.057.

В целом можно отметить, что данные качественные, их не надо дополнительно преобразовывать, например, ранжировать и придавать веса в зависимости от числа забракованных отсчетов.

Для обработки и анализа временных рядов была создана на языке программирования Python программа «Анализ временных рядов».

Разработка программы необходима вследствие указанных далее причин.

1) обработка результатов в рамках табличных процессоров (Microsoft Excel, LibreOffice Calc и др.) относительно трудоемка, для ускорения и упрощения работы требуется программирование на встроенных языках этих таблиц;

2) отсутствие свободных (open source) программ для анализа гравиметрических временных рядов;

3) имеющиеся геофизические программы либо предназначены для обработки профильных гравиметрических данных, либо предназначены для обработки других (магнитотеллурических) методов;

4) использование статистических программ общего назначения предполагает специальную подготовку данных к вводу; возможна адаптация статистических программ с использованием встроенных языков, но в этом случае от значительного объема программирования не уйти.

При этом дополнительного положительного эффекта не будет, поскольку все алгоритмы имеются в библиотеках Python. Применение статистических пакетов оправдано, пожалуй, для проверки работы некоторых алгоритмов разрабатываемой программы.

Для разработки программы «Анализ временных рядов» использовались следующие библиотеки языка Python: Tkinter – создание графического интерфейса; Matplotlib – визуализация данных и результатов обработки; NumPy – векторные операции с массивами (векторизация данных существенно ускоряет и облегчает программирование); Scipy – набор главных общеупотребительных математических алгоритмов; Statsmodels – статистические модели; Scikit-learn – линейная регрессия; Numba – ускорение вычислений для собственных алгоритмов.

В программе предусмотрена возможность контроля и преобразования введенных данных с выдачей статистики или диагностических сообщений об исходных и измененных данных.

Например, анализ временного ряда стандартного отклонения (рис. 1) показал следующее: положительное значение асимметрии (12.213) указывает на то, что правый хвост распределения длиннее левого, что хорошо видно на распределении, приведенном на рис. 2а. Большая величина эксцесса, равная 794.520, свидетельствует о наличии очень острого пика распределения случайной величины. В геофизике и других науках такого рода наборы данных с преобладающим правым хвостом распределения свидетельствуют о его логнормальном характере. Логнормальное распределение может быть приведено к нормальному виду за счет логарифмирования данных, что хорошо иллюстрирует рис. 2б.



Рис. 1. Временной ряд стандартного отклонения отсчетов

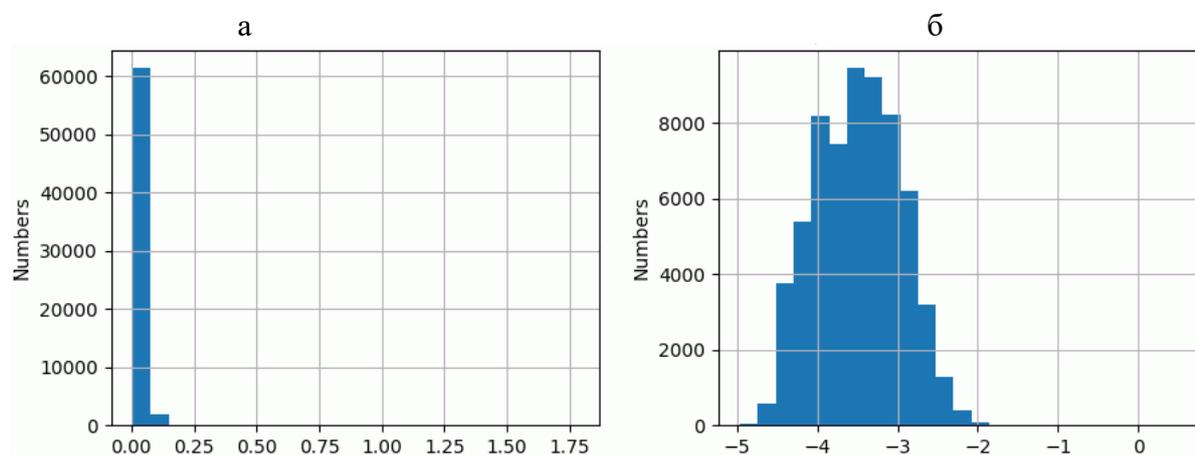


Рис. 2. Распределение значений стандартного отклонения.  
а – исходные значения, б – логарифмированные значения

Другие этапы работы с данными также предусматривали численный и визуальный контроль.

В программе были реализованы все указанные выше компоненты базового набора обработки: осреднение в скользящих окнах разной длины; построение линейной аппроксимации данных; спектральный анализ (получение амплитудно-частотных характеристик) с использованием быстрого преобразования Фурье, вычисление автокорреляционных функций с построением доверительных интервалов для них. Для исходных

данных статистически значимые значения автокорреляционной функции были для 3000-6000 отсчетов (50-100 часов). Для стандартного отклонения статистически значимые значения автокорреляционной функции были для 3000 отсчетов.

### Выводы

Таким образом, на данном этапе работ выполнено следующее:

а) собраны материалы российских и зарубежных авторов по анализу гравиметрических временных рядов;

б) проанализированы особенности работы с данными, выделены наиболее часто встречающиеся алгоритмы обработки и интерпретации;

в) создан первый вариант программы «Анализ временных рядов», включающий: ввод и контроль данных, визуализацию, расчет описательной статистики, снятие линейного тренда, сглаживание в скользящем окне, спектральный Фурье-анализ, расчеты автокорреляционных функций и доверительных интервалов для них.

Дальнейшие направления исследований связаны как с техническими, так и сущностными совершенствованиями программы.

Технические улучшения: предполагаю более широкое использование возможностей Python:

а) хранение в базе данных временных рядов и результатов, что обеспечит удобство работы с данными, снимая необходимость написания своих процедур выборки, фильтрации и др.; рационально опробовать в качестве баз данных SQLite и PostgreSQL как варианты бессерверной и клиент-серверной баз данных;

б) разработка клиент-серверного варианта, что позволит создать базу к переходу от десктопного к веб-приложению;

в) тестирование новых интерфейсных библиотек (Flet, Streamlit и др.), поскольку функциональные возможности Tkinter хотя и просты при первоначальном старте, но в дальнейшем очень трудно расширяемы.

Сущностные усовершенствования предполагают расширение спектра применяемых алгоритмов и способов обработки:

а) использование всех возможностей математических и статистических библиотек Python: регрессионные зависимости, статические оценивания форм распределений для различных данных и др.;

б) работа с несколькими наборами данных с распараллеливанием вычислений по ядрам процессора.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов Ю.В. Высокочастотные колебания неприливных сейсмо-гравитационных пульсаций // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2022. – № 3. – С. 66-75. – DOI: 10.17308/geology/1609-0691/2022/3/66-75.
2. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Неприливные вариации силы тяжести как возможный критерий краткосрочного прогноза землетрясений // Экологический вестн. науч. центров Черноморского экономич. сотрудничества. – 2015. – Т. 12, № 1. – С. 5-13.
3. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Синхронность сейсмогравитационных пульсаций // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2020. – № 2. – С. 76-82. – DOI: 10.17308/geology.2020.2/2861.
4. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю., Волкова Е.Н. Результаты синхронных наблюдений лунно-солнечных вариаций силы тяжести в различных широтах (гг. Саратов и Бишкек) // Вестник ВГУ. Сер. Геология. – 2010. – № 1. – С. 213-217.
5. Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Валитов М.Г., Тимофеев А.В., Носов Д.А., Сизиков И.С., Бойко Е.В., Горнов П.Ю., Кулинич Р.Г., Колпащикова Т.Н., Прошкина З.Н., Назаров Е.О., Колмогоров В.Г. Вариации силы тяжести и смещений в зонах сильных землетрясений на востоке России // Физика Земли. – 2018. – № 3. – С. 45-59. – DOI: 10.7868/S0002333718030043.

6. Гравиметры CG-5 Autograv // Поверь.ру: сайт. – Текст электронный. – URL:<http://www.pover.ru/spravochnik-sredstv-izmerenij/60415-15-gravimetry-cg-5-autograv>. (Дата обращения 28.09.2023).
7. Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Кулинич Р.Г., Колпащикова Т.Н. Изучение приливных вариаций силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю // Вестн. КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2015. – № 3 (27). – С. 71-79.
8. Каленицкий А.И., Ким Э.Л. О комплексной интерпретации данных геодезическо-гравиметрического мониторинга техногенной геодинамики на месторождениях нефти и газа // Вестник СГГА. – 2012. – № 4. – С. 3-13.
9. Милюков В.К., Юшкин В.Д., Миронов А.П., Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Дзеранов Б.В. Мониторинг приращений силы тяжести на опорных гравиметрических пунктах Северного Кавказа высокоточными относительными гравиметрами // Геология и Геофизика Юга России. – 2013. – № 2. – С. 39-45.
10. Морозов А.В., Баранов В.Н., Андреев В.К. Вариации силы тяжести из-за влияния уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 4. – С. 92-97. – DOI: 10.17513/use.37815.
11. Абрамов Д.В., Бебнев А.С., Бычков С.Г., Горожанцев С.В., Герман В.И., Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Красилов С.А., Овчаренко А.В., Юшкин В.Д. Одна из возможных причин синхронных континентальных микросейсм Северной Евразии // Физика Земли. – 2020. – № 4. – С. 123-131. – DOI: 10.31857/S000233372004002X.
12. Кирсанов С.А. Арно О.Б., Меркулов А.В., Арабский А.К., Андреев С., Картелян Е.Д., Афанасьев П.Р. Современные технологии гравиметрического мониторинга для контроля последствий отбора газа из недр // Газовая промышленность. – 2015. – № 10. – С. 36-41.
13. Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Сизиков И.С., Носов Д.А., Смирнов М.Г. Гравиметрические наблюдения при солнечных затмениях в Сибири // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 125-137.
14. Дробышев М.Н., Абрамов Д.В., Бычков С.Г., Конешов В.Н., Герман М.И., Храпенко О.А., Горожанцев С.В., Красилов С.А., Бебнев А.С., Овчаренко А.В. Эксперимент по изучению синхронных континентальных микросейсм в Северной Евразии методом комплексирования гравиметрических и сейсмических наблюдений // Геология и геофизика юга России. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 83-94. – DOI:10.23671/VNC.2019.2.31979.
15. Francis O. Long time series of absolute gravity observations in Kulusuk, southeast Greenland // Geoscience Data Journal. – 2022. – 00. 1-4. – DOI: 10.1002/gdj3.183.
16. GRACE Satellite Gravimetry for Geosciences. Remote Sensing. Special Issue. – 2021. – URL: [https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special\\_issues/GRACE\\_Geo](https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special_issues/GRACE_Geo). (дата обращения 28.09.2023).
17. Gravity Field, Temporal Variations from Space Techniques // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 621-626.
18. Gravity, Global Models // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 677-691.
19. Gravity Method, Satellite // Encyclopedia of solid earth geophysics. – Springer, 2021. – P. 645-656.

УДК 550.834

DOI:10.7242/echo.2023.4.9

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ШАХТНЫХ СЕЙСМОРАЗВЕДОЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СОЛЯНЫХ РУДНИКАХ

С.В. Иванов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Необходимость ведения шахтных сейсморазведочных исследований обусловлена их высокой разрешающей способностью, что в комплексе с геологоразведочными данными и результатами наземной сейсморазведки позволяет повысить информативность интерпретационных заключений о строении и состоянии горного массива над выработками.

**Ключевые слова:** шахтная сейсморазведка, отраженные волны, продольные волны, поперечные волны, горные выработки, калийные месторождения.

Для оценки возможностей шахтных сейсморазведочных исследований выполнен анализ результатов шахтных сейсморазведочных исследований в различных сейсмо-геологических условиях.

### Саскачеванское месторождение (Канада)

Месторождение представлено относительно однородными плоскострыми пластами. Однако аномальные геологические условия могут привести к серьезным проблемам, особенно в случае поступления в горные выработки пресных вод. Для прогноза аномальных геологических условий используются сейсмические, электрические и другие геофизические методы, как с поверхности, так и в подземных условиях.

Месторождение калия в Саскачеване обнаружено в формации Prairie Evaporite, в пласте девонских солей мощностью до 200 м. Пласт в основном состоит из галита с включениями ангидрита у подошвы пласта и калийной залежи, представленной сильвином у кровли пласта.

Крупномасштабная добыча калия ведется в Саскачеване с начала 1960-х годов. Глубина залегания промышленного пласта составляет около 1000 м. Обычно горные выработки имеют высоту 3 м, ширину 20 м и длину 500 м (рисунок 1) [1].

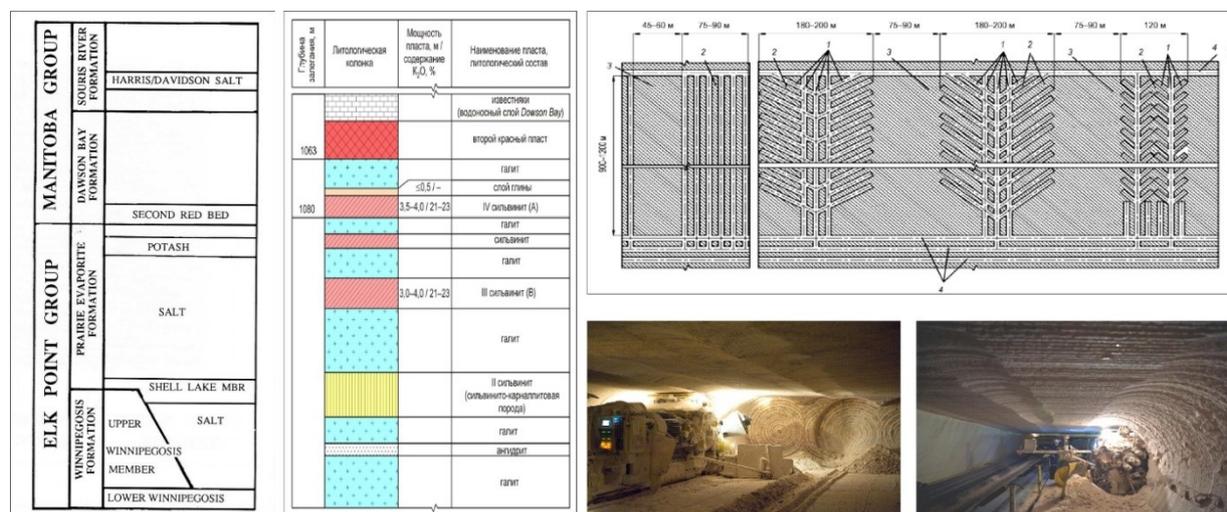


Рис. 1. Геологическая колонка и способ отработки Саскачеванского месторождения

Метод преломленных волн (МПВ) был первым геофизическим методом, который использовался в грных выработках калийных рудников Канады в начале 1960-х годов для измерения мощности соляного покрова над выработками рудника.

Метод отраженных волн (МОВ), также применяемый на калийном руднике, дает отличные результаты, но сбор данных требует больших усилий, особенно при изучении верхнего полупространства. Методики обработки сейсмических данных аналогичны методикам обработки наземных сейсмических данных, за исключением того, что частоты колебаний данных намного выше ( $\approx > 1000$  Гц). Для регистрации данных с верхнего полупространства геофоны прикручиваются болтами к кровле выработки через каждые 3 м, в качестве источника используется ручная кувалда. Применяется суммирование из 7 ударов кувалдой.

Для сравнения представлены результаты сейсмического профиля, собранные вдоль почвы выработки калийного рудника Саскачевана (Gendzwill and Brehm, 1993) [2] и сейсмические данные, полученные с поверхности ( $\approx 20$  Гц – 100 Гц) в пределах того же участка. Высокочастотные отражения ( $\approx 300$  Гц – 1000 Гц) показывают геологическую структуру с более высокой детализацией (рисунок 2).

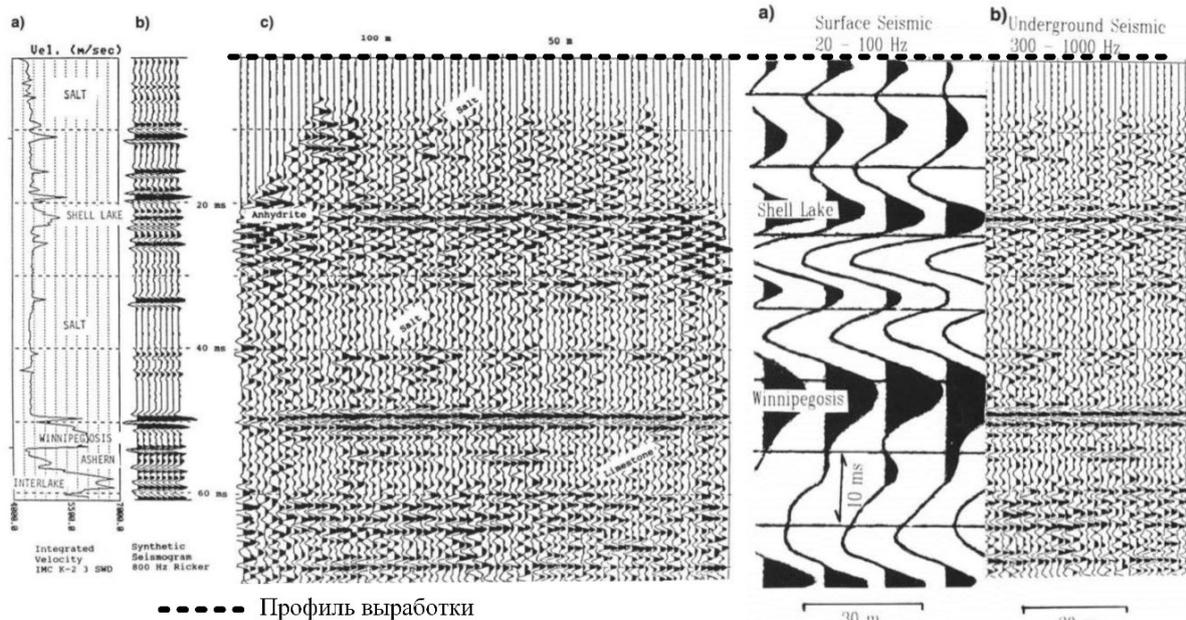


Рис. 2. Сравнение результатов наземных и подземных сейсморазведочных исследований

### К+S (Германия)

Значительная часть Германии, около 50% территории, подстилается пластами калийных солей. Они залегают преимущественно на глубинах, превышающих 2000 м.

На калийных рудниках Германии применяется камерная система разработки короткими столбами (рисунок 3) [1].

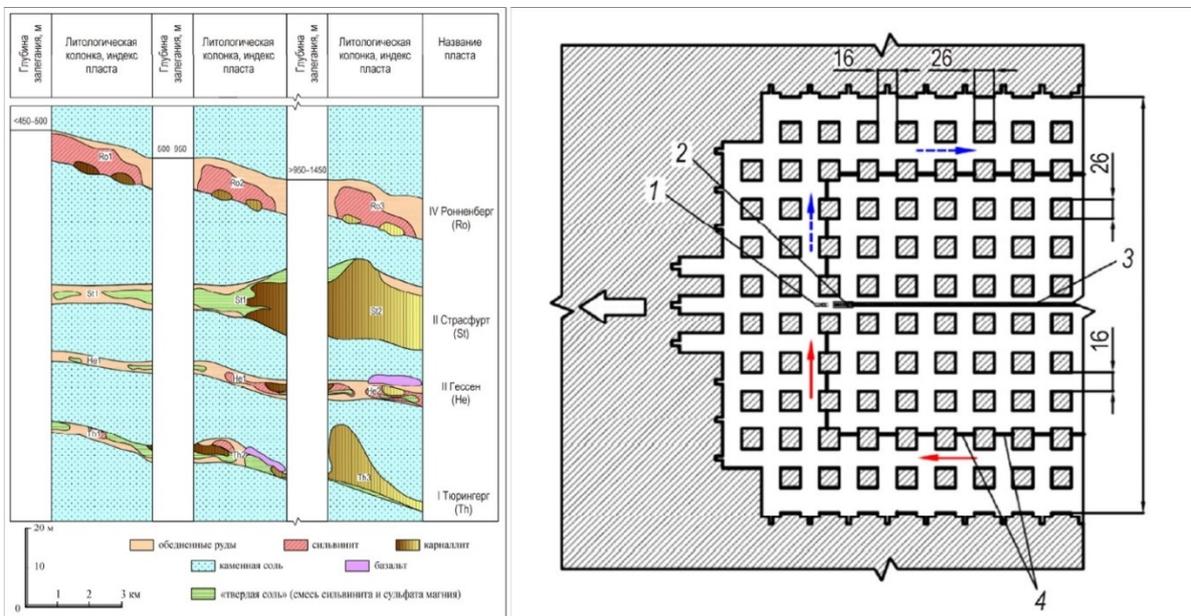


Рис. 3. Геологический разрез и способ отработки месторождений К+S

Шахтные сейсморазведочные исследования проводятся методом отраженных волн, диапазон частот: 10 Гц до 100 Гц, глубина исследований >100 м. По результатам обработки выполненных полевых исследований строятся сейсмогеологические разрезы, проводится геологическая интерпретация получаемых данных. Возможно обнаружение малогабаритных объектов на расстоянии до 80 м (рисунок 4).

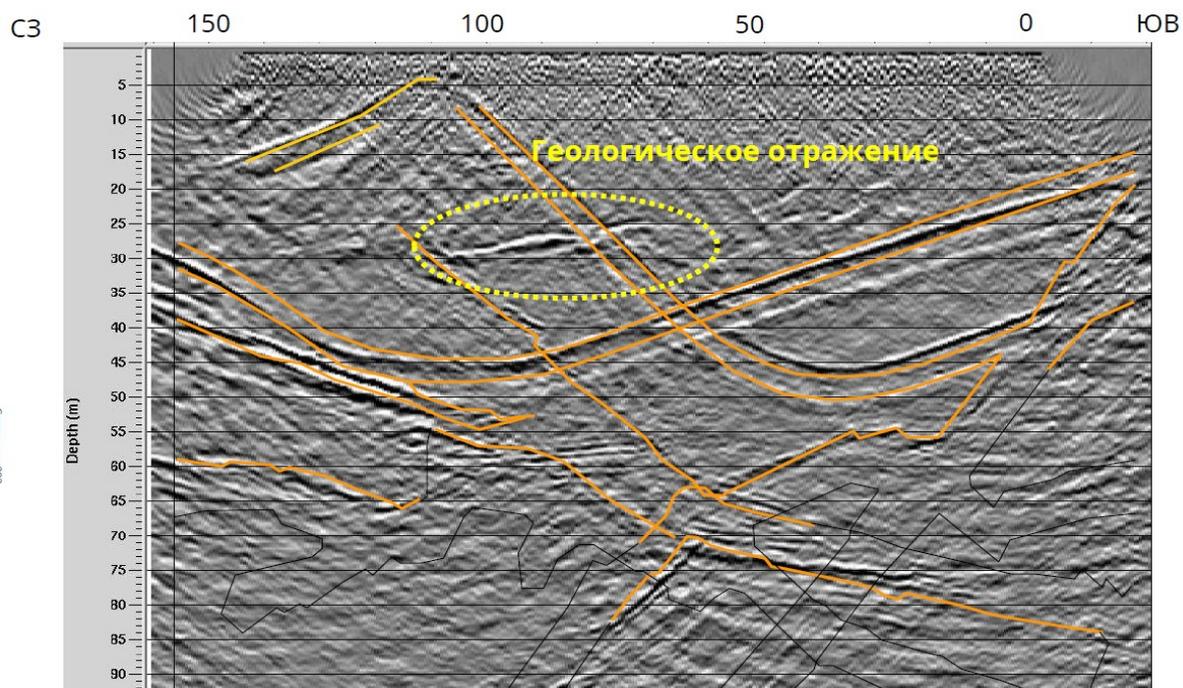


Рис. 4. Сейсмогеологический разрез с выделением малогабаритных объектов

**Верхнекамское месторождение (Россия)**

Продуктивные пласты Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) залегают на глубинах 300-350 м. В геологическом плане верхняя часть разреза представлена переслаиванием известняков, мергелей, глин. Водозащитная толща представлена переслаиванием пород каменной соли, карналлита, иногда сильвинита, в меньшей степени мергеля в верхней части [3]. Способ подготовки шахтного поля панельный или панельно-блоковый с широтным расположением панелей. Ширина блоков обычно составляет 400 м, а длина определяется расстоянием от главных выработок до границ шахтного поля (>1200 м). Порядок отработки панелей принят обратный (рисунок 5).

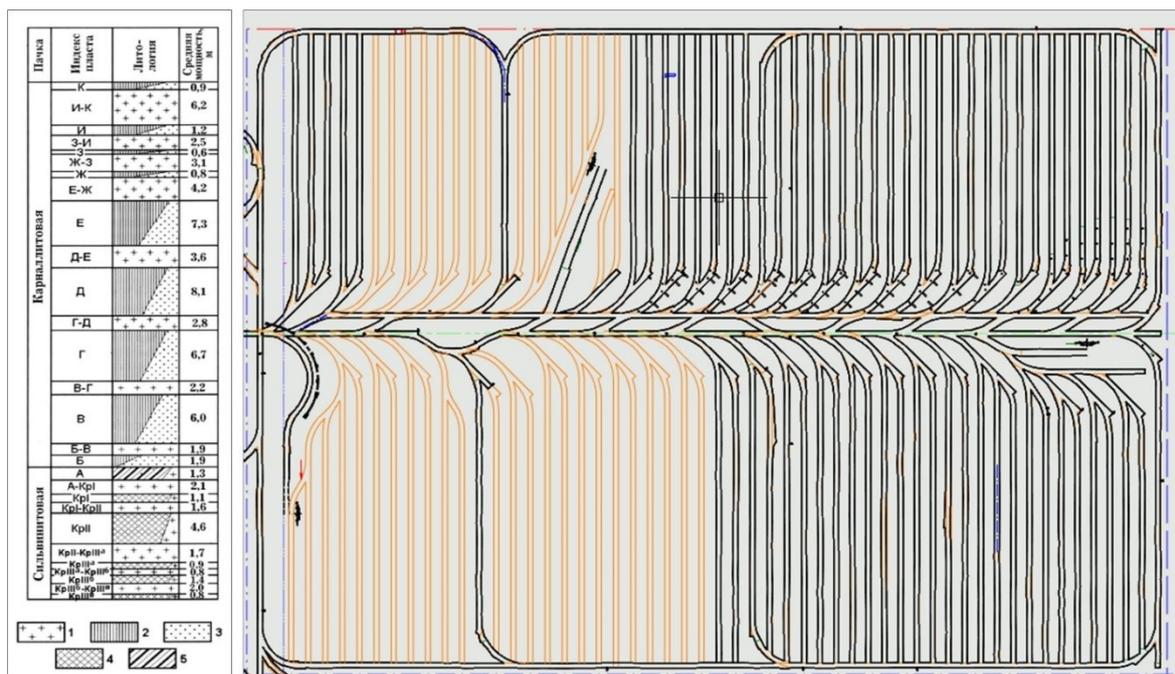


Рис. 5. Геологическая колонка и способ отработки ВКМКС



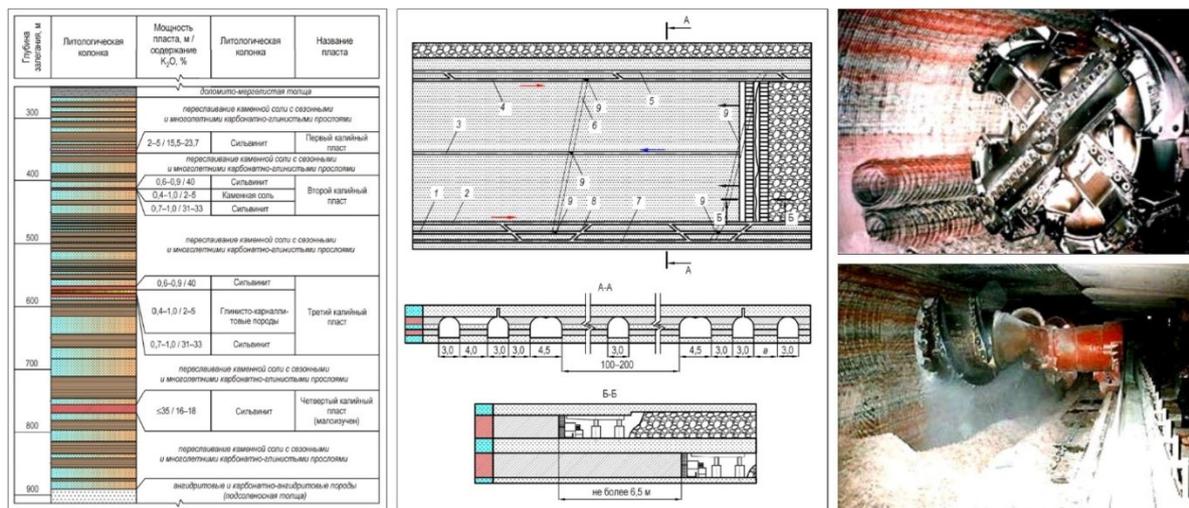


Рис. 7. Геологическая колонка и способ отработки Старобинского месторождения калийных солей

При разработке соляных рудников одним из условий безопасного ведения горных работ является достаточная мощность водозащитной толщи и ее способность препятствовать проникновению рассолов в горные выработки после отработки продуктивных горизонтов. Использование геофизических методов с целью контроля состояния массива закреплено в действующих «Правилах по защите от затопления».

Для регистрации упругих колебаний применяются сейсмоприемники, ориентированные по оси, являющейся перпендикуляром к поверхности стенки выработки.

Расстояние между пунктами приема выбирается из условий обеспечения четкой корреляции фаз регистрируемых волн между каналами. Так, при частоте колебаний 800-1000 Гц и скоростях распространения продольных колебаний 4000-4300 м/с шаг между пунктами приема не превышает 2 м.

На рисунке 8 показан отрезок профиля сейсмических исследований, где кровля соленосной толщи к забою вентиляционного штрека (начальным пикетам профиля) резко погружается с 75 до 45 м, амплитуда погружения составляет 30 м. Наличие перерывов корреляции в прослеживании отражающего горизонта, характеризуемого как граница контакта соленосной и глинисто-мергелистой толщ на крыле складки, позволяет утверждать о присутствии трещиноватых и выщелоченных пород в данной части геологического разреза [6].

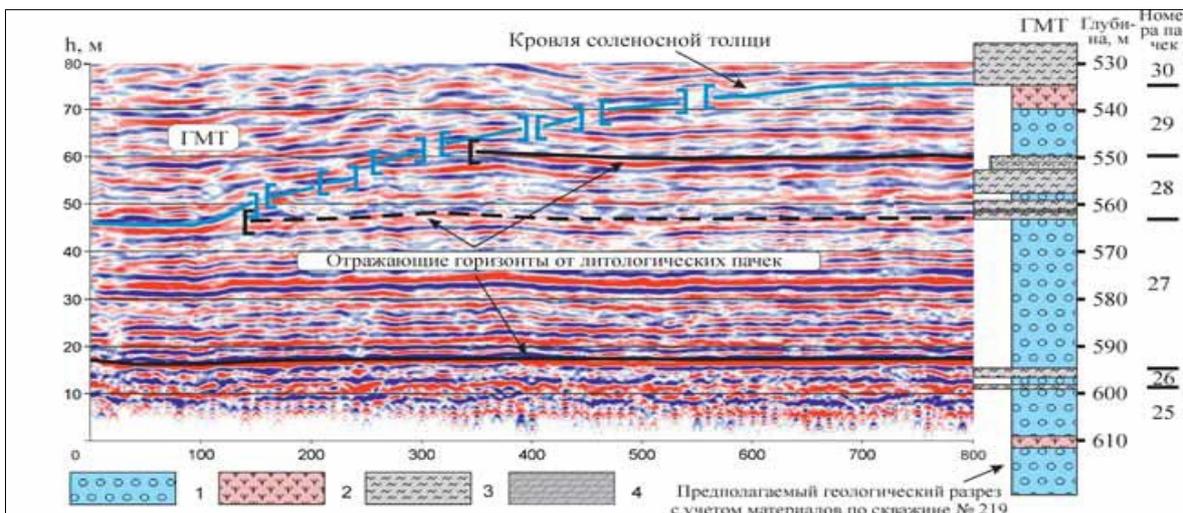


Рис. 8. Пример построения глубинного геологического разреза по данным сейсморазведки МОГТ для оценки залегания и состояния кровли соленосной толщи

### Гремячинское месторождение (Россия)

Продуктивный сильвинитовый пласт Гремячинского месторождения калийных солей залегает на глубинах от 900 до 1100 м. Верхняя часть разреза представлена осадочными породами (переслаивание глин, песчаников, аргиллитов...). ВЗТ представлена переслаиванием ангидритов, доломитов, каменной соли. Ниже продуктивного пласта залегают карналлитовые породы, мощностью от 3 до 15 м.

Из-за сложного геологического строения проходка подготовительных выработок осуществляется по направлениям, гипсометрия пласта в которых наиболее пологая (рисунок 9).

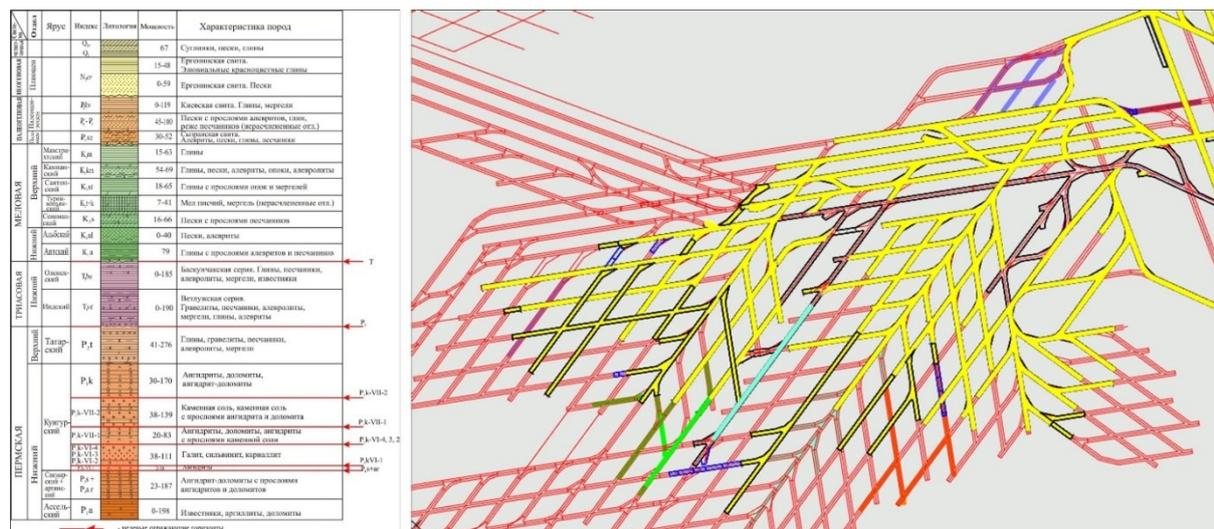


Рис. 9. Геологическая колонка и способ отработки Гремячинского месторождения калийных солей

На всем лицензионном участке проведены наземные 3D сейморазведочные исследования. Применялась технология отработки типа «крест» с шагом 100 м между линиями приёма (ЛП) и 100 м между линиями возбуждения (ЛВ). Интервал для ПВ – 25 м, для ПП – 25 м. Определены целевые отражающие горизонты. Построены сейсмогеологические разрезы.

В настоящее время ведутся шахтные сейморазведочные работы по выделению кровли верхнего слоя каменной соли (принятой как кровля ВЗТ) методом поперечных отраженных волн. Регистрация сейсмических волн осуществляется цифровой сейсмической станцией, имеющей 64 канала. В качестве приемников использовались горизонтальные сейсмоприемники. Высота расположения приемников в стенке составляет 1,4-1,5 м от подошвы выработки. Расстояние между пунктами приема и пунктами возбуждения – 2 м. Тип системы наблюдений – центральная [7].

По результатам работ строятся совмещенные результаты наземной 3D-сейморазведки (~60-80 Гц) с результатами шахтных сейморазведочных работ (~300-400 Гц) в пределах одного участка (рисунок 10).

Таким образом, в различных сейсмогеологических условиях соляных месторождений наиболее информативным геофизическим методом представляется шахтная сейморазведка по методике многократных перекрытий. При этом применяться могут различные типы упругих волн. Представляется возможным решение структурных и литолого-фациальных задач по обеспечению безопасности ведения горных работ.

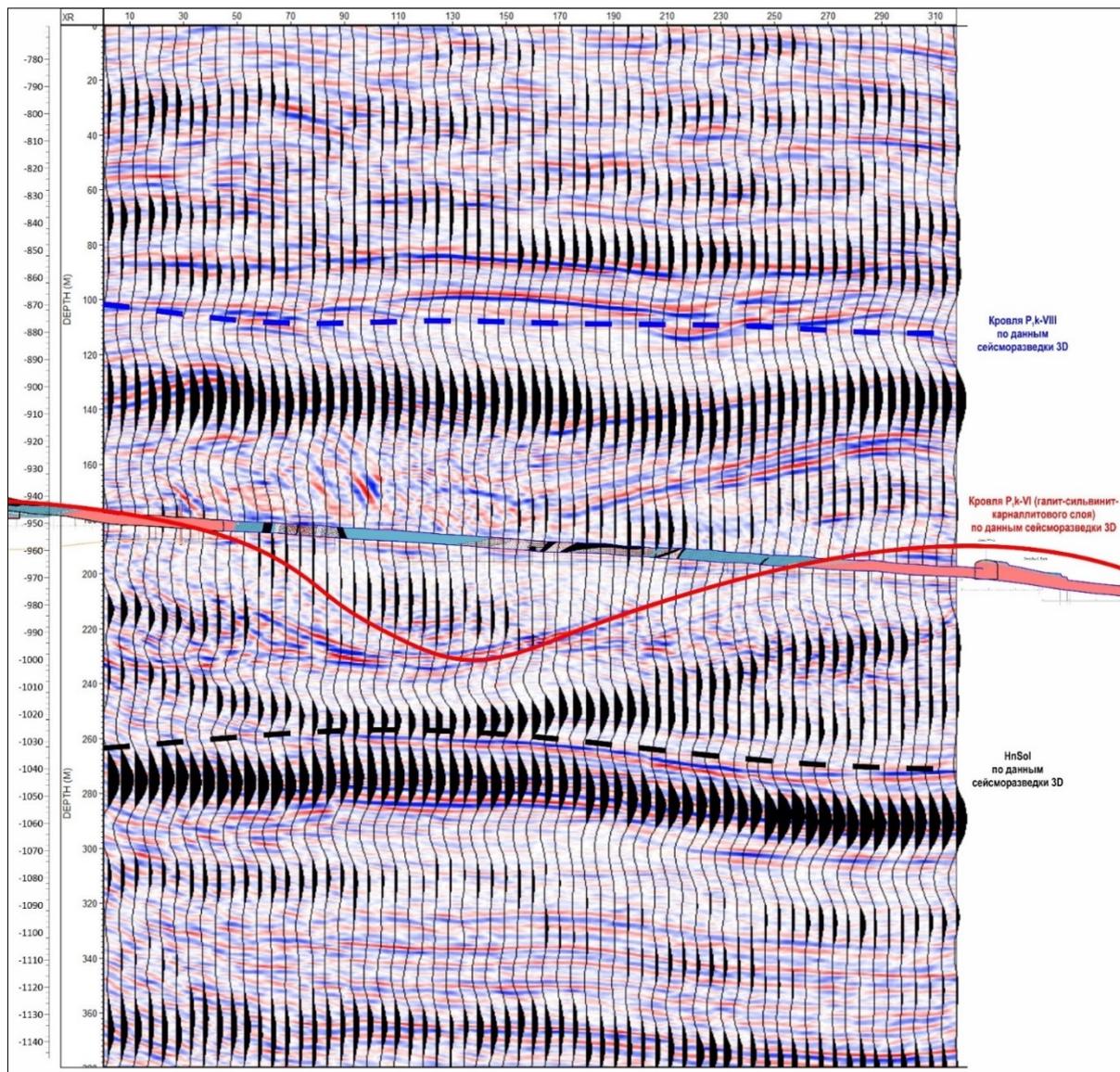


Рис. 10. Глубинный разрез вдоль горной выработки

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев В.А., Секунцов А.И. Разработка калийных месторождений: практикум. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 265 с.
2. Gendzwil D.J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine // *Geophysics*. – 1993. – V. 58, № 5. – P. 741-748. – DOI: 10.1190/1.1443459.
3. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2001. – 429 с.: ил.
4. Бабкин А.И. Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2010. – № 1. – С. 261-267.
5. Вагин В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. – 186 с.: ил.
6. Вагин В.Б., Ефимов А.М., Кулагов Е.В. Исследования и оценка состояния водозащитной толщи над калийными горизонтами геофизическими методами // *Горный журнал*. – 2014. – № 2. – С. 11-15.
7. Кулагов Е.В., Хвесеня С.С., Иванов С.В., Богдан С.И. Сейсморазведка методом отраженных волн в подземных выработках Гремячинского месторождения калийных солей // *Инженерная и рудная геофизика – 2023: сб. материалов 19-ой науч.-практ. конф. и выставки, 15-19 мая 2023 г.* – СПб., 2023. – С.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ПРИ ОБРАБОТКЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ

А.А. Симанов

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** В данной статье приведены результаты оценок точности современных глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) SRTM и FABDEM на примере гравиметрической съемки, выполненной в горной местности. Анализ точности высот, представленных ЦМР, выполнен на основе сравнения глобальных ЦМР SRTM и FABDEM с результатами полевой геодезической съемки. Был проведен сравнительный анализ гравиметрических поправок, учитывающих влияние рельефа местности, вычисленных на основе разных ЦМР. Из проведенного сравнительного анализа можно сделать вывод, что модель FABDEM лучше соответствует данным полевых наблюдений, чем модель SRTM. Поэтому в условиях расчлененного рельефа версия модели FABDEM предпочтительнее при расчете гравиметрических поправок за окружающий рельеф и многих других процедур обработки и анализа гравиметрической информации.

**Ключевые слова:** гравиразведка, расчлененный рельеф, цифровые модели рельефа, поправки за влияние рельефа местности.

В процедурах обработки высокоточных гравиметрических данных информация о рельефе имеет важное значение не только при расчете аномалий силы тяжести, но также в использовании цифровых моделей рельефа для расчета гравиметрических поправок, связанных с влиянием окружающего рельефа местности. Определение поправок за рельеф является необходимой процедурой при выполнении гравиметрических исследований, при этом исходными данными при расчете являются цифровые модели окружающего рельефа, а в условиях расчлененного рельефа местности необходимо тщательно подходить к выбору той или иной ЦМР [1,2].

Особое внимание следует уделить созданию цифровых моделей рельефа для центральной и ближней зон, так как их влияние на гравиметрические поправки является наиболее значительным. Влияние дальних зон существенно слабее. В горной местности градиент поправок за центральную зону может достигать 0,5 мГал/100 м, поэтому точность расчета поправок за эту зону имеет главное значение [3].

Для решения прикладных задач обработки гравиметрических данных нами используются глобальные ЦМР.

- SRTM – это глобальная ЦМР (цифровая модель рельефа), полученная при помощи радарной топографической съемки Shuttle Radar Topographic Mission. Она имеет два уровня разрешения: 1" (~ 30 м) и 3" (~ 90 м). ЦМР SRTM охватывает территорию между 60 градусами северной и 56 градусами южной широты. Съемка была проведена в период с 11 по 22 февраля 2000 года при помощи сенсоров SIR-C и X-SAR, использующих технологию радиолокационного синтезирования аппаратуры. [4].

- FABDEM – в 2020 году была представлена ЦМР Copernicus DEM, GLO-30, которая представляет собой глобальную цифровую модель рельефа с шагом сетки 1 угловая секунда (~ 30 м). Исследователи из Бристольского университета и Fathom после публичного выпуска Copernicus GLO-30 DEM применили методы машинного обучения для удаления зданий и лесов из цифровой модели рельефа Copernicus. В результате была создана глобальная карта высот FABDEM (FAB означает «Леса и здания удалены»), которая представляет собой версию Copernicus DEM, где на карте отображается только местность без зданий и лесов. [5].

Цифровые модели SRTM и FABDEM предоставляются с использованием географических координат, основанных на геодезическом эллипсоиде WGS84. При обработке гравиметрических данных основной характеристикой этих моделей является точность определения абсолютной высоты. Для оценки точности данных ЦМР выполнен сравнительный анализ высот, представленных на самих ЦМР, с инструментальными высотами, выполненными непосредственно в поле.

Гравиметрическая съемка выполнена в горной местности с множеством саев и промоин, с резкими перепадами высот около 500 м. Полевые работы выполнены на 840 пунктах высокоточными компьютеризированными гравиметрами AUTOGRAV CG-6. При проведении геодезической съемки использовались GPS-приемники «Trimble R8». Точность определения высот пунктов геофизических наблюдений составляет  $\pm 0.05$  м. Среднеквадратическая ошибка определения аномалий силы тяжести составила  $\pm 0.029$  мГал.

Результаты сравнения высот, представленных на различных ЦМР сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Расхождения в значениях высот, представленных на различных ЦМР

N п/п	Исходная ЦМР	Статистические характеристики высот, м		
		max	min	СКО
1	FABDEM	12.12	-17.17	$\pm 2.71$
2	SRTM 30	18.61	-21.63	$\pm 4.45$
2	SRTM 90	30.91	-30.49	$\pm 7.70$

Анализ высот на всей исследуемой территории показывает, что модель рельефа FABDEM имеет гораздо меньшие ошибки в значениях высот по сравнению с цифровой моделью SRTM (табл. 1). Построены гистограммы ошибок высот, представленных на различных ЦМР. Характер отклонений высот близок к нормальному распределению (рис. 1).

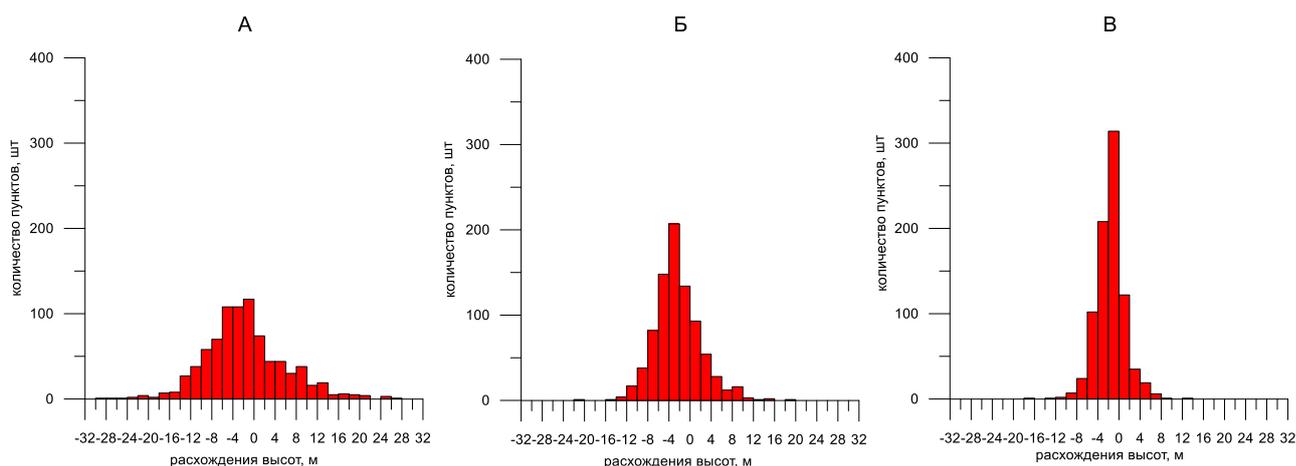


Рис. 1. Гистограммы расхождений высот, представленных на различных ЦМР (А- SRTM90, Б- SRTM30, В- FABDEM)

Ясно, что точность вычисления поправок за влияние рельефа местности напрямую зависит от ошибок значений высот в исходной ЦМР. Для оценки этой точности в радиусе до 5 км (ближняя зона) был проведен ряд экспериментов, в которых использова-

лись различные ЦМР. В качестве исходных данных были взяты значения гравиметрических поправок, рассчитанных на основе ЦМР FABDEM.

Полученные величины топографических поправок за окружающий рельеф местности в ближней зоне изменяются в интервале от 0.331 до 2.382 мГал. Характеристики расхождений этих поправок показаны в таблице 2.

Таблица 2

Погрешности поправок за рельеф, полученных на основе различных ЦМР

N п/п	Исходная ЦМР	Расхождения топопоправок, мГал		
		max	min	СКО
1	SRTM 30	0.435	-0.188	±0.095
2	SRTM 90	0.886	-0.346	±0.162

С использованием полученных данных были построены карты аномалий силы тяжести с топографическими поправками, вычисленными по различным ЦМР (рис. 2). Из сравнения карт видно, что аномалии силы тяжести, вычисленные с использованием ЦМР FABDEM, более гладкие, четко оконтуриваются локальные аномалии, исчезли мелкие аномалии (рис. 2Б). Это связано скорее всего с погрешностями высот, представленных на той или иной ЦМР.

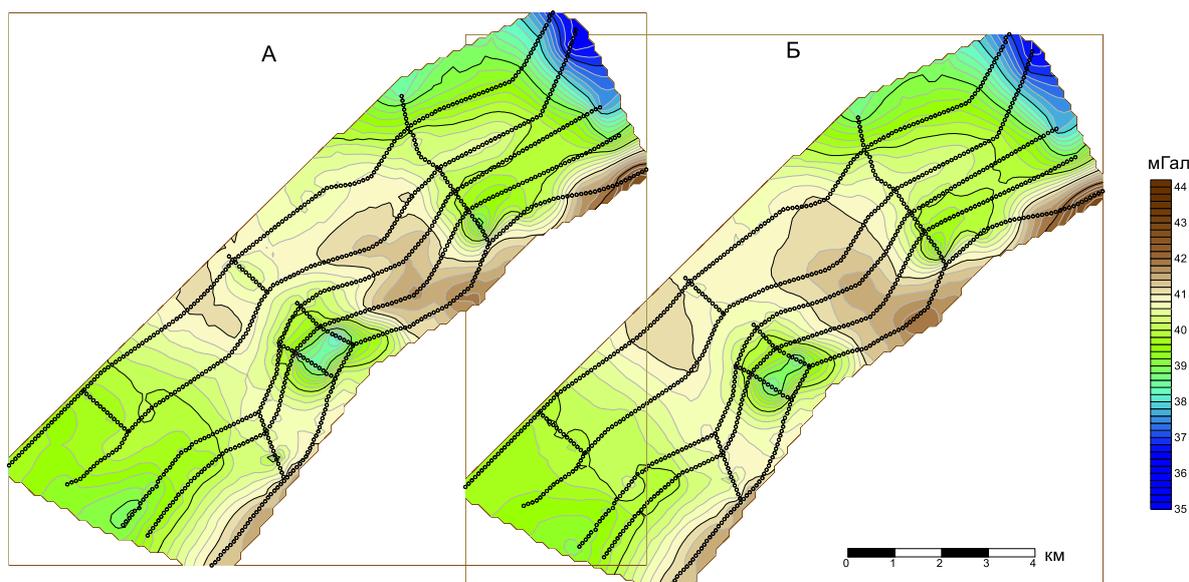


Рис. 2. Карты гравитационного поля с поправками за рельеф на основе различных ЦМР (А-SRTM30, Б-FABDEM)

Использование улучшенной информации об окружающем рельефе ЦМР FABDEM повышает точность определения топографических поправок за рельеф местности и многих других процедур обработки и анализа гравиметрической информации. При обработке гравиметрических данных в условиях расчлененного рельефа местности необходимо тщательно подходить к выбору цифровых радарных высотных данных, выполнять верификацию имеющихся ЦМР, сравнивая их с высотами гравиметрических пунктов.

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

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гордин В.М. Способы учета влияния рельефа при высокоточных гравиметрических измерениях: обзор. – М.: ВИЭМС, 1974. – 89 с. – (Сер. IX. Региональная, разведочная и промысловая геофизика: ВИЭМС. ОЦНТИ).
2. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемки в горной местности. – Абакан: Таймыркомприродресурсы, 2002. – 187 с.: ил.
3. Симанов А.А. Повышение достоверности учета рельефа местности при высокоточных гравиметрических исследованиях // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 9. / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2011. – С. 144-146.
4. Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E., Hole-filled seamless SRTM data V 3. – 2006 / International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). – Текст электронный. – URL: <http://srtm.csi.cgiar.org>. (Дата обращения 23.09.2023).
5. Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C., Neal J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. –2022. – V. 17, № 2. – 024016. – DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4ff.

УДК 550.837

DOI:10.7242/echo.2023.4.11

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ  
ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЕСТЕСТВЕННОГО ПОЛЯ  
НА КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ РУДНИКАХ**Ю.И. Степанов<sup>1</sup>, И.Л. Кузнецов<sup>2</sup>, Е.С. Зубрикова<sup>1</sup>, А.А. Тайницкий<sup>1</sup><sup>1</sup>Горный институт УрО РАН, г. Пермь<sup>2</sup>ПАО «Уралкалий»

**Аннотация:** Метод естественного электрического поля является одним из первых (Р.В. Фокс 1830), и стал отправной точкой развития многочисленных методов электроразведки. Он применяется для решения различных задач как в наземном, так и в скважинном и шахтном вариантах. Этому методу посвящено много фундаментальных и прикладных исследований. В то же время изучению возникновения естественного поля в подземных выработках соляных месторождений и его практическому применению посвящено малое количество исследований.

**Ключевые слова:** электроразведка, метод естественного электрического поля, рудники, калийно-магниевого месторождения, надсоленая и соляная толщи, диффузия, фильтрация.

**Введение**

Метод естественных электрических полей (ЕП) – один из старейших геофизических методов (Фокс, 1830). По генетическому признаку различают электрохимические, электрокинематические и диффузионные естественные поля. Необходимым условием возникновения естественного поля является наличие контакта твердой и жидкой фазы горных пород [1-2]. Как правило, ЕП узлокализировано в пространстве, его интенсивность изменяется от первых до сотен милливольт. Долгое время метод ЕП применялся в наземном варианте для поисков и оконтуривания рудных месторождений. С течением времени естественные электрические поля, обусловленные не природными электронными проводниками (фильтрационные, диффузионные, ранее рассматриваемые как помехи), стали предметом специальных исследований и начали использоваться для решения практических задач при изучении слабопроводящих объектов, для решения гидрогеологических и инженерно-геологических и других задач (Семенов А.С., 1980, Огильви, Титов В.К., 2003). Впервые попытки изучения рудных естественных полей в подземных горных выработках предприняты в 19 веке (Фокс R.W.). Начиная с 50-х годов

20 века выполнен ряд исследований Череменинским Г.А., Рыссом Ю.С., Свешниковым Г.Б. для изучения возможности использования наблюдений ЕП в подземных выработках, в основном связанных с разработкой железорудных и угольных месторождений. В то же время изучению возникновения естественного поля в подземных выработках соляных месторождений и его практическому применению посвящено малое количество исследований.

В работе представлены некоторые практические результаты проведения метода ЕП в подземных выработках калийно-магниевых месторождений ПАО «Уралкалий» и ООО «Еврохим-Волгакалий». Шахтные электроразведочные работы на рудниках Верхнекамского месторождения начали выполнять с 1986 г. после аварийного обрушения на одном из рудников. Однако до настоящего времени осталось много невыясненных моментов, касающихся природы происхождения поля ЕП, влияния техногенных факторов, приуроченности аномалий к геологическим структурам и т.д.

В частности, по мнению авторов [6], природа возникновения естественного электрического поля обусловлена диффузионными процессами, которые возникают в областях контакта вод различной минерализации в надсолевой толще. Электродиффузионный потенциал возникает вследствие разности чисел переноса катионов и анионов в пористой среде, что определяется различием их подвижности и средней концентрации. При наличии градиента концентрации ионов диффузия происходит с разной скоростью, что приводит к нарушению равновесия и возникновению электрического поля.

Геологическое истолкование возникновения естественного поля как в надсолевой, так и соляной толщах приведено в работе [7], в которой указано, что при установлении специфики и взаимосвязи тектонических и эпигенетических процессов, проявившихся в надсолевой и соляной толщах Верхнекамского месторождения, отмечается, что проскальзывание надсолевой толщи над соляными поднятиями вызывает ее перегиб и формирование трещин отрыва, благоприятных для нисходящей инфильтрации атмосферных вод. Последние растворяют рассеянный в породе ангидрит, что увеличивает агрессивность подземных вод и вызывает активное выщелачивание карбонатного материала с образованием субвертикальных зон. В этих зонах в соляных отложениях наряду с типичными для соляной залежи минералами и формами их проявления зафиксированы специфические минерализованные зоны, которые обогащены пирротином и сфалеритом. Приуроченность сульфидной минерализации к границе двух пластов с различным характером складчатости позволяет предполагать разгрузку растворов в образовавшуюся между ними зону отслоения.

На шахтных полях Верхнекамского месторождения при измерении методом естественного поля применяют методику измерения градиентов со 100% повторением с шагом по профилю 10 или 30 м. В качестве неполяризующихся электродов используются электроды Рb-РbCl<sub>2</sub>, которые позволяют проводить измерения естественного поля и ВП практически без влияния потенциала самих электродов.

Известно, что на результаты наблюдений методом ЕП существенное влияние оказывают техногенные помехи: блуждающие токи, металлические конструкции, электрические установки, генерирующие электрическое поле (комбайн, конвейер, вентилятор, заземляющий контур, СУБР, и др.), лужи и другие помехи. Приведем пример влияния подобных помех на результаты измерений методом ЕП по одному из штреков [3]. В штреке находятся токопроводящие предметы: работающий буровой станок на пикете 2040, подстанция ПК 2350, вентилятор и вагон на ПК 2480, заземляющий контур на ПК 2000-2100, которые создают техногенные помехи и оказывают влияние на результаты измерений.

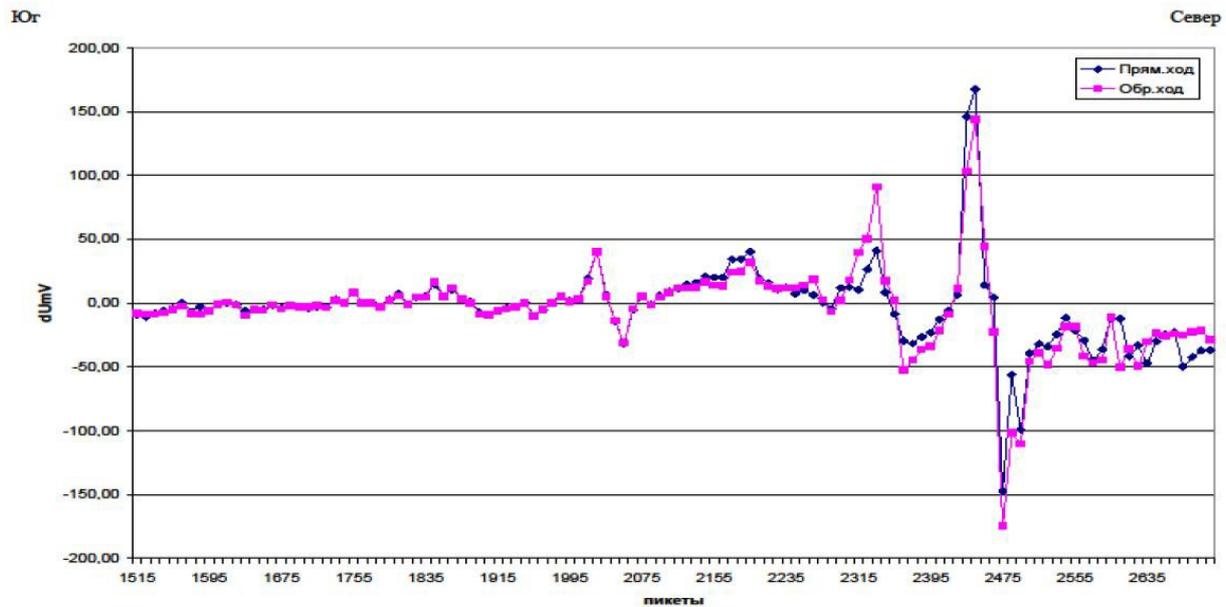


Рис. 1. Графики градиентов потенциалов естественного поля

Таким образом, при спокойном естественном поле (отсутствии блуждающих токов) аномалии естественного поля связаны только с техногенными помехами.

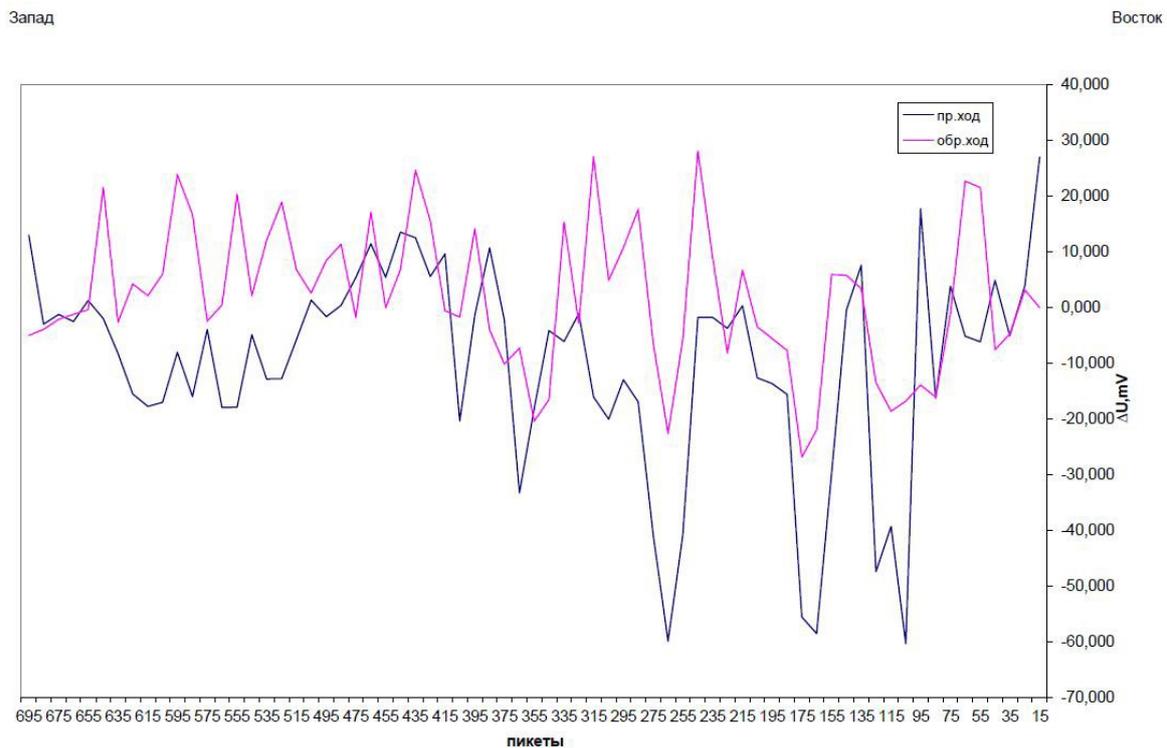
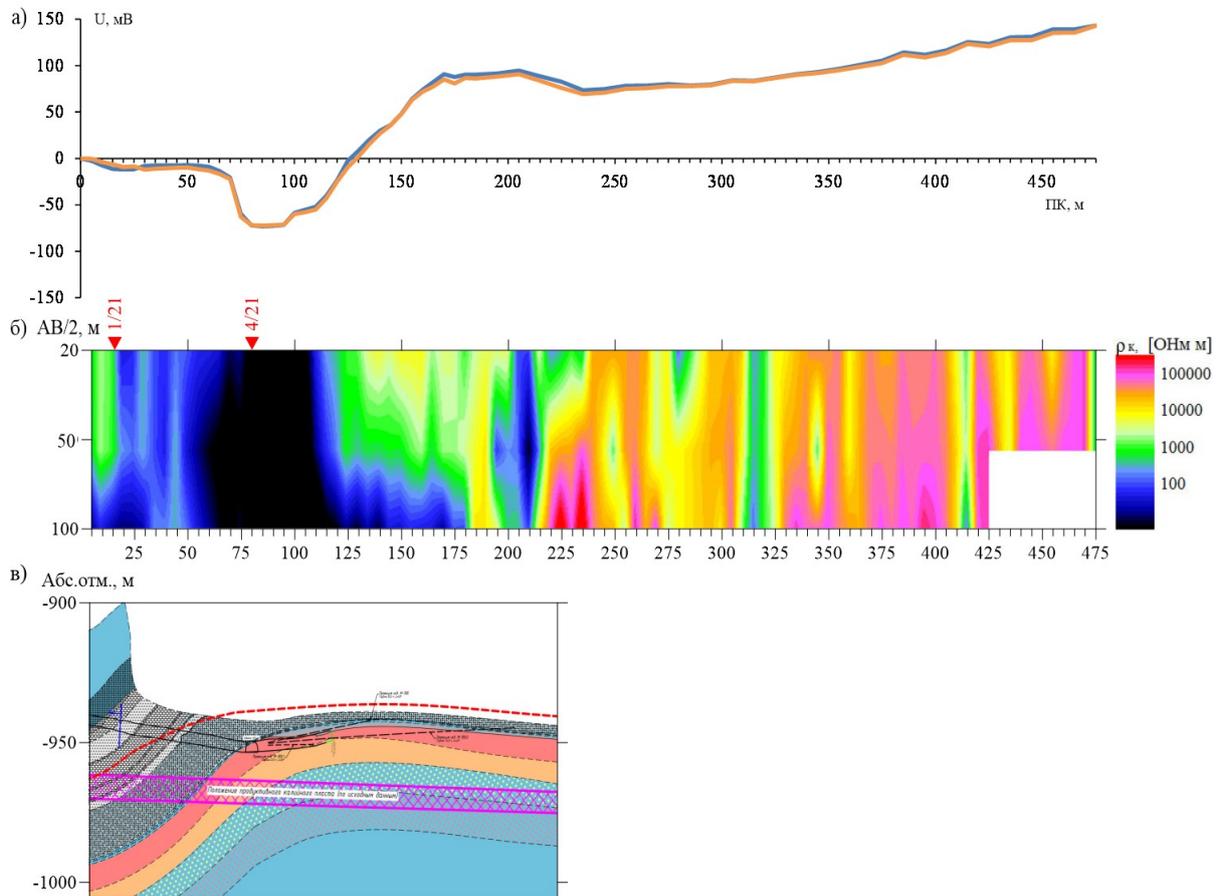


Рис. 2. Графики градиентов потенциалов естественного поля при наличии блуждающих токов

При наличии блуждающих токов, как это следует из рис. 2, результаты измерений в прямом и обратном ходе измерений сильно отличаются, градиент потенциала изменяется от  $-60$  до  $+30$  мВ. Такие измерения истолкованию не подлежат. При наличии этих помех оценивают интенсивность, область распределения этих полей, а также местоположение и режим работы источников. С учетом проявления помех определяются время и порядок проведения подземных наблюдений.

Приведем пример электроразведочных работ на одном из шахтных полей ООО «Еврохим-Волгакалий». В горной выработке протяженностью 475 м проведены работы методом естественного поля и трехразностного электрического профилирования. Профиль пересекает участки увлажнения кровли выработки (капель) 1/21 и 4/21 (рис. 3).



**Рис. 3.** Результаты метода ЕП а); трехразностного профилирования б); геологический разрез в выработке в)

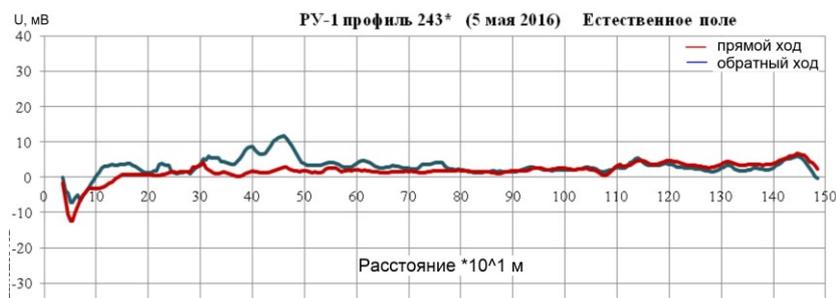
По данным метода ЕП (рис. 3а) значения потенциала естественного электрического поля изменяются в диапазоне от  $-72$  до  $+145$  мВ. В районе увлажнения 1/21 отмечается область отрицательных значений до  $-11$  мВ. В районе увлажнения 4/24 (пикеты 60-120) прослеживается сильная отрицательная аномалия до  $-72$  мВ, в этом интервале по данным трехразностного профилирования наблюдается зона пониженных сопротивлений (рис. 3б). На остальной части профиля прослеживается плавный рост потенциала в северном направлении без ярко выраженных неоднородных участков. Аномалии, обусловленные фильтрационными полями, обычно составляют порядок до 30 мВ. В данном случае, вероятнее всего, кроме фильтрационного потенциала формирование сопряженных аномалий связано с эпигенетическими процессами, проявившимися в надсолевой и соляной толщах. На рис. 3в представлен геологический разрез исследуемого участка, из которого видно, что аномальная область приурочена к породам сульфатно-карбонатного состава с включениями галита на северном крыле синклинальной структуры. Таким образом, в области резкого перегиба пород возможно наличие субвертикальной зоны трещиноватых пород, по которым происходит фильтрация вод. В этих зонах в соляных отложениях наряду с типичными для соляной залежи минералами и формами их проявления могут формироваться специфические минерализованные зоны, которые обогащены пирротином и сфалеритом. В естественном поле эти зоны будут характеризоваться пони-

женными значениями потенциалов [3]. Результаты метода естественного поля на других участках данного шахтного поля указывает, что участкам увлажнения штреков соответствуют области отрицательных значений естественного поля. Эти практические материалы косвенно говорят о возможной причине возникновения естественного поля вследствие электрокинетических явлений (фильтрационных полей). Отрицательные значения потенциала на первый взгляд можно связать с переувлажнением (лужи рассола) подошвы выработки, но приведенные ниже практические исследования позволяют усомниться в этом.

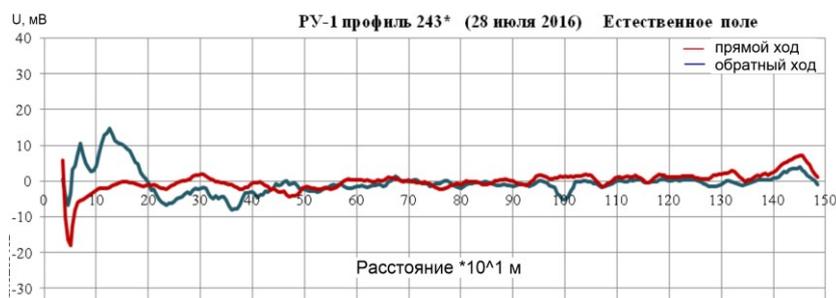
Приведем ежеквартальные мониторинговые измерения методом ЕП на одном из штреков шахтного поля ООО «Уралкалий» (профиль 243). На этом штреке протяженностью 1500 м проведены измерения поля ЕП градиентной установкой с шагом 10 м. На рис. 4 представлены результаты изменения потенциалов по подошве выработки.



Примечание: \* – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 0-30 – силовой кабель, заземляющий контур, щитки; ПК 10-15– сейсмометр, щитки; ПК 30-35 – будка, холодильная установка, лебедка; ПК 200-210, ПК 485-490, ПК 1155-1160, ПК 1270-1275, ПК 1320 – лужи рассола.



Примечание: \* – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 0-40 - силовой кабель, заземляющий контур, щитки, металлические бочки; ПК 10- 15- щитки, сейсмометр; ПК 20- 35- будка, холодильная установка, лебедка; ПК 60 - металлические ворота; ПК 65-70 - металлические конструкции; ПК 200-210 - лужи рассола, частично засыпаны; ПК 485-490, ПК 1155-1160, ПК 1270-1275, ПК 1320 – лужи рассола



Примечание: \* – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 0-32 – силовой кабель, заземляющий контур, щитки установка для проведения исследований по заморозке, холодильная установка; ПК 90 – сеймопавильон; ПК 355 – металлолом; ПК 195-210, ПК 410, ПК 490, ПК 885, ПК 1155, ПК 1150-1160, ПК 1270-1275, – лужи рассола.



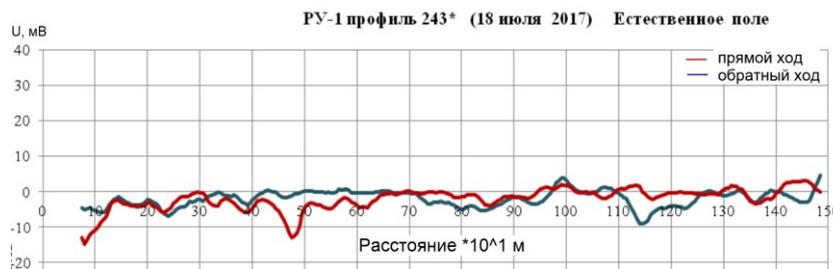
Примечание: \* – во время проведения геофизических работ на выработке – в интервале ПК 60-70 – работает холодильная установка; ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 355, ПК 450 – металлолом; ПК 195-210, ПК 410, ПК 490, ПК 885, ПК 1150-1160, ПК 1270-1275, ПК 1320 – лужи рассола.



Примечание: \* – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 195-210, ПК 485-490, ПК 1015, ПК 1155-1160, ПК 1270-1275, ПК 1315-1320 – лужи рассола.



Примечание: \* – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 195-210, ПК 485-495, ПК 1155-1160, ПК 1265-1280 – лужи рассола; ПК 350-355, ПК 360-375, ПК 450 – металлолом.



Примечание: \* – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 195-210, ПК 1155, ПК 1270-1275, ПК 1320-1325 – лужи рассола.



Примечание: \* – во время проведения геофизических работ на выработке в интервале ПК 90 – сейсмопавильон; ПК 200-210, ПК 490-495, ПК 880-885, ПК 1020, ПК 1155-1160, ПК 1270-1280, ПК 1320-1325, ПК 1470 – лужи рассола; ПК 450 – м/трос; ПК 1005-1015 – м/конструкция.

**Рис. 4.** Результаты мониторинговых наблюдений методом ЕП по профилю 243

Как видно из графиков изменения потенциалов, поле ЕП спокойное, изменения в пределах от  $-5$  до  $+5$  мВ, при этом расхождения значений потенциалов в прямом и обратном ходе в большинстве случаев не превышают ошибки измерений. Что важно, в местах скопления рассолов на подошве штрека не наблюдается аномальных зон пониженных потенциалов, как это зафиксировано на рис. 3, где в зоне просачивания влаги с кровли выработки и скопления рассолов на подошве наблюдаются отрицательные зоны потенциалов естественного поля. Из этого факта практических исследований следует предположить, что в этом случае поле ЕП связано с фильтрационными процессами или обусловлено как диффузионными, так и фильтрационными явлениями в горных породах. Этот вопрос остается открытым и требует дальнейших исследований – как практических, так и путем численного моделирования. На некоторых графиках изменения потенциалов (рис. 4), например, за октябрь 2016 г. и октябрь 2017 г. потенциал изменяется в широких пределах от  $-60$  мВ до  $+50$  мВ, наблюдаются значительные расхождения потенциалов при повторных измерениях. Такие расхождения обусловлены техногенными помехами (включением или отключением электрических установок и блуждающими токами).

### Выводы

При исследованиях методом ЕП на рудных полях калийно-марганцевых месторождений следует применять методику наблюдений со 100% повторением, которая позволяет определить влияние техногенных помех в виде блуждающих токов, работающих электрических установок и др. в районе проведения работ.

Считаем, что публикаций по данному методу недостаточно, чтобы сделать вывод о причинах возникновения естественного поля, следует продолжить как практические, так и теоретические исследования, которые по мере накопленных материалов позволяют осмысленно истолковать результаты метода ЕП.

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

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвеев Б.К. Электроразведка. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 368 с.: ил.
2. Семенов А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля. – Л. Недра, 1980. – 446 с.: ил.

3. 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.
4. Титов В.К. Электрокинетические явления в горных породах и их применение в геоэлектрике: дис. ... к.г.-м.н.; 25.00.10 / Титов Константин Владиславович. – СПб., 2003 – 198 с.: ил.
5. Михайленко А.А., Коносавский П.К., Титов К.В. Методические вопросы моделирования естественного электрического поля, вызванного откачкой воды из скважины // Математические модели техники, технологий и экономики: материалы Всерос. науч.-практ. студенч. конф., 14-15 мая 2019 г. – СПб., 2019. – С. 34-37.
6. Арсеньева А.А., Титов К.В., Коносавский П.К., Жуков А.А. Изучение природы естественного электрического поля, возникающего в подземной горной выработке в руднике на месторождении калийно-магниевых солей // Актуальные проблемы недропользования: тез. докл. XVIII Междунар. форум-конкурса студентов и молодых ученых. – СПб., 2022. – С. 208-210.
7. Чайковский И.И., Калинина Т.А., Коротченко О.В. Тектонические и эпигенетические процессы в надсолевой толще Верхнекамского месторождения // Литосфера. – 2015. – № 5. – С. 71-80.
8. Шевнин В.А., Бобачев А.А., Иванова С.В. Результаты применения методов естественного поля и электротомографии для изучения Александровского городища (Калужская область) // Записки Горного института. – 2015. – Т. 211. – С. 35-42.

УДК 550.831

DOI:10.7242/echo.2023.4.12

## ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ РЕЗКО РАСЧЛЕНЕННОГО РЕЛЬЕФА

В.В. Хохлова

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация.** При проведении гравиметрических работ на расчлененном рельефе сложность представляет не только выполнение съемки в горной местности, но и последующая первичная обработка гравиметрических данных. Тщательный подбор плотности промежуточного слоя, вычисление влияния топографических масс, слагающих рельеф, а также учет сферичности – всё это необходимые этапы обработки.

**Ключевые слова:** гравиразведка, расчлененный рельеф, сферичность, поправка за рельеф.

Согласно «Инструкции по гравиразведке» при обработке гравиметрических данных поправки Буге и за влияние рельефа вводятся в предположении, что промежуточный слой является плоской однородной горизонтальной пластиной. Возникающие при этом погрешности, обусловленные неучетом сферичности Земли, рассмотрены в работах [2, 6]. Рассмотрим учет сферичности Земли на примере гравиметрической съемки, выполненной в условиях среднегорного резко расчлененного рельефа.

При планировании гравиметрических работ в горной местности следует опираться на ландшафт. Допускается отклонение от прямолинейности профилей в случаях, когда необходимо избежать неблагоприятных участков для проведения измерений; либо выполнить наблюдения вдоль дорог, троп или горных ущелий. Для минимизации поправок за влияние рельефа при дальнейшей камеральной обработке следует выбирать местоположение точки наблюдения на относительно ровном участке. Желательно, чтобы в радиусе 1 метра не было неровностей рельефа более чем на 10 см. выше или ниже пункта наблюдения. Измерений на краю скал или крутых берегов рекомендуется избегать.

В 2022 году была выполнена наземная пешеходная гравиметрическая съемка по неравномерной сети профилей с шагом по профилю 100 м. Фактически выполненный объем работ составил 84,3 пог. км. В качестве аппаратуры были применены автоматизированные гравиметры CG-6 Autograv фирмы Scintrex (Канада), GPS-приемники Trimble-R8. Гравиметрические наблюдения были проведены в относительном уровне. Для оценки качества съемки выполнены контрольные наблюдения ~70% от общего числа рядовых пунктов. Среднеквадратическая погрешность определения аномалии силы тяжести составила  $\pm 0.029$  мГал. Относительные высоты достигают 500 м (рис. 1).

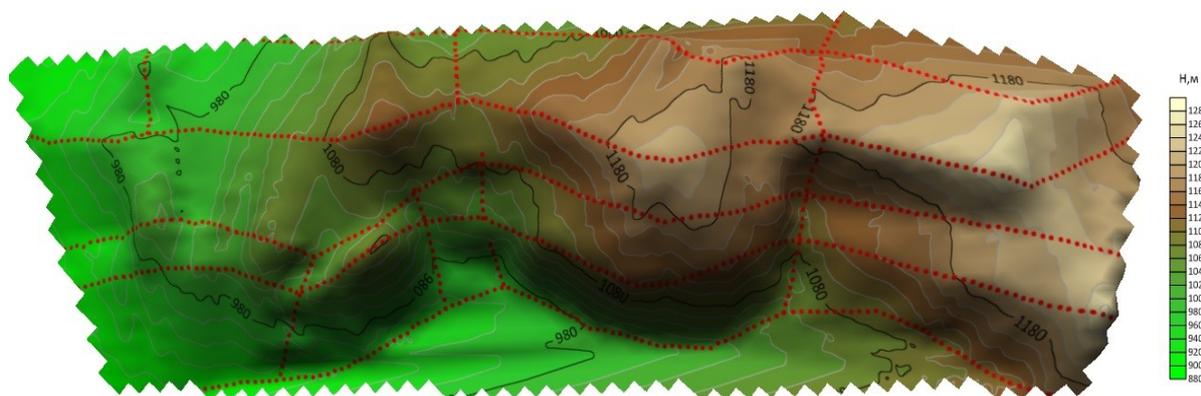


Рис. 1. Рельеф местности по данным геодезических наблюдений

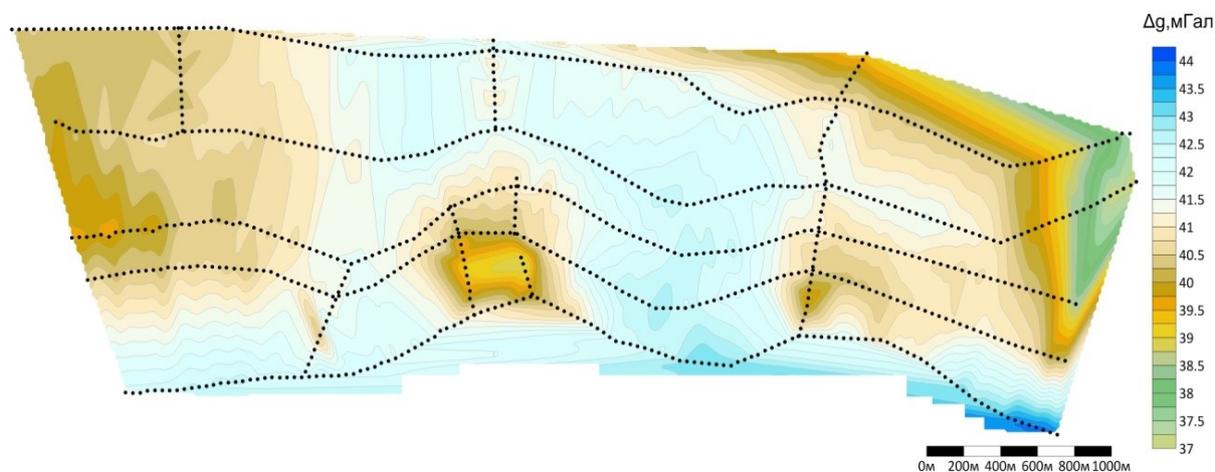


Рис. 2. Аномалия силы тяжести в редукции Буге с поправкой за влияние рельефа (плотность  $2.4 \text{ г/см}^3$ )

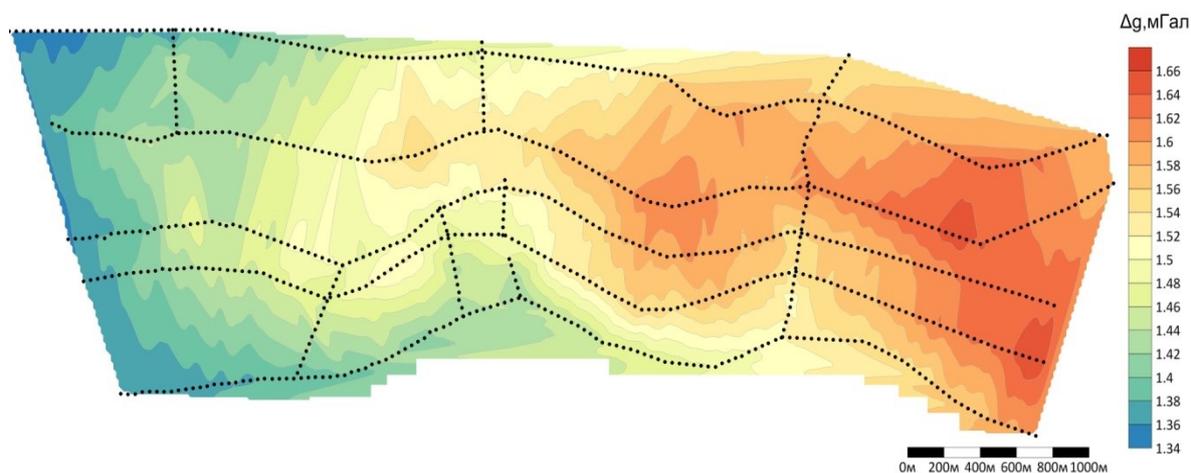
Обработка полевых гравиметрических данных выполнялась согласно действующей Инструкции по Гравиразведке [3] с применением информационно-аналитической системы «ИАС ГРАВИС», разработанной в лаборатории геопотенциальных полей Горного института УрО РАН [5]. Поправки за свободный воздух и промежуточный слой вычислялись с использованием стандартных формул. Влияние рельефа на гравитационное поле учитывалось с использованием программы TopWin [1]. В качестве исходных данных для создания цифровой модели рельефа (ЦМР) были использованы спутниковые данные о рельефе Земли, заданные с разрешением 30 м на земную поверхность, полученные из доступных в сети Интернет ресурсов, предоставленных Национальным агентством геопро пространственной разведки США

(National Imagery and Mapping Agency, NIMA). Эти данные были «вырезаны» в радиусе 177 км от границ площади наблюдений и конвертированы в узлы равномерной сети с шагом высотных отметок в 300 м. Плотность промежуточного слоя была определена методом Неттлетона и составила  $2,4 \text{ г/см}^3$ . Значения суммарной поправки, учитывающей влияние рельефа местности, колеблются в пределах от 1,20 до 2,34 мГал.

Карта аномалии в редукции Буге с поправкой за рельеф с плотностью  $2.4 \text{ г/см}^3$  приведена на рис. 2, амплитуда аномалии от 37.4 до 43.6 мГал.

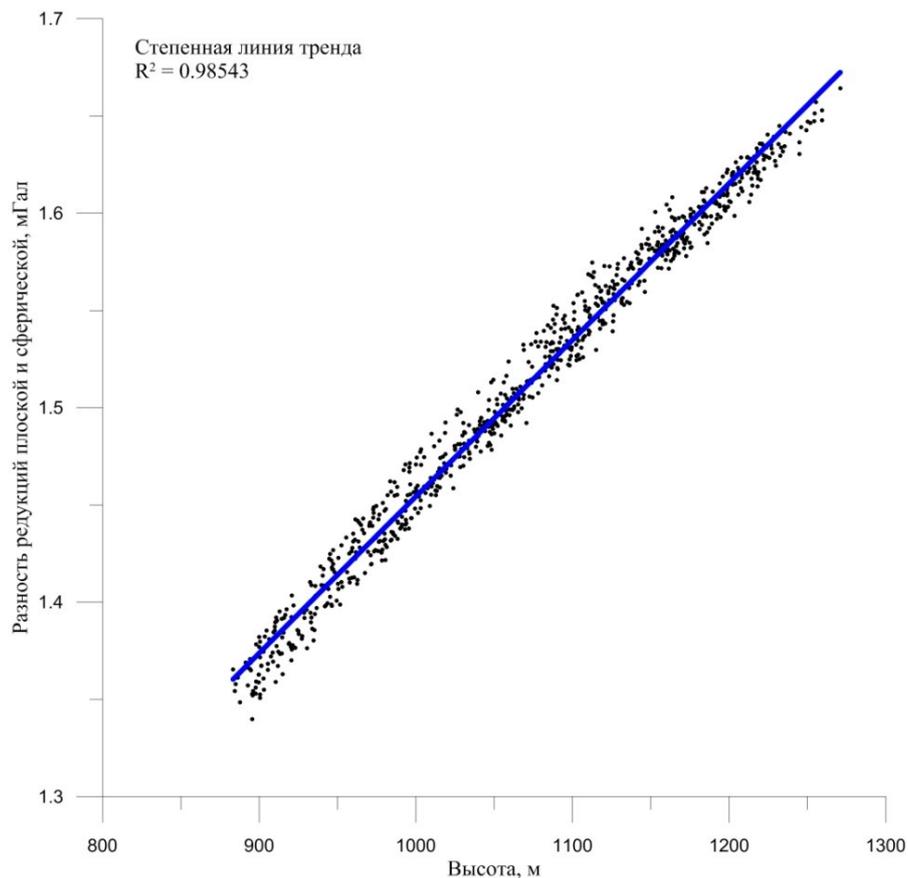
Учитывать криволинейность земной поверхности в процессе камеральной обработки полевых материалов необходимо на этапе ввода топографических поправок (за промежуточный слой и влияние рельефа). Соответственно, этапы полевой съемки, первичной обработки данных и подготовки ЦМР остаются без изменений. Поправка Фая была рассчитана в соответствии с Инструкцией по гравиразведке [3], а поправка за промежуточный слой вычислена с применением формулы А.И. Каленицкого и В.П. Смирнова [4]. Поправки в гравитационное поле, учитывающие отклонения реального рельефа от сферического промежуточного слоя, рассчитывались усовершенствованной программой TopWin 2.0 [1], диапазон их изменения составил от 0.94 до 2.05 мГал. Полученная гравитационная аномалия в редукции Буге с учетом сферичности земной поверхности характеризуется амплитудой от 35.8 до 42.0 мГал.

На рис. 3 показана разность наблюдаемых гравитационных полей в редукции Буге, вычисленных в соответствии с «Инструкцией по гравиразведке» и по методике, учитывающей сферичность Земли. Разница изменяется в интервале от 1.34 до 1.66 мГал, что составляет примерно 3,8% от наблюдаемой аномалии силы тяжести в редукции Буге (рис. 2). На рисунке 4 приведен кросс-плот, отражающий связь между разностью редукций («плоской» и «сферической») и высотой пункта наблюдения. Очевидно, что между параметрами существует сильная корреляционная связь, т.к. коэффициент детерминации равен 0.985.



**Рис. 3.** Разность наблюдаемых гравитационных полей  $\Delta g(n)$  в редукции Буге, вычисленных согласно «Инструкции по гравиразведке» и с учетом кривизны земной поверхности

Таким образом, неучет сферичности Земли при обработке высокоточных гравиметрических данных в условиях расчлененного рельефа существенным образом искажает аномалии силы тяжести. Возникающие при этом погрешности более чем в 50 раз превышают точность полевых гравиметрических измерений.



**Рис. 4.** Кросс-плот зависимости разности редуций, полученных разными способами, от высоты точки наблюдения

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долгаль А.С. Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности. – Абакан: Таймыркомприродресурсы, 2002. – 187 с.: ил.
2. Долгаль А.С., Бычков С.Г., Костицын В.И., Симанов А.А., Хохлова В.В. Оценка искажений аномалий силы тяжести, обусловленных влиянием сферичности Земли // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: сб. науч. тр. Вып. 1 (46) / ГИ УрО РАН [и др.]. – Пермь, 2019. – С. 121-126.
3. Инструкция по гравirazведке. – М.: Недра, 1980. – 83 с.
4. Методические рекомендации по учету влияния рельефа местности в гравirazведке / СНИИГиМС; [Сост.: А.И. Каленицкий, В.П. Смирнов]. – Новосибирск, 1981. – 174 с.: ил.
5. Симанов А.А. Разработка и создание информационно-аналитической системы хранения, обработки и анализа гравиметрических данных: дис. ... к.т.н.: 25.00.10: защищена 27.11.08 / Симанов Алексей Аркадьевич. – М., 2008. – 160 с.
6. Хохлова В.В. Применение современных методов гравиметрического редуцирования (на примере ультрамафитового массива Кондёр) // Горное эхо. – 2021. – № 4 (85). – С. 83-86. – DOI: 10.7242/echo.2021.4.17.

# РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.276

DOI:10.7242/echo.2023.4.13

## МНОВОВАРИАНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ОЧАГОВОГО ЗАВОДНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ЗАЛЕЖЕЙ С КАРБОНАТНЫМ ТИПОМ КОЛЛЕКТОРА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПЕРМСКОГО КРАЯ

В.И. Воробьев<sup>1</sup>, Н.А. Князев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «Лукойл-Пермь» г.Пермь

<sup>2</sup>Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Разработка залежей на естественном режиме зачастую не способна обеспечить удовлетворительное энергетическое состояние. Для средних и крупных залежей энергия, которой обеспечивает водоносный горизонт, не способна компенсировать те отборы, которые являются оптимальными при выработке запасов нефти. В связи с этим на месторождениях с реализованной программой эксплуатационного бурения и находящихся на пике своей добыче или завершающей стадии целесообразно создание искусственной системы поддержания пластового давления. При этом от корректного проектирования данной системы во многом зависит общая эффективность разработки. В данной работе рассмотрены математические подходы по оптимизации существующей системы поддержания пластового давления на основе многовариантных расчетов на цифровой фильтрационной модели залежи.

**Ключевые слова:** фильтрационная модель, поддержание пластового давления, взаимовлияние скважин, матрица дренирования, заводнение, гидродинамическое моделирование.

### Введение

Основными задачами проектировщика является разработка и инженерный расчет такой системы поддержания пластового давления (ППД), которая обеспечит баланс между поддержанием энергетического состояния залежи и обводнением продукции скважин в соответствии с выработкой запасов нефти. Для решения данной задачи разработано множество математических, аналитических, статистических аппаратов [1], которые направлены на автоматизацию инженерных расчетов и снижение человеческого фактора [2]. Кроме того, для оптимизации работы нагнетательных скважин существует ряд промысловых исследований. Наиболее популярными методами являются трассирование и гидропрослушивание [3-4]. Результатом проведения данных исследований является численная оценка степени влияния целевой нагнетательной скважины на реагирующие добывающие. Однако применение данных исследований осложнено рядом факторов, так, при гидропрослушивании необходимо соблюдать режим тишины для дифференцирования эффекта от влияния разработки. Также высокая стоимость исследований и длительность проведения (при трассировании эффект может проявиться только через несколько лет) ограничивает их применимость.

К наиболее популярным и востребованным математическим аппаратам относится геолого-гидродинамическое моделирование [5]. Создание модели и проведение на ней расчетов является современным методом прогнозирования разработки и снижения всякого рода рисков. Фильтрационная модель представляет собой совокупность интегрированной в нее исходной информации, учитывающей геологическое строение залежи, физико-химические свойства флюидов, относительные фазовые проницаемости, фактические промысловые данные. Поэтому комплексиро-

вание имеющихся данных зачастую позволяет избежать ошибок, встречающихся в ручных расчетах.

В качестве объекта исследований рассматривается пласт Т-Фм Жилинского месторождения Пермского края. Залежь является массивной, представлена карбонатным типом коллектора. Средний коэффициент пористости составляет 9% при проницаемости 117 мД. Объект разрабатывается с 2014 года и находится на третьей стадии разработки, текущая обводненность составляет в районе 65-70%. Необходимо отметить, что на объекте сформирована система поддержания пластового давления очагового типа. Осложняющим фактором является значительная изменчивость фильтрационно-емкостных свойств и высокий коэффициент расчлененности – 15,1 единиц.

Для повышения эффективности разработки залежи предлагается оптимизация системы ППД на основе матрицы дренирования. На фильтрационной модели залежи выполнен расчет базового сценария разработки при текущих дебитах скважин и приемистостях. Матрица степени влияния нагнетательных скважин на добывающие построена на 20 лет прогнозного периода. Результаты построения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Матрица взаимовлияния скважин Жилинского месторождения

Добывающие	Нагнетательные					
	105	401	409	413	416	419
№ скважины						
403	0,05	0,03	0,00	0,67	0,16	0,00
404	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
407	0,38	0,22	0,33	0,33	0,00	0,00
415	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
418	0,19	0,16	0,15	0,00	0,00	1,00
501	0,00	0,06	0,00	0,00	0,84	0,00
502	0,05	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
408	0,00	0,22	0,52	0,00	0,00	0,00

На основе данной матрицы выделены группы скважин по очагам нагнетания. Каждая группа сформирована таким образом, что в нее входит одна нагнетательная скважина и все добывающие скважины, на которые она оказала влияние. В дальнейших расчетах для чистоты эксперимента использовано аналогичное распределение на группы. По каждой группе выполнен анализ работы очага нагнетания.

В результате расчетов за 20 лет прогнозного периода по базовому сценарию наибольшей обводненностью характеризуется очаг скважины № 416, наименьшей – очаг скважины № 419. Распределение обводненности по очагам представлено на рисунке 1.

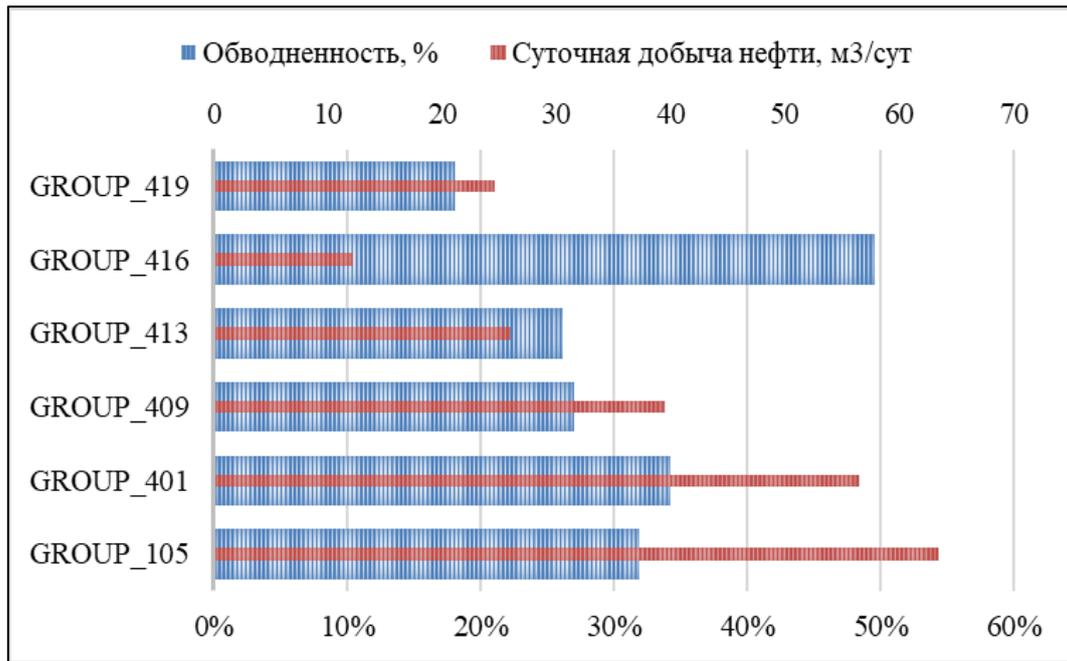


Рис. 1. Показатели разработки по группам скважин за 20 лет прогноза

При этом необходимо дифференцировать характер обводнения групп скважин, так как некоторые реагирующие скважины могут иметь низкий коэффициент влияния, но при этом иметь значительный уровень обводненности от законтурной области. Для этого построена сопоставительная диаграмма компенсации отборов закачки и обводненности по каждой группе скважин (рисунок 2).

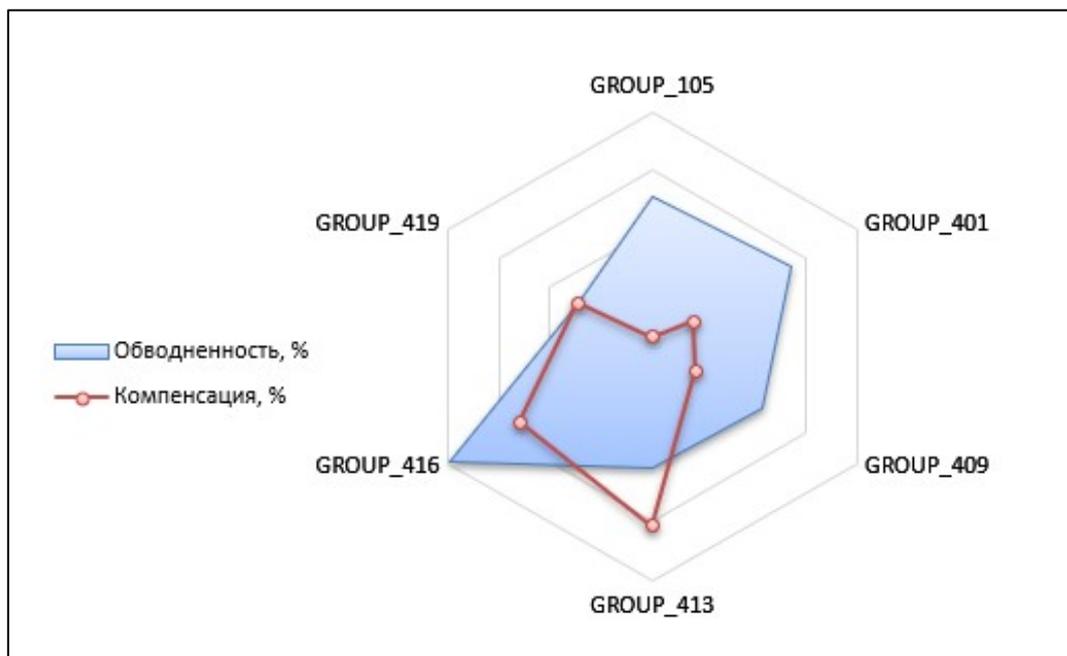


Рис. 2. Диаграмма сопоставления обводненности и компенсации отборов закачкой

На основе матрицы взаимовлияния скважин и анализа построенных диаграмм возможна разработка рекомендаций по оптимизации режимов работы нагнетательного фонда. Очаг скважины № 413 характеризуется низкой обводненностью, добы-

вающие скважины имеют значительный потенциал, а риск обводнения пластовой водой низкий. В связи с этим увеличение объемов закачки может положительно сказаться на дебитах добывающих скважин. Очаги скважин №№ 105, 401, 409 характеризуются низкой компенсацией и обводненностью в 25-35% (предположительно пластовой водой). Повышение объемов закачки может повлиять как в положительную сторону за счет перераспределения фильтрационных потоков в пласте, так и в отрицательную из-за прорыва закачиваемой воды к забоям добывающих скважин. Очаг скважины № 416 обводнен более всего, в связи с этим необходимо сокращение объемов закачки. Для подтверждения или опровержения выдвинутых предположений выполнены многовариантные оптимизационные расчеты с отклонением объемов закачки относительно базового сценария. На рисунках 3-5 представлены сопоставительные диаграммы зависимости накопленной добычи нефти от изменения режимов работы нагнетательных скважин, полученные по результатам многовариантного моделирования.

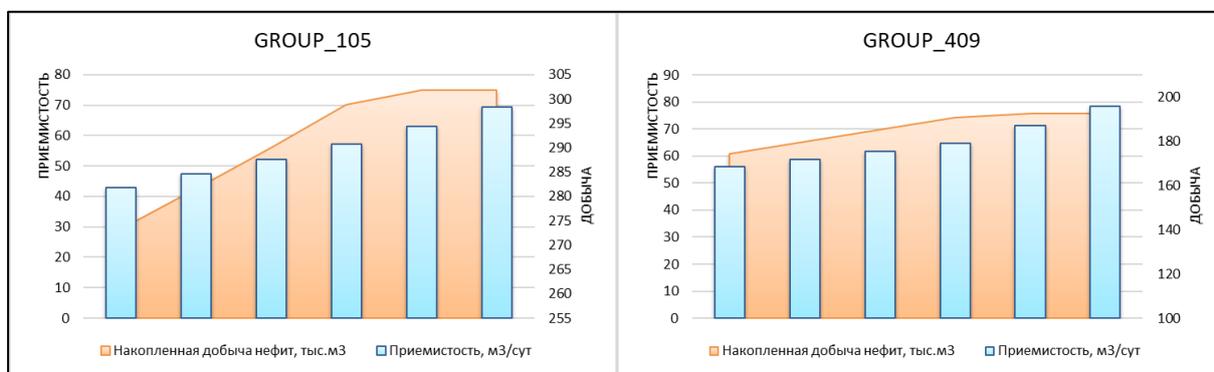


Рис. 3. Диаграмма зависимости накопленной добычи нефти от приемистости по очагам скважин №105 и №409

Выдвинутые ранее предположения подтверждаются гидродинамическими расчетами. При этом стоит отметить, что повышение приемистости по скважине № 105 целесообразно проводить не более, чем до 60-65 м³/сут. При дальнейшем повышении может возникнуть риск преждевременного обводнения продукции скважины.

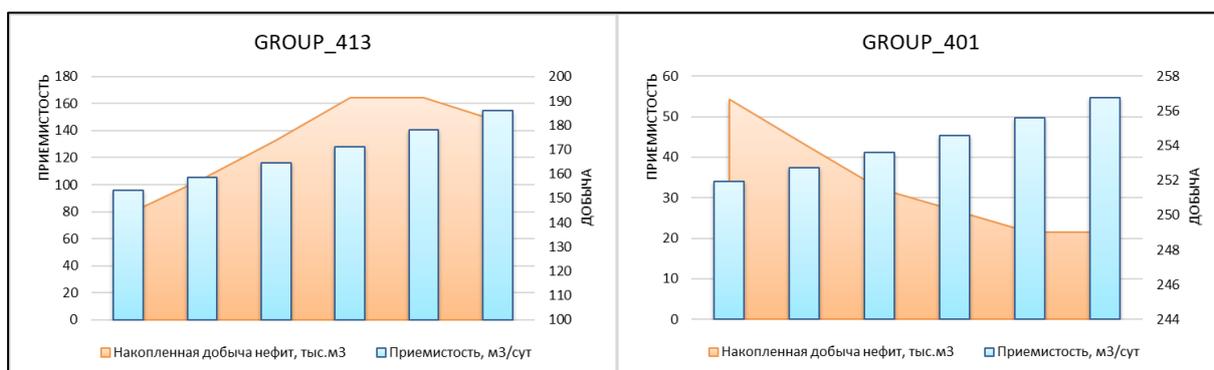


Рис. 4. Диаграмма зависимости накопленной добычи нефти от приемистости по очагам скважин № 413 и № 401

По очагу скважины № 401 наблюдается обратная зависимость, при увеличении закачки значительными темпами растет обводненность добывающих скважин. В связи с

этим при дальнейшей эксплуатации необходимо принимать во внимание повышенную гидродинамическую связь между нагнетательной и добывающими скважинами. Очаг скважины № 413 имеет потенциал повышения добычи нефти за счет увеличения компенсации.

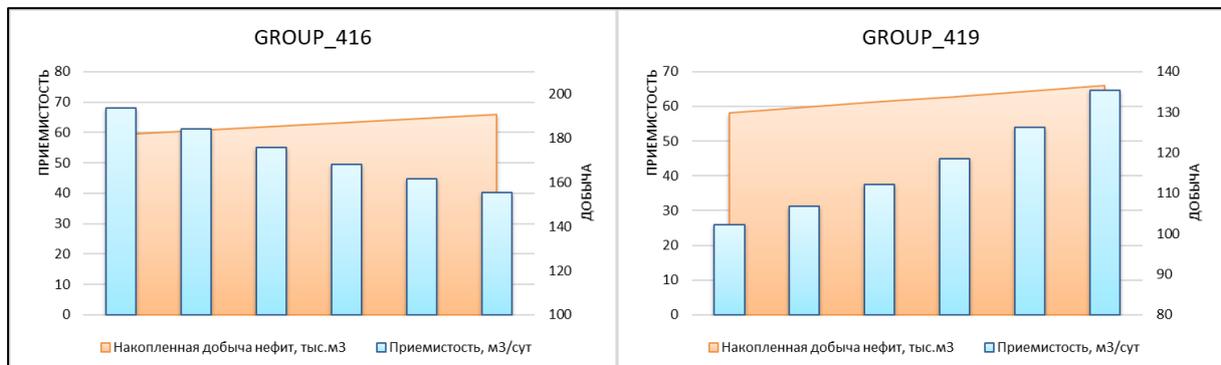


Рис. 5. Диаграмма зависимости накопленной добычи нефти от приемистости по очагам скважин № 416 и № 419

Согласно расчетам по скважинам №№ 416 и 419 изменение объемов закачки незначительно сказывается на добывающие скважины, исходя из чего можно сделать вывод, что текущий режим оптимален для поддержания энергетического состояния в зоне выработки запасов. Кроме того, в соответствии с матрицей взаимовлияния скважина № 419 оказывает воздействие на единственную добывающую скважину.

### Заключение

По результатам работы выполнено многовариантное моделирование прогнозных сценариев разработки пласта Т-Фм Жилинского месторождения Пермского края с оптимизацией режимов работы нагнетательных скважин. На основе матрицы взаимовлияния скважин и анализа работы групп скважин по очагам нагнетания выдвинуты предложения и рекомендации по оптимизации системы поддержания пластового давления. Представленные рекомендации верифицированы при прогнозировании сценариев на гидродинамическом симуляторе.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абабков К.В., Васильев В.М., Хисамутдинов Н.И., Сафиуллин И.Р., Шаисламов В.Ш. Экспресс-метод оценки степени взаимодействия скважин с использованием частотного анализа данных истории эксплуатации нагнетательных и добывающих скважин // Нефтепромысловое дело. – 2014. – № 7. – С. 10-13.
2. Кузьменко А.С., Янакаев Р.Р. Регулирование технологического режима нагнетательных скважин с использованием аналитических моделей // Нефтегазовое дело. – 2017. – Т.15, № 2. – С. 51-57.
3. Галиев Ф.Ф., Кривова Н.Р., Поняев С.В., Трофимов А.С. Трассерные исследования пластов группы «Ю» Коттынской площади // Вестник недропользователя ХМАО. – 2007. – № 18. – С. 44-46.
4. Кобяшев А.В., Волков В.А. Изучение строения пласта с использованием гидропрослушивания на примере сузунского месторождения // Нефть.Газ.Новации. – 2016. – № 2. – С. 38-41.
5. Степанов С.В., Соколов С.В., Ручкин А.А., Степанов А.В., Князев А.В., Корытков А.В. Проблематика оценки взаимовлияния добывающих и нагнетательных скважин на основе математического моделирования // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 146-164. – DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-146-164.

## АЭРОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ И БАРЬЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Е.Л. Гришин

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Одним из широко используемых инструментов в области промышленной безопасности является обоснование безопасности опасного производственного объекта, позволяющее в полной мере учесть специфику различных горных предприятий и обосновать экономические затраты на внедрение современных систем промышленной безопасности. Однако данная область сталкивается с дефицитом нормативно-методической литературы, отсутствием методик оценки и расчета величины отдельных видов риска. В данной работе описано понятие аэрологического риска, представлены подходы к оценке аэрологического риска на горных предприятиях с подземным способом добычи, расчету и анализу величины риска, определению необходимости и достаточности барьеров безопасности, выбору параметров компенсирующих мероприятий.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, промышленная безопасность, обоснование безопасности опасного производственного объекта, аэрологический риск, анализ рисков, барьеры безопасности, компенсирующие мероприятия.

### Единый сценарий аэрологического риска

Аэрологический риск – это риск нарушения системы вентиляции рудника, при котором возникает вероятность несчастных случаев вследствие отравления ядовитыми газами, поступающими в рудничную атмосферу, или вероятность возникновения взрыва ввиду превышения предельно-допустимой концентрации (ПДК) по горючим газам. Для оценки аэрологического риска вне зависимости от его конкретных причин используется единый сценарий аэрологического риска, предполагающий анализ всей системы вентиляции рудника в целом. В рамках данного сценария выделены отдельные составляющие аэрологического риска (рисунок 1), отвечающие за различные аспекты изменения параметров рудничной атмосферы в рабочих зонах, являющихся основными потребителями воздуха в системе вентиляции рудника.

1. Первая составляющая (красный цвет на рисунке) отвечает за количество свежего воздуха, поступающего на проветривание. В рамках данной составляющей анализируется та часть системы вентиляции рудника, которая влияет на его расход по тракту движения к рабочим зонам. Например, отклонения параметров работы вентиляторов, изменение величины утечек воздуха и т.д. [1, 2]

2. Вторая составляющая (оранжевый цвет) отвечает за выделение опасных и ядовитых компонентов непосредственно в пределах потребителя воздуха. В рамках данной составляющей анализируются источники загрязнения рудничной атмосферы непосредственно в местах ведения горных работ. Например, такие риски как: некорректное определение требуемого количества воздуха, отсутствие периодических замеров газобиличности рабочих зон и т.д. [3].

3. Третья составляющая (синий цвет) отвечает за процессы накопления газа в пределах рабочей зоны как отдельно рассматриваемого потребителя воздуха. Анализируется часть вентиляционной системы, обеспечивающая поддержание параметров проветривания непосредственно рабочей зоны. Например, при проветривании рабочей зоны с помощью вентилятора местного проветривания (ВМП) анализируется риск выхода из строя или неправильно определенных параметров ВМП, разрыва вентиляционного воздухопровода, наличия рециркуляции и т.д.

4. Четвертая составляющая (зеленый цвет) отвечает за качественный состав подаваемого на проветривание потребителей воздуха. В классической вентиляции считается, что на проветривание поступает свежий воздух с нулевыми концентрациями опасных примесей. Однако существует риск изменения качественного состава поступающей на проветривание струи воздуха. В данной составляющей анализируются такие риски как: наличие последовательного проветривания, выброс газов на свежей струе и т.д.

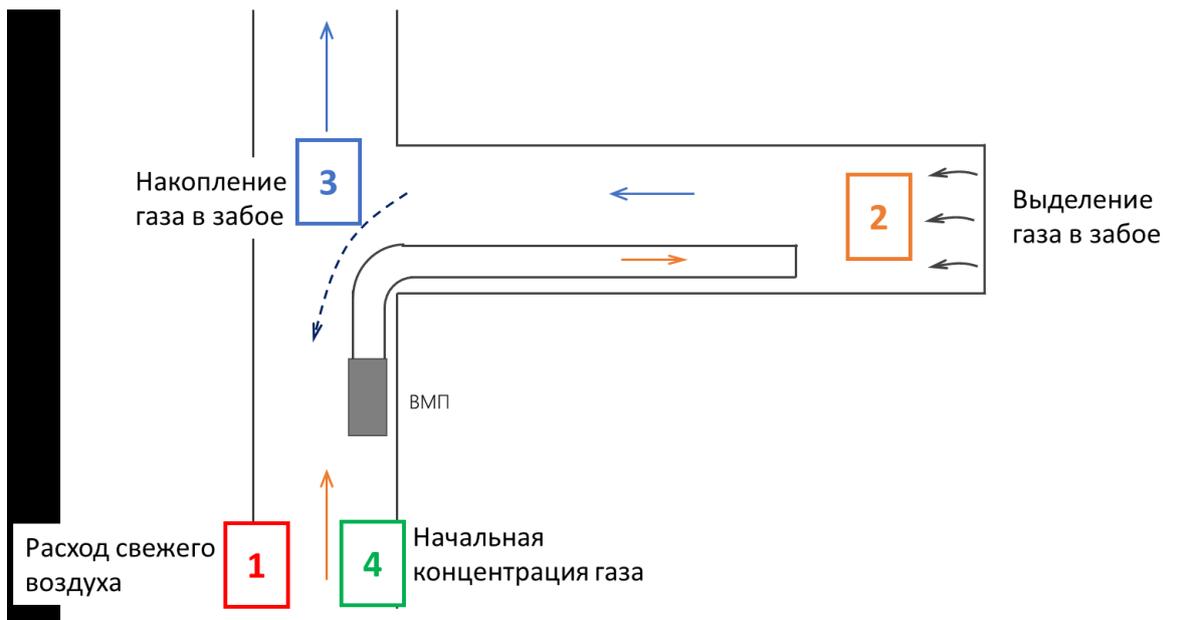


Рис. 1. Схема единого сценария аэрологического риска

**Расчет величины аэрологического риска**

Для расчета величины аэрологического риска используется метод «Анализа дерева отказов» [4]. Этот метод позволяет получить количественную величину риска, уложить причинно-следственные связи отдельных событий в рамках единого сценария аэрологического риска с учетом описанных его составляющих, показать последовательность отказов различных элементов системы вентиляции, инцидентов, ошибок персонала, внешних воздействий, приводящую к внештатной ситуации.

На рисунке 2 представлен пример схемы расчета величины аэрологического риска в виде дерева отказов. Схема разработана в рамках расчета аэрологического риска при отступлении безопасности для реального опасного производственного объекта в части изменения схемы и способа проветривания рудника. На схеме выделены отдельные составляющие единого сценария аэрологического риска (цвета представлены в соответствии с рисунком 1). Прослеживаются причинно-следственные связи, позволяющие определить инициирующие события (голубые прямоугольники) в рамках отдельных частей системы вентиляции рудника.

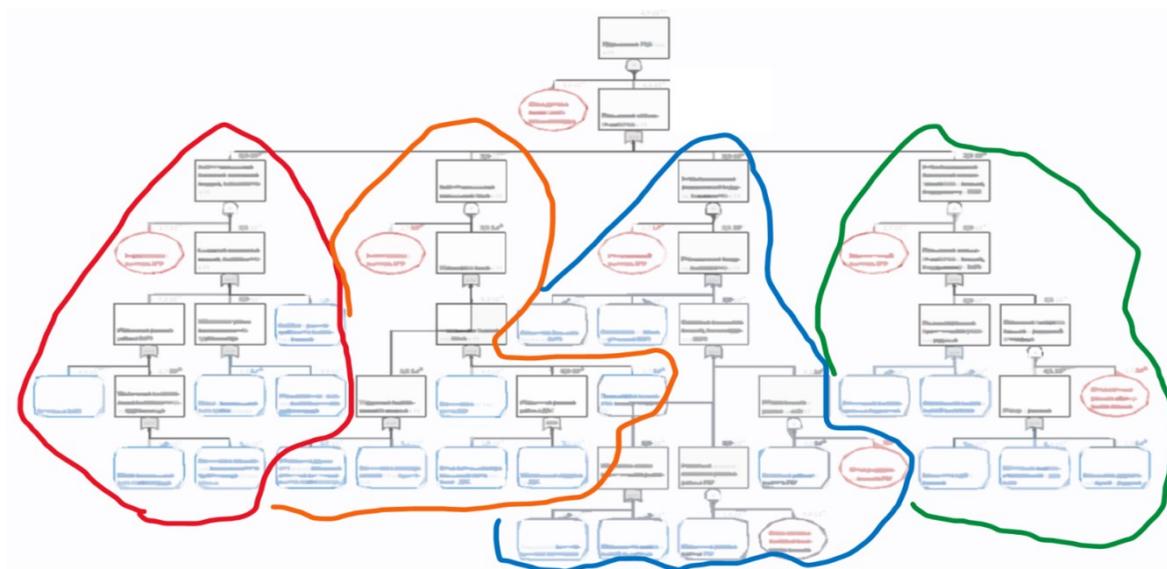


Рис. 2. Схема расчета величины аэрологического риска с учетом его отдельных составляющих

### Оценка аэрологического риска в рамках обоснования безопасности

В рамках обоснования безопасности предлагается проводить сравнение аэрологического риска до принятых отступлений от требований промышленной безопасности и в рамках их внедрения не для всего аэрологического риска в целом, а только для тех его составляющих, которые претерпевают изменения при отступлении от требований промышленной безопасности (либо разработке новых требований) [5].

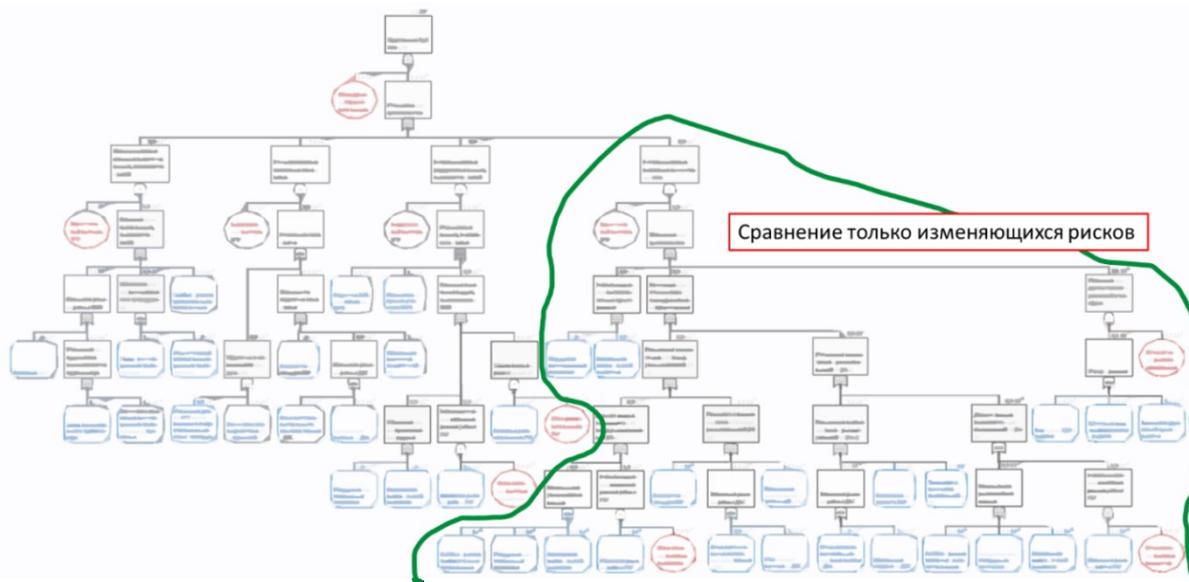


Рис. 3. Схема для оценки аэрологического риска при разработке обоснования безопасности

На рисунке 3 представлена схема оценки аэрологического риска при отступлении от требований промышленной безопасности (схема до отступления представлена на рисунке 2). Видно, что изменения претерпевает только величина риска, связанная с качественным составом свежего воздуха, поступающего на проветривание потребителей. Это позволяет не проводить подробный анализ инициирующих событий и частот их возникновения для других составляющих аэрологического риска. Тем самым снижаются трудозатраты и возрастает точность расчетов и корректность принимаемых решений по компенсации возникающих рисков.

### Выбор барьеров безопасности и определение параметров компенсирующих мероприятий

На рисунке 4 представлен процесс определения необходимых барьеров безопасности для обеспечения величины риска не ниже той, которая была до внедрения отступления от требований промышленной безопасности в рамках обоснования безопасности. Использованный метод анализа деревьев отказов позволяет легко определить критичные узлы системы вентиляции и обеспечить увеличение уровня промышленной безопасности за счет внедрения компенсирующих мероприятий.

В рамках разработки барьеров безопасности, обеспечивающих увеличение уровня промышленной безопасности, мы используем следующие компенсирующие мероприятия.

5. Регламентные работы. Определение периодичности проведения газоздушных съемок, исследований газоносности массива. Обоснование периодичности контроля ИТР состояния и работоспособности вентиляционного оборудования.

6. Методическое обеспечение. Разработка дополнительных разделов РТПП с мероприятиями (требования к организации барьеров безопасности), расширение требований

должностных инструкций. Разработка дополнительных разделов расчета количества воздуха (например, коэффициенты запаса).

7. Контроль состава рудничной атмосферы. Применение автоматических средств контроля параметров рудничной атмосферы, определение мест их размещения и обоснование минимально требуемого их количества. Разработка методического обеспечения для выполнения контрольных ручных замеров содержания ядовитых и взрывоопасных газов.

8. Требования к диспетчеризации. Единая система мониторинга вентиляционных устройств, расходов воздуха и качественного его состава. Разработка систем диспетчеризации на основе моделей вентиляционной сети с возможностью прогноза изменения проветривания. Интеграция системы мониторинга вентиляции с системой позиционирования транспорта и рабочих.

9. Аварийная автоматика. Автоматическое отключение электроэнергии, сигнализация при превышении ПДК, автоматическое увеличение расхода воздуха в критических ситуациях, автоматическое управление вентиляционными устройствами при возникновении аварийной ситуации.

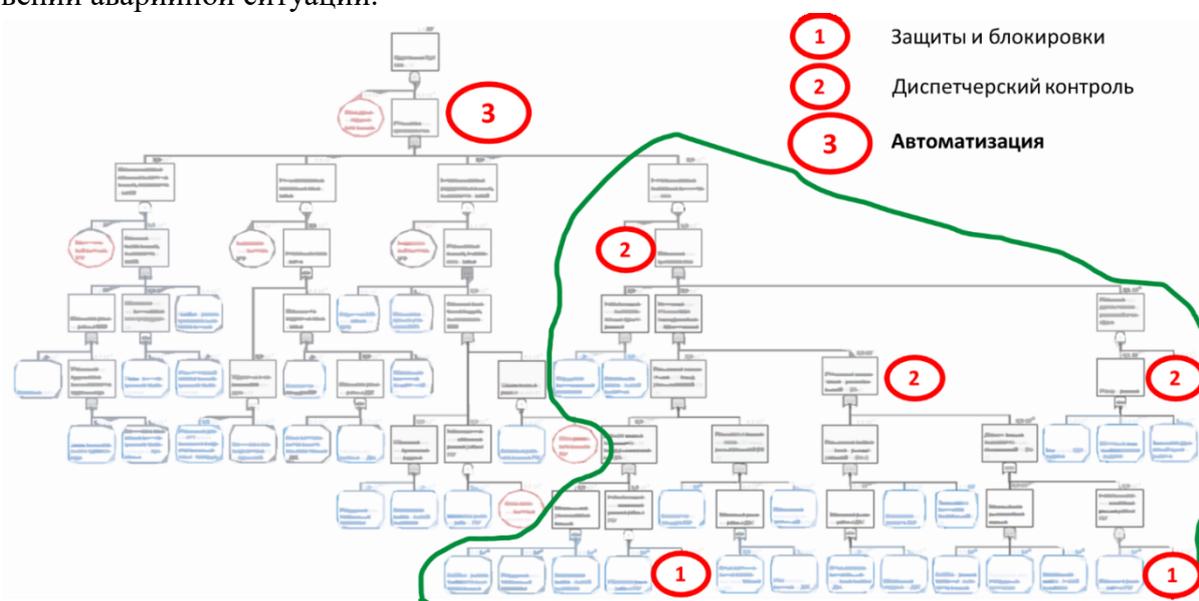


Рис. 4. Определение необходимых компенсирующих мероприятий (барьеров безопасности)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Киряков А.С. К вопросу энергосбережения проветривания рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 3. – С. 139-147.
2. Семин М.А., Гришин Е.Л., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 623-632. – DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.
3. Кузьминых Е.Г., Кормщиков 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.
4. Руководство по безопасности «Методические основы анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах»: утв. 03.11.2022, № 387.
5. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта»: утв. 15.07.2013, № 306. – М.: ЗАО «НТИ исследований проблем пром. безопасности, 2013. – 16 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 73).

## РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОЙ ЭВАКУАЦИИ ГОРНОРАБОЧИХ ЧЕРЕЗ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СТВОЛЫ ПРИ РЕВЕРСИРОВАНИИ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ

Н.А. Князев, А.С. Смородских, Д.С. Кормщиков  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Статья является продолжением цикла работ по исследованию безопасности реверсирования вентиляционной струи на горнодобывающих предприятиях, расположенных в северных регионах. В работе рассмотрен подход к выбору компенсирующих мероприятий, обеспечивающих безопасность эвакуации людей через вентиляционные стволы во время реверсирования воздушной струи, основанный на анализе влияния холодного воздуха на отдельных этапах эвакуации. Выбор мероприятий основывается на сравнении фактической длительности эвакуации и прогнозируемого времени безопасного нахождения людей в различных участках рудника. В случае, если безопасного времени на определенном этапе эвакуации недостаточно, возможна реализация предлагаемого мероприятия. Рассматриваемый подход позволяет учесть индивидуальность условий эвакуации для различных горных предприятий и осуществить более точный выбор мероприятий.

**Ключевые слова:** реверсивный режим проветривания, глубокий рудник, вентиляционный ствол, компенсирующие мероприятия, моделирование, рудничная вентиляция, эвакуация.

### Введение

Задействование реверсивного режима проветривания в холодный период года может привести к поступлению воздуха с отрицательными температурами по вентиляционным (воздуховыдающим) стволам в рудник, так как данные стволы, как правило, не оборудованы системами подогрева воздуха. Возникновение аварийной ситуации с задействованием реверсивного режима проветривания влечёт за собой угрозу здоровью людей во время эвакуации по данным стволам. В работах [1-3] описано влияние холодного воздуха при подаче его в рудник. Данный вопрос имеет особую актуальность для горных предприятий, расположенных в арктическом и субарктическом климатических поясах, так как среднегодовая температура атмосферного воздуха в этих условиях составляет от  $-12$  до  $-14$  °С.

Для обеспечения безопасной эвакуации людей при реверсировании воздушной струи предлагается разработка компенсирующих и организационных мероприятий. Комплекс мероприятий подбирается индивидуально для каждого горного предприятия в зависимости от климатических и горно-технических условий [4]. В работе рассмотрен подход к выбору и обоснованию компенсирующих мероприятий по обеспечению безопасности во время зимнего реверса на примере исследований реверсивного режима проветривания действующего горного предприятия, расположенного в северном регионе Красноярского края. Подход основан на натурных исследованиях микроклиматических параметров воздуха при плановом реверсировании при отсутствии систем подогрева воздуха на вентиляционных стволах и прогнозе температурного режима вентиляционной струи при наиболее пессимистичных климатических и временных условиях.

### План разработки и выбора мероприятий

Разработка и выбор компенсирующих мероприятий для обеспечения безопасности при реверсировании выполнены на основе следующего плана исследований.

1. **Натурные исследования** – измерение микроклиматических параметров вентиляционной струи при плановом реверсировании на различных участках ствола.

2. **Прогноз температурного режима** – прогноз температурного режима вентиляционной струи, поступающей в рудник при реверсировании, на основе сетевого теплофизического моделирования при наиболее пессимистичных условиях.

3. **Расчёт времени эвакуации** – анализ времени эвакуации на основе плана мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварии и количества людей, участвующих в эвакуации.

4. **Оценка влияния холодного воздуха на человека** – учет влияния холодного воздуха на человека в зависимости от длительности реверсирования и времени эвакуации на основании тепловой модели. Определение времени безопасной эвакуации.

5. **Выбор компенсирующих мероприятий** – осуществляется, исходя из соотношения времени, требующегося на эвакуацию, и времени безопасной эвакуации при наиболее сложных условиях.

### **Натурные исследования**

Натурные замеры в рамках исследования проведены во время планового реверсирования вентиляционной струи в холодное время года. План проведения исследований с примером возможных результатов замеров описан в работе [5]. Необходимо отметить, что длительность планового реверсирования и параметры атмосферного воздуха на момент его проведения могут значительно отличаться от возможных условий во время возникновения аварийной ситуации. Результаты исследований необходимы для выбора параметров тепловой модели с целью приведения результатов моделирования к фактическим данным. После чего выполняется прогноз температурного режима вентиляционной струи на более длительный срок реверсирования при наиболее низкой температуре атмосферного воздуха. Подробное описание метода расчета распределения температуры воздуха в вентиляционном стволе при реверсировании воздушной струи, основанном на математическом моделировании нестационарных теплообменных процессов в стволе и окружающих породах, приведено в работах [5, 6].

### **Результаты прогноза температурного режима**

Математическое моделирование нестационарных теплообменных процессов в вентиляционном стволе выполнено с помощью модуля теплогазодинамического расчета программы «АэроСеть» [7-9]. Температура атмосферного воздуха при моделировании принята как абсолютно минимальная в соответствии с СП 131.13330.2018 «Свод правил. Строительная климатология», и равняется  $-57^{\circ}\text{C}$ . Длительность реверсирования ограничена 24 часами. Результаты прогноза распределения температуры воздуха в вентиляционном стволе на сопряжениях с вентиляционным каналом и технологическими горизонтами на отметках  $-680$  м,  $-850$  м и  $-950$  м представлены на рис. 1.

Полученные результаты моделирования температурного режима вентиляционной струи необходимы для оценки влияния холодного воздуха на горнорабочих при эвакуации через запасные выходы и определении времени безопасной эвакуации без применения мероприятий.

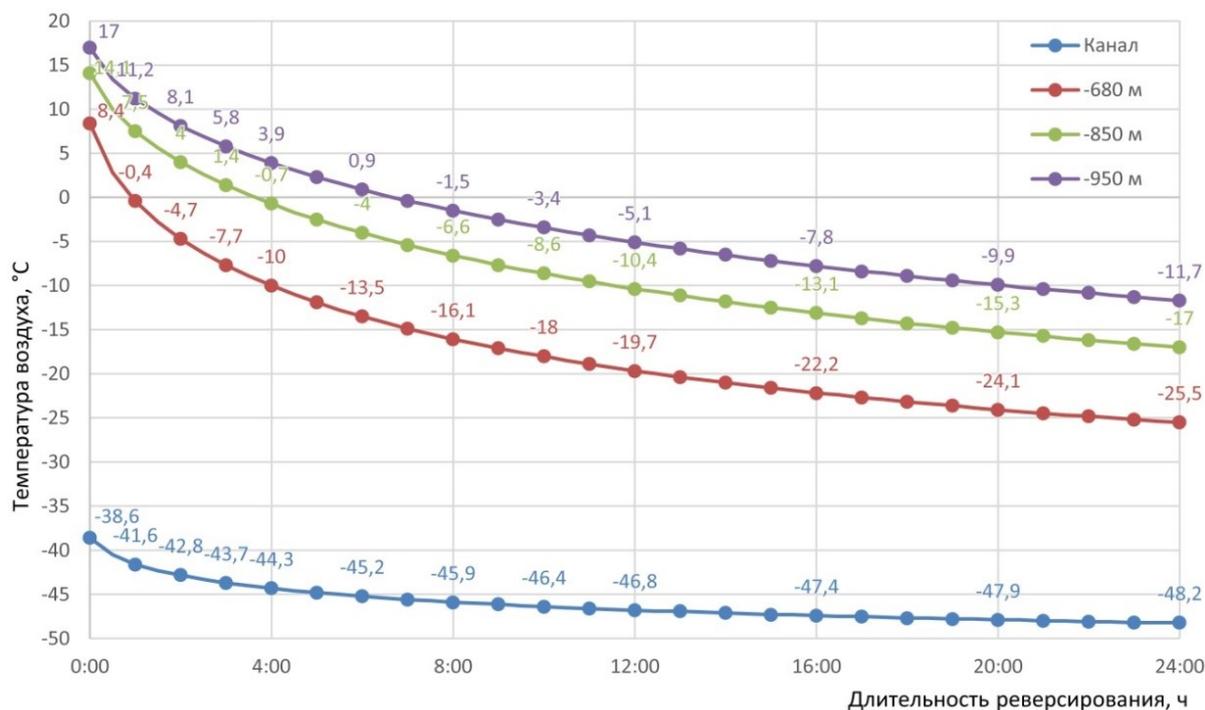


Рис. 1. Распределение температуры воздуха в реверсивном режиме проветривания

**Расчёт времени эвакуации**

Для оценки влияния холодного воздуха на организм человека необходимо учитывать длительность нахождения на холодной вентиляционной струе. При расчете времени нахождения людей в охлаждающем микроклимате маршрут эвакуации разделяется на следующие этапы.

1. Движение людей к вентиляционному стволу –  $T_1$ .
2. Ожидание подъемного сосуда вблизи ствола –  $T_2$ .
3. Подъем всех людей на поверхность –  $T_3$ .

Данные этапы эвакуации выполняются последовательно и могут занимать различное время в зависимости от количества людей, участвующих в эвакуации, и их местонахождения в руднике. При расчете времени эвакуации горнорабочих рассматривается наиболее пессимистичная ситуация – в эвакуации участвует наибольшее возможное количество людей, часть которых расположена в наиболее удаленном от запасного выхода участке рудника. Исходные данные при расчете времени эвакуации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчёта времени эвакуации

Наибольшее количество людей, участвующих в эвакуации	110 человек
Наибольшее расстояние до вентиляционного ствола	3650 метра
Средняя скорость движения	48 м/мин
Вместимость клетки	36 человек
Время спуска\подъема клетки	5,5 минут
Время конечных операций (посадка/высадка)	5 минут

При расчете времени движения горнорабочих к вентиляционному стволу маршрут эвакуации определен согласно плану мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварии, а скорость движения людей – согласно пункту 46 методических рекомендаций РД 15-11-2007 [10]. В результате расчета наибольшее время движения людей до исследуемого вентиляционного ствола составило **1 час 16 минут (T<sub>1</sub>)**.

Время ожидания вблизи ствола зависит от количества людей, участвующих в эвакуации, вместимости и времени подъема клетки, времени концевых операций (посадка и высадка людей). В результате расчета наибольшее время ожидания последней группы людей вблизи вентиляционного ствола составило **1 час 3 минут (T<sub>2</sub>)**.

Время, через которое будет осуществлен подъем последней группы людей по стволу, складывается из времени движения к стволу, времени ожидания и времени посадки и подъема по стволу. В результате расчета время выхода всех людей на поверхность составило **2 часа 34 минуты (T<sub>3</sub>)** с момента начала эвакуации.

### Оценка влияния холодного воздуха на горнорабочих при эвакуации

Оценка влияния холодного воздуха на человека при эвакуации выполнена на основе МР 2.2.7.2129-06. «Методические рекомендации. Физиология труда и эргономика» [11]. Данная методика использует интегральный показатель условий охлаждения (обморожения) ИПУОО для определения риска охлаждения и времени предельно допустимого пребывания человека в охлаждающем микроклимате:

$$\text{ИПУОО} = 34,654 - 0,4664t_b + 0,6337V \quad (1)$$

где  $t_b$  – температура воздуха, °С;  $V$  – скорость воздуха, м/с.

Степень влияния холодного воздуха и время безопасного нахождения на вентиляционной струе определяются в зависимости от величины ИПУОО, приведенной в таблице 2. Метод оценки влияния холодного воздуха на человека в зависимости от величины ИПУОО более подробно рассмотрен в работе [4].

Таблица 2

Зависимость степени влияния холодного воздуха  
и времени безопасного пребывания от величины ИПУОО

Значение ИПУОО	Степень влияния холодного воздуха	Время безопасного пребывания, мин
$\text{ИПУОО} \leq 34$	Отсутствует	Не ограничено
$34 < \text{ИПУОО} \leq 47$	Умеренное	60
$47 < \text{ИПУОО} \leq 57$	Критическое	1
$57 < \text{ИПУОО}$	Катастрофическое	0,5

Программный комплекс «Аэросеть», основываясь на результатах воздухо- и тепло-распределений, позволяет рассчитать время безопасного пребывания людей в охлаждающем микроклимате на различных участках вентиляционной сети рудника, как показано на рисунке 2. При этом учитывается фактор снижения температуры вентиляционной струи и изменение степени влияния холодного воздуха на одном и том же участке с увеличением времени реверсирования. На основе расчетов степени влияния холод-

ного воздуха в зависимости от длительности реверсирования произведен расчёт предельно допустимого времени эвакуации на каждом этапе.

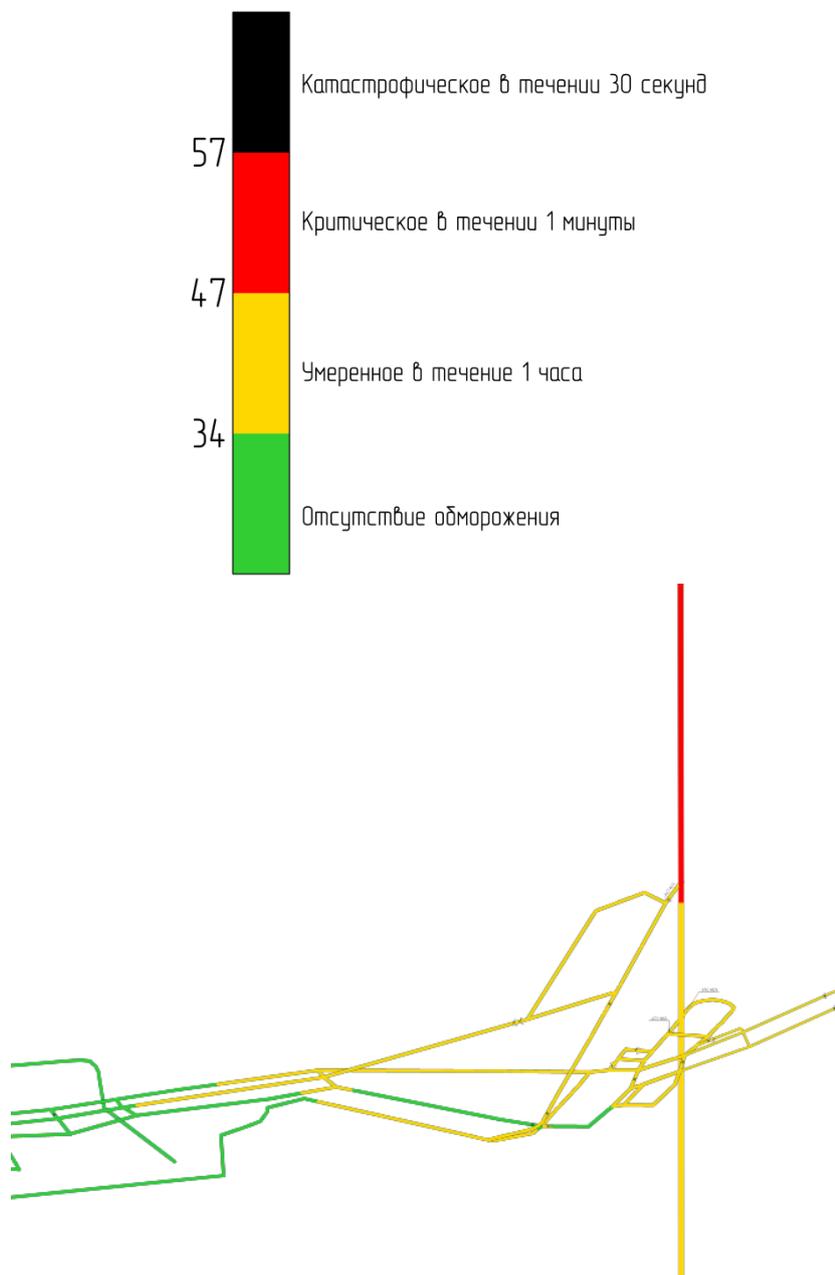
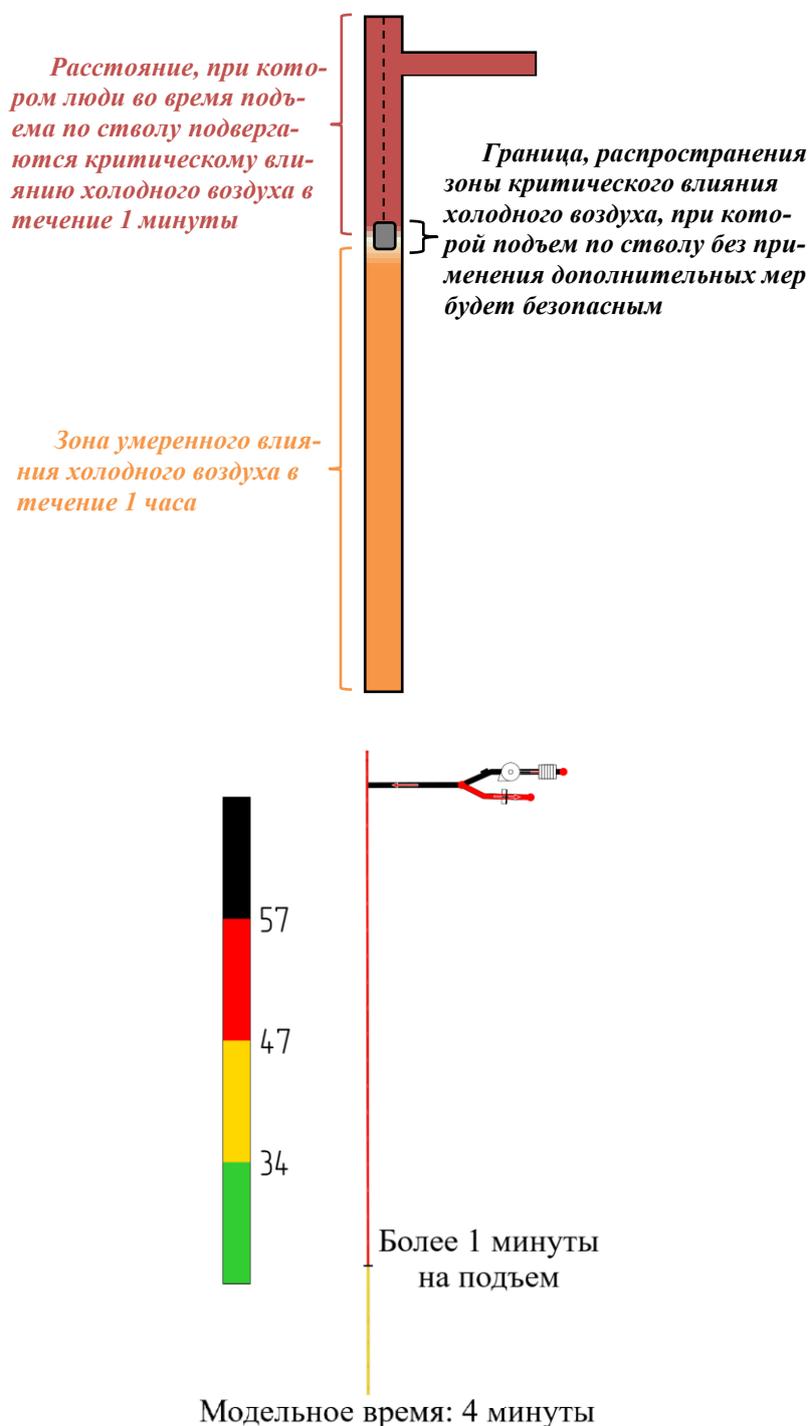


Рис. 2. Распределение зон влияния холодного воздуха через 12 часов реверсирования

Так как фактическое время движения людей к стволу может достигать 1 часа 16 минут, при расчете времени безопасного подхода к стволу принято, что люди не должны подвергаться критическому влиянию холодного воздуха более 1 минуты и умеренному – более 1 часа. В результате длительность безопасной эвакуации до ствола составила **14 часов 20 минут ( $M_1$ )** с начала реверсирования.

При расчете длительности безопасного ожидания вблизи ствола учитывается, что люди не должны подвергнуться умеренному влиянию холодного воздуха более 1 часа с момента подхода к стволу с учетом пребывания в зоне умеренного влияния по пути. В результате длительность безопасного ожидания составила **58 минут ( $M_2$ )**.

При определении времени безопасного подъема по стволу с начала реверсирования принято, что люди не должны подвергаться критическому влиянию холодного воздуха более 1 минуты, так как время подъема составляет 5,5 минут, а умеренное влияние холодного воздуха до 1 часа на данном участке считается безопасным. На рисунке 3 представлена схема и результаты моделирования, используемые при определении времени безопасного подъема по стволу.



**Рис. 3.** Схема и результаты моделирования определения времени безопасной эвакуации по стволу

Согласно схеме на рисунке 3, с начала реверсирования происходит смещение зоны критического влияния холодного воздуха на человека вглубь ствола. При этом возни-

кает момент, когда нахождение человека при подъеме в клетки в условиях критических температур превышает 1 минуту. По результатам расчетов данное время составило **4 минуты ( $M_3$ )**. По истечению данного времени подъем по стволу без применения мероприятий является опасным с точки зрения обморожения открытых частей тела и общего охлаждения организма человека.

### Выбор мероприятий

На основе расчёта времени эвакуации и оценки влияния холодного воздуха на человека выполняется выбор компенсирующих мероприятий [4], обеспечивающих безопасность людей на каждом из рассматриваемых этапов эвакуации. При этом выполняется анализ условий безопасности эвакуации для каждого этапа. Если условия не выполняются, то предлагается применение следующих мероприятий [12].

1. Утепление клетки – направлено на обеспечение безопасного подъема по стволу. Модернизация клетки заключается в герметизации дверей, установке систем подогрева внутреннего воздуха, обшивке корпуса теплоизоляционными материалами.

2. Организация камер временного пребывания (КВП) – служит для обеспечения безопасного ожидания. На горизонтах, по которым осуществляется эвакуация горнорабочих, вблизи вентиляционных стволов организуются камеры временного пребывания. В качестве камер могут использоваться поддерживаемые тупиковые выработки, либо автономные камеры-убежища. Камеры необходимо обеспечить системами подогрева воздуха для поддержания допустимого температурного режима, средствами индивидуальной защиты от пониженных температур, а также питьевой водой.

3. Применение вспомогательных калориферных установок (ВКУ) – обеспечение безопасного подхода к стволу за счет подогрева вентиляционной струи. Выбор данного мероприятия исключается необходимостью применения иных мероприятий.

Стоит отметить, что применение первого и второго мероприятия целесообразно, когда при реверсировании в холодное время обеспечивается безопасный подход к стволам на протяжении всего времени эвакуации. На рудниках с небольшой глубиной ведения работ холодный воздух может распространяться по горным выработкам на значительные расстояния, что может приводить к переохлаждению горнорабочих еще в процессе движения к запасным выходам.

При выборе мероприятий использован алгоритм условий применения, представленный в таблице 3. Полученные ранее результаты сопоставлены с представленной матрицей условий выбора мероприятий. В результате определены требуемые компенсирующие мероприятия для обеспечения безопасности эвакуации горнорабочих для исследуемого объекта (Таблица 4).

Таблица 3

Матрица выбора компенсирующих мероприятий

Мероприятия	Условие применения мероприятия
Утепление клетки	$M_3 < T_3$
КВП	$M_2 < T_2$
ВКУ	$M_1 < T_1$

Таблица 4

Обработка результатов с использованием матрицы в условиях данного рудника

Мероприятия	Фактическое время эвакуации (Т)	Расчетное время безопасной эвакуации (М)	Необходимость применения мероприятий
Утепление клетки	2:34	0:04	+
КВП	1:03	0:58	+
ВКУ	1:16	14:20	–

Исходя из результатов можно сделать вывод, что для рассматриваемого рудника рекомендуемыми и достаточными мероприятиями для обеспечения безопасности реверсирования в холодное время являются утепление крепи и организация камер временного пребывания вблизи вентиляционного ствола. В применении калориферного оборудования нет необходимости, так как условия ведения горных работ обеспечивают безопасный подход к вентиляционному стволу в течение 14 часов 20 минут.

### Заключение

Возникновение аварийной ситуации, требующей реверсирования вентиляционной струи, может привести к подаче холодного воздуха в рудник при условии отсутствия систем подогрева воздуха на вентиляционных стволах. Эвакуация людей по запасным выходам при этом сопровождается риском для здоровья и жизни за счёт влияния холодного воздуха. В связи с этим необходима разработка компенсирующих мероприятий, обеспечивающих безопасность эвакуации и ведения спасательных работ.

В статье рассмотрен подход к выбору компенсирующих мероприятий для обеспечения безопасной эвакуации горнорабочих, основанный на натурных замерах, теплофизическом моделировании и оценке влияния холодного воздуха на человека. Для выбора мероприятий разработана матрица условий применения, которая используется на практике при исследованиях подачи холодного воздуха при реверсировании на одном из рудников северной части Красноярского края. По результатам исследования для рассматриваемых условий рекомендуется применение таких мероприятий, как утепление клетки и организация камер временного пребывания вблизи вентиляционного ствола.

Таким образом, для более точного выбора мероприятий, обеспечивающих безопасность людей при эвакуации во время реверсирования в холодное время года, необходима оценка возможного влияния холодного воздуха на отдельных этапах эвакуации для каждого отдельного запасного выхода. Данный подход позволяет выбрать достаточный комплекс мероприятий и исключить излишние затраты при их реализации. Также стоит учитывать, что климатические, геологические и технические условия ведения горных работ и условия эвакуации на каждом руднике уникальны, поэтому для выбора компенсирующих мероприятий для новых объектов необходимы отдельные исследования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки рудников: автореф. дис. ... д.т.н. 25.00.20: защищена 29.04.10 / Левин Лев Юрьевич. – Пермь, 2010. – С. 24-32.

2. Кормщиков Д.С., Кузьминых Е.Г., Семин М.А. Безопасность реверсирования воздушного потока в вентиляционных стволах шахт в холодное время года при отсутствии подогрева // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 14-19. – DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-14-19.
3. Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г., Ольховский Д.В. Безопасность реверсирования воздушных потоков в шахтах и рудниках в холодное время года // Вестник государственной экспертизы. – 2022. – № 1. – С. 66-73.
4. Князев Н.А., Кормщиков Д.С. Повышение безопасности эвакуации горнорабочих через вентиляционные стволы во время реверсирования воздушной струи в холодное время года на глубоком руднике // Горное эхо. – 2022. – № 3 (88). – С. 74-80. – DOI: 10.7242/echo.2022.3.12.
5. Семин М.А., Князев Н.А., Кормщиков Д.С. Тепловые процессы в вентиляционном стволе глубокого рудника при реверсировании воздушной струи в холодное время года // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 1. – С. 112-123. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230111.
6. Колесов Е.В., Семин М.А., Казаков Б.П., Князев Н.А. Совершенствование метода расчета коэффициента теплоотдачи шахтного вентиляционного ствола по данным экспериментальных измерений в реверсивном режиме проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 3. – С. 57-71. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_57.
7. Левин Л.Ю., Семин М.А. Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 120-130. – DOI:10.15372/FTPRPI20190214.
8. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations // Journal of Mining Science. – 2014. – V. 50, № 2. – P. 371-378. – DOI: 10.1134/S1062739114020203.
9. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опублик. 20.02.2015. – 1 с.
10. РД 15-11-2007. Методические рекомендации о порядке составления планов ликвидации аварий при ведении работ в подземных условиях / Фед. служба по экологич., технологич. и атомному надзору. – М.: НТЦ «Пром. безопасность», 2007. – 57 с.
11. МР 2.2.7.2129-06. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях: утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 19.09.2006. – 20 с.
12. Кормщиков Д.С., Кузьминых Е.Г., Семин М.А. Безопасность реверсирования воздушного потока в вентиляционных стволах шахт в холодное время года при отсутствии подогрева // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 14-19. – DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-14-19.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.4.16

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ

С.В. Мальцев

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Анализ горно-геологической информации проектируемых и строящихся рудников для добычи полезных ископаемых указывает на необходимость обновления справочной литературы по рудничной вентиляции и подходов к решению вентиляционных задач. В связи с этим в настоящее время перспективным подходом к решению вентиляционных задач является использование методов численного моделирования. В данной работе представлено описание участков, требующих особого внимания при выборе параметров основного вентиляционного оборудования: шахтные стволы большого диаметра, сопряжения стволов с горизонтами и вентиляционными каналами, а также тупиковые выработки большого сечения.

**Ключевые слова:** шахтный ствол большого диаметра, тупиковые выработки большого сечения, математическая модель, CFD-моделирование, коэффициент аэродинамического сопротивления, диффузия.

## Введение

В последнее время для решения вентиляционных задач разной сложности особую актуальность приобрело численное моделирование движения потоков воздуха, что связано с выбором нестандартных геометрических параметров выработок и технологических решений по расположению оборудования. Кроме того, одной из основных причин использования моделирования являются увеличение глубины отработки запасов (до 2000 метров), протяженности сетей горных выработок рудников (более 300 км выработок) и количества главных вентиляторных установок (2-5 штук в одновременной работе). Разработка сетевых моделей вентиляционных сетей рудников не обходится без специального программного обеспечения: Аэросеть, Вентиляция 2.0, VentSim и другие. При этом более детализированный анализ отдельных участков горных выработок с существенно неоднородными по сечению потоками воздуха и примесей проводится не в рамках сетевых одномерных моделей, а с использованием двумерного и трехмерного CFD-моделирования. Для этого используются программные пакеты: Ansys Fluent, Ansys CFX, SolidWorks и другие. Для работы в данных программных пакетах требуются значительные вычислительные мощности, поэтому CFD-моделирование используется, как правило, для локальных участков сети горных выработок (сопряжение «ствол-канал», сопряжения горных выработок, шахтные стволы, тупиковые выработки), где необходимо детализированное исследование физических процессов.

Анализ горно-геологической информации проектируемых и строящихся рудников для добычи полезных ископаемых указывает на необходимость обновления справочной литературы по рудничной вентиляции и подходов к решению вентиляционных задач. Например, в литературных источниках [1-3] коэффициенты аэродинамического сопротивления шахтных стволов приведены в основном для диаметров 5-7 метров. При этом в настоящее время современные горнодобывающие предприятия строят шахтные стволы больших диаметров (в свету  $d=7-10$  м). Кроме того, особого внимания при проектировании новых рудников заслуживает определение геометрии каналов (ширина, высота), угла сопряжения каналов относительно стволов. Неправильное определение данных параметров приводит к выбору вентиляционного оборудования с ошибочными характеристиками.

Использование CFD-моделирования позволит исключить ошибки при проектировании режимов проветривания. Правильно подобранные типы крепления, расположение оборудования в стволах, угол наклона каналов позволят уменьшить капитальные затраты (на покупку вентиляционного оборудования, на строительство надшахтного здания) и эксплуатационные затраты (расход электроэнергии на проветривание) на весь срок отработки рудника.

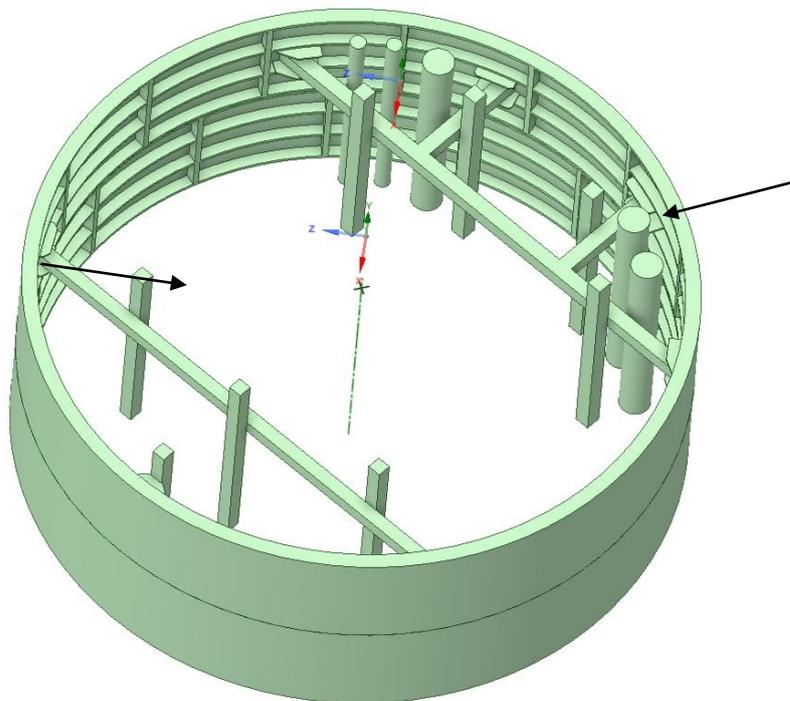
## Разработка математических моделей рудников

В работах [4-6] описаны способы и подходы к разработке сетевых моделей рудников и решения вышеизложенных задач. При этом в настоящее время для проектирования и эксплуатации рудников можно выделить участки вентиляционных сетей, требующие особого внимания при моделировании: шахтные стволы большого диаметра, сопряжения стволов с горизонтами и вентиляционными каналами, а также тупиковые выработки большого сечения.

Актуальность определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов обусловлена потерей основной части депрессии главной вентиляторной установки на них [7, 8]. Основными причинами потери давления при движении воздушного потока по стволу являются шероховатость поверхности ствола, различные препятствия на пути движения воздуха и большие объемы воздуха, поступающие в ствол.

В связи с отсутствием данных для проектирования стволов большого диаметра (более 7 метров) автором данной работы рекомендуется комплексно подходить к вопросу

выбора типа крепления, армирования, ходового отделения, расположения труб и кабелей. Для определения оптимального варианта применяются предварительные расчеты методами вычислительной гидрогазодинамики, на основе которых предварительно перед проектированием можно рассчитать различные комбинации типов крепления стволов, армировки и расположения оборудования. На рисунке 1 изображен пример трехмерной математической модели шахтного ствола с учетом тубинговой крепи, жесткой армировки и трубопровода.



**Рис. 1.** Участок расчетной области ствола с тубинговой крепью, армированием и расположением трубопровода

По результатам моделирования распределения воздушных потоков рассчитывается коэффициент аэродинамического сопротивления ствола для дальнейшего учета в сетевой модели при определении рабочей точки главной вентиляторной установки.

Второй исследуемой областью, требующей особого внимания, являются сопряжения стволов с калориферным и вентиляционным каналами, а также сопряжения стволов с горизонтами. Задача определения оптимальных геометрических параметров вентиляционных и калориферных каналов, их сопряжений со стволами по фактору минимальных суммарных аэродинамических сопротивлений должна осуществляться на стадии проектирования рудника. Для решения задачи необходимо построить топологию участка сопряжения горизонтальной выработки (горизонт, калориферный или вентиляционный канал) и ствола. Далее производится создание расчетной сетки и задание параметров для выполнения расчетов. При проведении моделирования производится корректировка углов сопряжения горизонтальной выработки со стволом (рис. 2).

Далее по результатам моделирования распределения воздушных потоков рассчитывается коэффициент местного аэродинамического сопротивления при повороте (расширении, сужении), для дальнейшей оптимизации геометрических параметров каналов и горизонтальных выработок (высоты, ширины, угла сопряжения со стволом, радиуса скругления на сопряжениях, угла раскрытия внешней или внутренней стенки диффузора), а также учета в сетевой модели при определении рабочей точки главной вентиляторной установки.

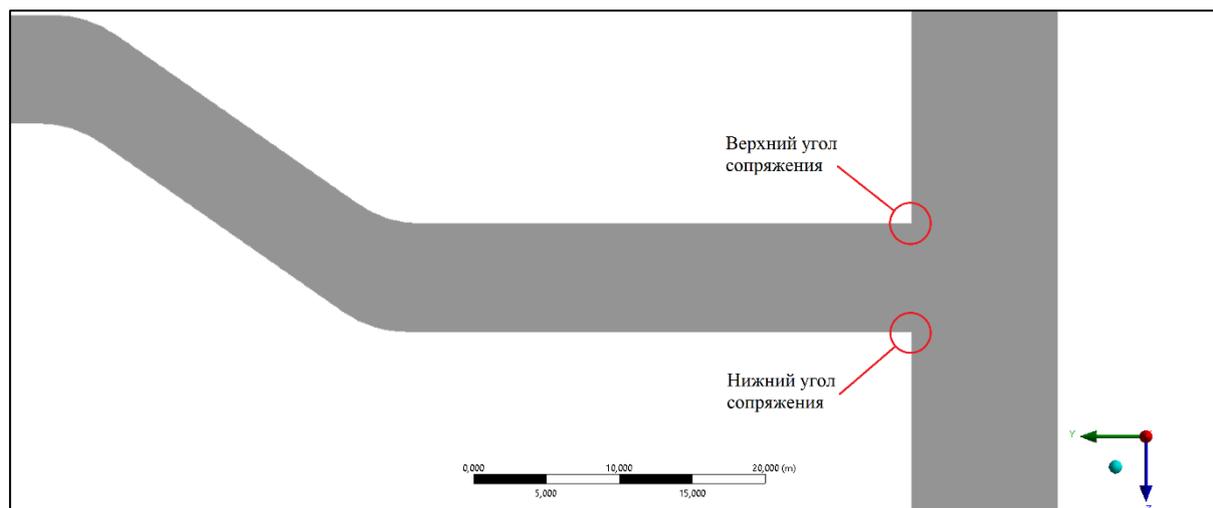


Рис. 2. Изображение сопряжения вентиляционного канала и участка ствола с изображением углов для оптимизации параметров

Третьей областью исследования, требующей особого внимания, являются тупиковые горные выработки большого сечения. Актуальность данной задачи обусловлена тем, что в соответствии с п. 160 ФНиП ПБ «Действующие горные выработки должны непрерывно проветриваться активной струей воздуха, за исключением тупиков длиной 10 метров, проветриваемых за счет диффузии». При этом в условиях действующих рудников в тупиковых выработках большого сечения протяженностью 60 м наблюдается устойчивое распределение потоков воздуха с интенсивным массообменом, обеспечивающим вынос газов от взрывных работ и от работы техники с двигателями внутреннего сгорания за приемлемое время. На рисунке 3 представлена добычная панель одной из шахт, на которой проветриваются протяженные тупиковые выработки большого сечения. Их проветривание осуществляется за счет вентиляторных установок эжекторного типа с камерой смешения без перемычки (ВУМП-6).

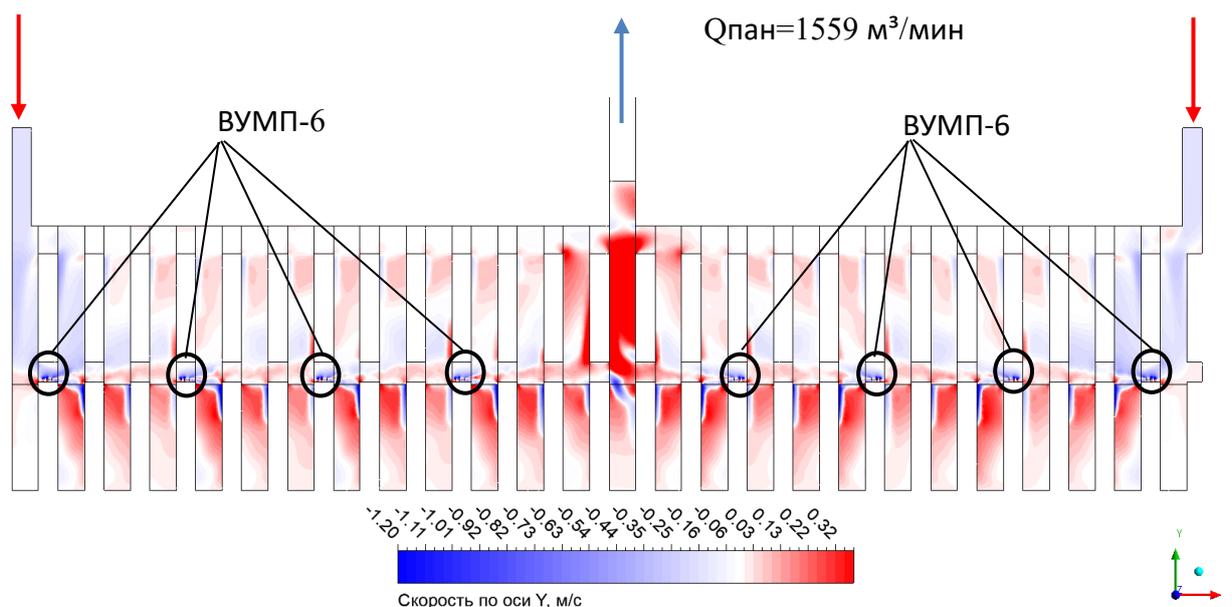


Рис. 3. Распределение скоростей воздуха в тупиковых выработках большого сечения ( $132 \text{ м}^2$ ) в пределах исследуемой панели

Анализируя распределения скоростей движения воздуха на рисунке 3, можно сделать вывод, что активный воздухообмен наблюдается во всех тупиковых выработках. По результатам численного моделирования [9] определена средняя скорость движения воздуха в тупиковых выработках панели, далее рассчитан расход воздуха. В первой камере после вентиляторной установки расход воздуха составляет 253 м<sup>3</sup>/мин, во второй – 145 м<sup>3</sup>/мин, в третьей – 118 м<sup>3</sup>/мин, в четвертой – 65 м<sup>3</sup>/мин. При этом расчетное значение составляет 109 м<sup>3</sup>/мин (по фактору буровзрывных работ). Таким образом, одной вентиляторной установки эжекторного типа с камерой смешения без перемычки достаточно, чтобы обеспечить проветривание трех тупиковых выработок сечением 132 м<sup>2</sup> с протяженностью 60 м по фактору «буровзрывных работ» расчета количества воздуха. В связи с этим дальнейшие исследования целесообразны с учетом распределения газов от взрывных работ и газов от двигателей внутреннего сгорания.

### Заключение

В данной работе представлены вопросы разработки CFD-моделей участков выработок, требующих особого внимания при проектировании подземных рудников и выборе вентиляционного оборудования. Разработка технических решений на основании численного моделирования позволит оптимизировать капитальные затраты при строительстве выработок и эксплуатационные затраты при разработке месторождений.

В дальнейшем планируется:

- разработка методики для определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов путем CFD-моделирования;
- разработка и составление справочного пособия коэффициентов аэродинамического сопротивления для стволов большого диаметра (7-10 м);
- определение оптимизационных решений для снижения сопротивления вентиляционных и калориферных каналов;
- моделирование динамики газов от взрывных работ и от двигателей внутреннего сгорания для определения эффективной длины тупиковой выработки при различных сечениях по фактору проветривания.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скочинский А.А., Ксенофонтова А.И., Харев А.А., Идельчик И.Е. Аэродинамическое сопротивление шахтных стволов и способы его снижения. – М.: Углетехиздат, 1953. – 364 с.
2. Аэродинамическое сопротивление горных выработок и тоннелей метрополитена / Ф.А. Абрамов, В.А. Долинский, И.Е. Идельчик и др. – М.: Недра, 1964. – 187 с.: ил.
3. McPherson M.J. The resistance to airflow of mine shafts // Proceedings of the Mine Ventilation Symposium 3<sup>rd</sup>, 12-14.10.1987. – Pennsylvania, 1987. – P. 465-477.
4. 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.
5. Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В., Семин М.А. Автоматизированная обработка данных воздушно-депресссионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников // Изв. вузов. Горн. журн. – 2016. – № 1. – С. 22-30.
6. Мальцев С., Исаевич А., Кормщиков Д. Современные способы разработки математических моделей вентиляционных сетей подземных рудников // Вестн. гос. экспертизы. – 2023. – № 1. – С. 34-42.
7. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра, 2007. – 324 с.: ил.
8. Мальцев С.В. Исследование и разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников: дис. ...к.т.н.; 25.00.20 / Мальцев Станислав Владимирович. – Пермь, 2019. – 148 с.
9. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Семин М.А. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 46-57. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57.

## **ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВОЙ КАЛОРИФЕРНОЙ ПРЯМОГО НАГРЕВА ДЛЯ УСЛОВИЙ КАЛИЙНОГО РУДНИКА**

Д.В. Ольховский, О.Д. Залазаев  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе приведены достоинства и недостатки применения газовых калориферов прямого нагрева воздуха. Выполнен анализ изменения газового состава воздуха, поступающего в горные выработки рудника, с учетом применения калориферов прямого нагрева. Представлено обоснование возможности применения технологии комбинированного нагрева воздуха для условий калийного рудника ВКМКС. Проведена оценка влияния изменения газового состава воздуха, используемого для проветривания рабочих зон, на факторы расчета количества воздуха.

**Ключевые слова:** воздухоподготовка, калорифер прямого нагрева, ядовитые газы, предельно допустимая концентрация, комбинированный нагрев, расчет количества воздуха.

### **Введение**

Предприятия горнодобывающего комплекса относятся к числу наиболее энергоёмких в промышленности в Российской Федерации [1]. При этом значительная часть (до 40%) затрат энергии приходится на подогрев атмосферного воздуха, подаваемого в подземные выработки рудников. Объем воздуха, используемого для проветривания рудников, с каждым годом увеличивается. В связи с этим снижение затрат на воздухоподготовку в современных экономических условиях является наиболее актуальным.

Для уменьшения эксплуатационных и капитальных затрат на нагрев воздуха целесообразно использовать газовые калориферные установки, которые характеризуются высоким коэффициентом полезного действия по сравнению с калориферами другого типа. Газовые калориферы отличаются способами нагревания воздуха и подразделяются на три типа: прямого нагрева, рекуперативные и термосифонные [2]. В случае применения газовых калориферов прямого нагрева возможно превышение предельно допустимых концентраций ядовитых газов в воздухе, который поступает в горные выработки рудника. Исходя из этого, при выборе газовых калориферов прямого нагрева существует необходимость в исследовании газового состава подготавливаемого воздуха и его влияния на факторы проветривания рабочих зон. Цель работы заключается в обосновании возможности безопасного применения прямого нагрева воздуха, подаваемого в подземные выработки калийного рудника.

### **Применение газовых калориферов прямого нагрева**

Рассмотрим подробнее способы нагревания воздуха газовыми калориферами. В первом случае атмосферный воздух нагревается за счет его смешивания с продуктами сгорания при открытом сжигании газа в воздушном потоке (калориферы прямого нагрева). Во второй функции всей системы генерации и транспортировки тепла (котельной, теплотрассы и калорифера) совмещены в едином блоке, а тепло передается с помощью термосифонных элементов (термосифонные калориферы). В третьем нагрев воздуха осуществляется в газоздушных теплообменниках через стальную теплообменную поверхность (рекуперативные калориферы), теплоносителем при этом являются продукты сгорания газа, которые выбрасываются за пределы воздухозабора рудника.

Достоинствами вышеперечисленных систем являются:

- исключение затрат на строительство котельной, теплотрасс, калориферов;
- низкие эксплуатационные затраты;
- быстрый выход на заданный тепловой режим;
- высокий КПД использования газа;
- минимальные потери тепла с уходящими продуктами сгорания;
- плавное, экономичное управление процессом воздухоподготовки в зависимости от времени суток и температуры окружающего воздуха;
- широкий диапазон регулирования каждого агрегата по тепловой производительности;
- возможность диспетчеризации;
- компактность и простота монтажа.

На данный момент на многих предприятиях широко используются и зарекомендовали себя калориферы рекуперативного типа и термосифонные [3, 4]. При этом калориферы прямого нагрева, в отличие от аналогов, практически не применяются в связи с присущими им недостатками. Принцип работы газовых калориферов прямого нагрева предусматривает нагрев воздуха за счет смешения его с продуктами горения [5]. В результате при сжигании углеводородного топлива (например, природный газ, мазут, дизельное топливо) выделяются различные ядовитые газы, такие как углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), угарный газ ( $\text{CO}$ ), окислы азота ( $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ) и диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), которые могут, во-первых, заместить собой необходимый для дыхания кислород и, во-вторых, привести к загрязнению воздуха, подаваемого для проветривания горных выработок, а также рабочих зон [6]. Необходимо отметить, что применение существующих средств контроля горения позволяют избежать превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) продуктов сгорания в подаваемом в рудник воздухе.

Таким образом, для успешной реализации проектов, предусматривающих использование газовых калориферов прямого нагрева, необходимо проводить дополнительные исследования аэрогазодинамических процессов в части изучения газового состава после прямого нагрева в системах воздухоподготовки такого типа. Результаты исследования должны включать обоснование технологии применения газовых калориферов, направленное на обеспечение безопасных условий труда в руднике.

### **Газовый состав подогреваемого воздуха при прямом нагреве воздуха**

В целях исследования возможности применения газовых калориферных установок прямого нагрева для условий одного из калийных рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) первоначально выполнено изучение газового состава воздуха, проходящего через калориферы прямого нагрева.

Для определения концентраций ядовитых веществ в воздухе необходимо знать объём их выделения и объём воздуха, в котором они будут растворены. Объём выделения всех компонентов прежде всего зависит от массы сжигаемого топлива, то есть от мощности установки, а также от химического состава топлива, температуры горения, коэффициента избытка воздуха.

Основные параметры, необходимые для расчета объема выделения ядовитых газов при работе калориферов прямого нагрева, взяты из проектной документации для исследуемого участка ВКМКС и приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для определения объема выбросов загрязняющих веществ газовой калориферной прямого нагрева

Параметр	Значение
Номинальная мощность секции газового калорифера прямого нагрева	3,2 МВт
Номинальный расход газа секции газового калорифера прямого нагрева	0,0944 м <sup>3</sup> /с
Расход воздуха через секцию газового калорифера	58,3 м <sup>3</sup> /с
Низшая теплота сгорания природного газа	33,94 МДж/кг
Количество (секций) калориферов прямого нагрева	4 шт.
Суммарный расход воздуха через калориферную	520 м <sup>3</sup> /с
Химический состав природного газа подаваемого на калориферную	
Метан	98,68 %
Этан	0,31 %
Пропан	0,1 %
Изобутан	0,02 %
Пропан-бутан	0,03 %
Азот	0,8 %
Двуокись углерода	0,06 %
Сероводород	0,001 г/м <sup>3</sup>
Меркаптановая сера	0,0082 г/м <sup>3</sup>
Фоновые концентрации ядовитых газов в атмосферном воздухе	
Диоксид серы, SO <sub>2</sub>	0,034 мг/м <sup>3</sup>
Оксид углерода, CO	1,3 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид углерода, CO <sub>2</sub>	0,1 % / 1826 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид азота, NO <sub>2</sub>	0,045 мг/м <sup>3</sup>
Оксид азота, NO	0,018 мг/м <sup>3</sup>

Для определения типа применяемых калориферов и их количества необходимо определить концентрации ядовитых газов после калориферов прямого нагрева. Для этого был выполнен расчет по методике [7].

#### Расчет выбросов окиси углерода

Количество окиси углерода  $M_{CO}$ , г/с выделяющегося при сжигании газа в калорифере прямого нагрева, вычисляется по формуле:

$$M_{CO} = 0,001 \cdot B \cdot Q_H^P \cdot K_{CO} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \text{ г/с} \quad (1)$$

где  $B$  – расход топлива, 94,4 л/с;  $Q_H^P$  – низшая теплотворная способность топлива, 33,94 МДж/м<sup>3</sup>;  $K_{CO}$  – количество окислов углерода образующихся на 1 ГДж, 0,25 кг/ГДж;  $q_4$  – коэффициент, учитывающий неполноту сгорания, для газа равен – 0,5%.

#### Расчет выбросов окислов азота

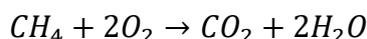
Количество окислов азота  $M_{NO_2}$ , г/с в пересчете на  $NO_2$  выделяющихся при сжигании газа в калорифере прямого нагрева вычисляется по формуле:

$$M_{NO_2} = 0,001 \cdot B \cdot Q_H^P \cdot K_{NO_2} \cdot (1 - \beta), \text{ г/с} \quad (2)$$

где  $B$  – расход топлива, 94,4 л/с;  $Q_H^P$  – низшая теплотворная способность топлива, 33,94 МДж/м<sup>3</sup>;  $K_{NO_2}$  – количество окислов азота образующихся на 1 ГДж, для газового калорифера мощностью 3200 кВт равно 0,093 кг/ГДж;  $\beta$  – коэффициент учитывающий степень снижения выбросов окислов азота в результате применения технических решений.

#### Расчет выбросов диоксида углерода

Основным горючим компонентом природного газа является метан  $CH_4$  (98,68%). Объем прочих горючих газов является незначительным, поэтому для определения объемной концентрации диоксида углерода в воздухе после калорифера прямого нагрева можно определить, исходя из формулы окисления метана:



Массовая концентрация диоксида углерода, г/с выделяющихся при сжигании природного газа в калориферной прямого нагрева вычисляется по формуле:

$$M_{CO_2} = B \cdot K_1 \cdot TH_3 \cdot K_2 \cdot \frac{44}{12} \text{ г/с} \quad (3)$$

где  $B$  – расход топлива, 0,0944 м<sup>3</sup>/с;  $K_1$  – коэффициент окисления углерода в топливе, для природного газа равен 0,995;  $TH_3$  – теплотворное нетто-значение, для природного газа равен 34,78 Дж/тонн;  $K_2$  – коэффициент выбросов углерода, для природного газа равен 15,04 тонн/Дж; 44/12 – коэффициент пересчета углерода в углекислый газ (молекулярные веса соответственно: углерод – 12 г/моль,  $O_2 = 2 \times 16 = 32$  г/моль,  $CO_2 = 44$  г/моль).

#### Расчет выбросов диоксида серы

Согласно паспорту качества газа, основными источниками диоксида серы являются сероводород и меркаптановая сера. Для определения количества выделяющегося диоксида серы при сжигании сероводорода применяется формула:

$$M_{SO_2} = B \cdot C_{H_2S} \cdot \frac{64}{34}, \text{ мг/с} \quad (4)$$

где  $B$  – расход топлива, 0,0944 м<sup>3</sup>/с;  $C_i$  – массовая концентрация сероводорода в топливе 0,001 г/м<sup>3</sup>; 64/34 – коэффициент пересчета сероводорода в диоксид серы (молекулярные веса соответственно: сероводород – 34 г/моль,  $SO_2 = 64$  г/моль).

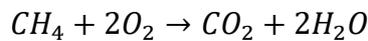
Для определения количества выделяющегося диоксида серы при сжигании меркаптановой серы применяется формула:

$$M_{SO_2} = B \cdot C_{CH_4S} \cdot \frac{64}{48}, \text{ г/с} \quad (5)$$

где  $C_i$  – массовая концентрация меркаптановой серы  $0,0082 \text{ г/м}^3$ ;  $64/48$  – коэффициент пересчета меркаптановой серы в диоксид серы (молекулярные веса соответственно: меркаптановая сера –  $48 \text{ г/моль}$ ,  $SO_2 = 64 \text{ г/моль}$ ).

### Расчет потребления кислорода

Основным горючим компонентом природного газа является метан  $CH_4$  (98,68%). Объем прочих горючих газов является незначительным, поэтому для определения снижения уровня кислорода в воздухе после калорифера прямого нагрева в результате смешения с продуктами сгорания можно определить исходя из формулы окисления метана:



В результаты проведенных расчетов полученные концентрации ядовитых газов в воздухе, подаваемом в рудник, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, подаваемом в рудник

Компонент	Концентрация компонента	ПДК
Оксид углерода (CO)	14,97 мг/м <sup>3</sup>	20 мг/м <sup>3</sup>
Оксиды азота (NO <sub>x</sub> )	5,16 мг/м <sup>3</sup>	5 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )	4890 мг/м <sup>3</sup>	9000 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	0,055 мг/м <sup>3</sup>	10 мг/м <sup>3</sup>
Кислород (O <sub>2</sub> )	20,54 %	20,0 %

Согласно полученным результатам расчета, при использовании для воздухоподготовки только калориферов прямого нагрева возможно превышение ПДК по окислам азота (NO<sub>x</sub>). Необходимо отметить, что используемая методика расчета не учитывает некоторые факторы, например температуру горения, которая напрямую влияет на объем выделения окислов азота. В связи с этим для определения фактических концентраций газов рекомендовано проводить опытные испытания планируемых к применению газовых калориферов.

Таким образом, с учетом представленных выше результатов расчета концентраций ядовитых газов и отсутствия фактических измерений выбросов после прямого нагрева воздуха дальнейшая проработка проекта осуществлялась только с учетом применения технологии комбинированного нагрева воздуха. Под технологией комбинированного нагрева воздуха понимается совместное применение калориферов прямого нагрева и рекуперативных газовых калориферов.

### Обоснование возможности применения технологии комбинированного нагрева воздуха для калийного рудника ВКМКС

Согласно результатам расчета концентраций ядовитых газов в воздухе после калориферов прямого нагрева, применение только технологии прямого нагрева воздуха для

рассмотренных условий без проведения промышленных испытаний калориферов является недопустимым. При этом применение комбинированной калориферной установки, в которой будут использованы как калориферы прямого нагрева, так и рекуперативные теплообменники позволит исключить риск подачи в выработки воздуха, содержание газов в котором будет превышать ПДК.

Для определения количества газовых рекуперативных калориферов и калориферов прямого нагрева необходимо знать предельно допустимые концентрации по каждому компоненту ядовитых газов, концентрации ядовитых газов в воздухе после калорифера прямого нагрева, расходы воздуха на калориферах и требуемый расход воздуха для проветривания рабочих зон рудника. Исходные параметры приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры воздуха до и после калориферов,  
необходимые для определения количества калориферов

Компонент	Атмосферный воздух*	Калорифер		ПДК
		Рекуперативный	Прямого нагрева	
Оксид углерода (CO)	1,3 мг/м <sup>3</sup>	1,3 мг/м <sup>3</sup>	14,97 мг/м <sup>3</sup>	20 мг/м <sup>3</sup>
Окислы азота (NO <sub>x</sub> )	0,045 мг/м <sup>3</sup>	0,045 мг/м <sup>3</sup>	5,16 мг/м <sup>3</sup>	5 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )	0,1 %	0,1 %	0,262 %	0,5 %
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	0,034 мг/м <sup>3</sup>	0,034 мг/м <sup>3</sup>	0,055 мг/м <sup>3</sup>	10 мг/м <sup>3</sup>
Кислород (O <sub>2</sub> )	20,9 %	20,9 %	20,54 %	20,0 %
Расход воздуха	520 м <sup>3</sup> /с (для рудника)	18,3 м <sup>3</sup> /с	58,3 м <sup>3</sup> /с	-

\* – химический состав атмосферного воздуха взят на основе данных ФГБУ «Пермский ЦГМС»;

Для определения максимального объема воздуха, который возможно нагревать в газовых калориферах прямого нагрева, можно воспользоваться формулой, полученной из условия разбавления газа после калориферной установки прямого нагрева атмосферным воздухом с содержащейся фоновой концентрацией газов до состояния газовой смеси в пределах ПДК:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{руд}} \cdot (C_{\text{пдк}}^{\text{NO}} - C_{\text{фон}}^{\text{NO}})}{(C_{\text{пр}}^{\text{NO}} - C_{\text{фон}}^{\text{NO}})}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (6)$$

где  $Q_{\text{пр}}$  – максимально возможный расход воздуха, который можно обеспечить с помощью калориферов прямого нагрева, м<sup>3</sup>/с;  $C_{\text{фон}}^{\text{NO}}$  – фоновая концентрация окислов азота в атмосфере, 0,045 мг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{пр}}^{\text{NO}}$  – концентрация окислов азота в воздухе после нагрева в калорифере прямого нагрева, 5,16 мг/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{руд}}$  – требуемый расход воздуха в руднике, 520 м<sup>3</sup>/с;  $C_{\text{пдк}}^{\text{NO}}$  – предельно допустимая концентрация окислов азота в рудничном воздухе, 5 мг/м<sup>3</sup>.

Подставляя значения в уравнение (6) получаем, что максимально допустимый объем воздуха, который можно нагреть с помощью калориферов прямого нагрева, составляет

503 м<sup>3</sup>/с. Таким образом, учитывая что максимальное количество воздуха, которое возможно нагреть в одной секции калорифера прямого нагрева, составляет 58,3 м<sup>3</sup>/с, максимальное количество калориферов прямого нагрева составит 8 шт. и они будут способны нагреть 466,4 м<sup>3</sup>/с, остальной объем воздуха необходимо нагревать с помощью рекуперативных газовых калориферов (3 шт.). При этом требуемая тепловая мощность для нагрева 520 м<sup>3</sup>/с составляет 28,8 МВт.

Таким образом, принимая во внимание результаты расчета максимально возможного количества калориферов прямого нагрева, используемых для воздухоподготовки, а также результаты проектных решений, ниже для определения концентраций ядовитых веществ в воздухе, поступающем в рудник после нагрева в комбинированной газовой калориферной, рассматривается два варианта:

- вариант 1 – предлагаемый (8 калориферов прямого нагрева и 3 рекуперативных);
- вариант 2 – проектный (4 калорифера прямого нагрева и 16 рекуперативных).

Расчет концентраций ядовитых газов, поступающих на проветривание в рудник, при комбинированной системе нагрева воздуха определяется по формуле:

$$C_{\text{руд}} = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot C_{\text{пр}} + Q_{\text{р}} \cdot C_{\text{р}}}{Q_{\text{руд}}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (7)$$

где  $Q_{\text{пр}}$  – расход воздуха на всех калориферах прямого нагрева, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{р}}$  – расход воздуха на всех рекуперативных калориферах, м<sup>3</sup>/с;  $C_{\text{р}}$  – фоновая концентрация ядовитых газов в атмосфере, мг/м<sup>3</sup>.

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, поступающем на проветривание в подземные выработки рудника, сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, поступающем на проветривание в подземные выработки рудника

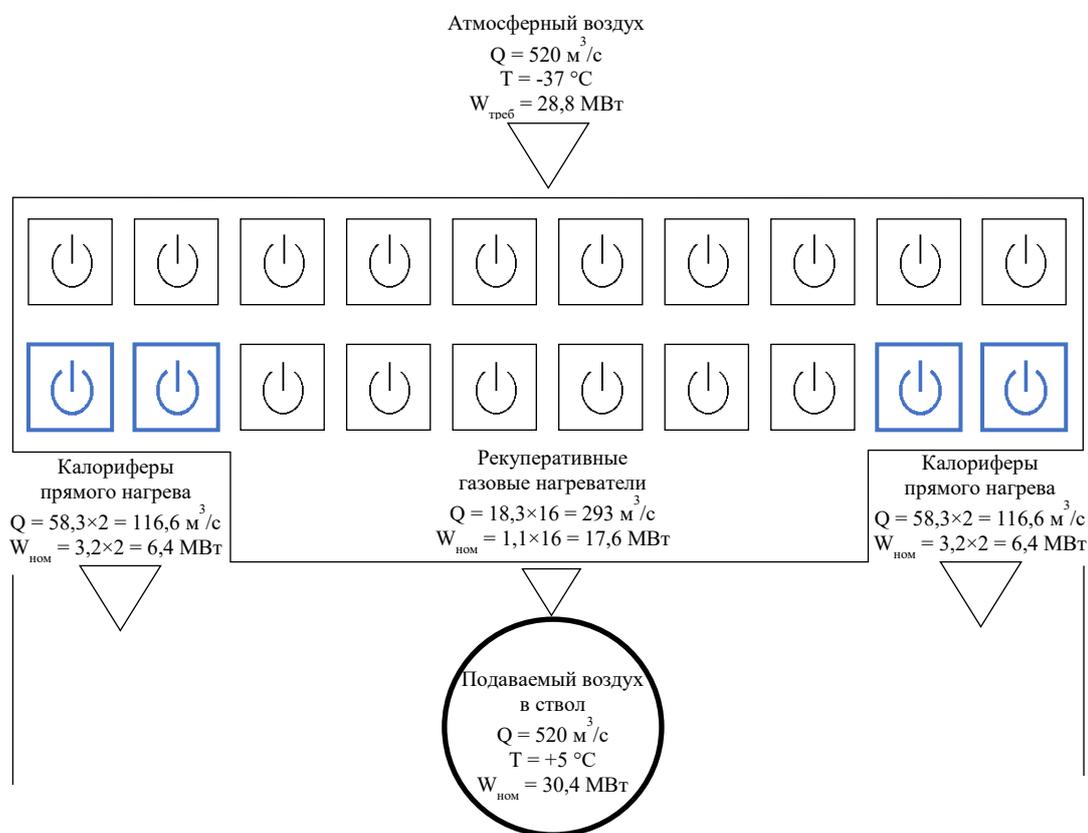
Компонент	Концентрация в воздухе, поступающего в рудник	ПДК
Вариант 1 (8 калориферов прямого нагрева и 3 рекуперативных)		
Оксид углерода (CO)	13,56 мг/м <sup>3</sup>	20 мг/м <sup>3</sup>
Окислы азота (NO <sub>x</sub> )	4,63 мг/м <sup>3</sup>	5 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )	0,245 %	0,5 %
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	0,052 мг/м <sup>3</sup>	10 мг/м <sup>3</sup>
Кислород (O <sub>2</sub> )	20,57 %	20,0 %
Вариант 2 (4 калорифера прямого нагрева и 16 рекуперативных)		
Оксид углерода (CO)	7,4 мг/м <sup>3</sup>	20 мг/м <sup>3</sup>
Окислы азота (NO <sub>x</sub> )	2,31 мг/м <sup>3</sup>	5 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )	0,172 %	0,5 %
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	0,043 мг/м <sup>3</sup>	10 мг/м <sup>3</sup>
Кислород (O <sub>2</sub> )	20,74 %	20,0 %

Согласно результатам расчета, реализация как варианта 1, так и варианта 2 позволяет обеспечить подачу в рудник воздуха с содержанием ядовитых газов меньше значений ПДК. Однако следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют достовер-

ные данные о количестве доокисляемого монооксида азота в условиях рудника, поэтому при движении воздуха по подземным выработкам существует риск перехода монооксида азота ( $\text{NO}$ ) в диоксид азота ( $\text{NO}_2$ ) [8]. В результате при определенных условиях может наблюдаться превышение ПДК по диоксиду азота ( $2 \text{ мг/м}^3$ ) [9]. На основе многолетних наблюдений можно ожидать, что при прохождении воздуха по выработкам около 10-30% монооксида азота перейдет в диоксид азота, следовательно для исключения риска превышения ПДК по диоксиду азота рекомендуется использовать только вариант 2 – проектные решения.

В результате при минимальной расчетной температуре наружного воздуха  $-37^\circ\text{C}$  и расходе воздуха  $520 \text{ м}^3/\text{с}$  суммарная тепловая мощность калориферов для первого варианта составит 28,9 МВт, а для второго варианта – 30,4 МВт. Однако, как было отмечено, при использовании первого варианта имеется риск превышения ПДК по оксидам азота, в связи с этим выбран второй вариант, где схема менее экономична, но более безопасна.

Технологическая схема работы калориферных установок при комбинированной технологии воздухоподготовки представлена на рисунке 1.



**Рис. 1.** Технологическая схема работы калориферов при комбинированной системе нагрева воздуха и нормальном режиме проветривания, и температуре атмосферного воздуха  $-37^\circ\text{C}$

### Рекомендации по расчету требуемого количества воздуха для рудника

Учитывая изменение газового состава воздуха, поступающего на проветривание подземных выработок, требовалось выполнить анализ его влияния на факторы проветривания рабочих зон рудника. Расчет количества воздуха (РКВ) выполнялся по методике, разработанной на калийном руднике ВКМКС. РКВ, где необходимо учитывать концентрации ядовитых газов, выделяющихся при работе газовых калориферов прямого нагрева, ведется для следующих случаев:

- 1) при определении расхода воздуха по фактору «газы от взрывных работ»;
- 2) при определении расхода воздуха по фактору «газы от машин с ДВС».

Для определения расхода воздуха по фактору «газы от взрывных работ» применяется:

$$Q_3 = \left[ k_1 \cdot \left( \lg \frac{C}{C_0} \right) + k_2 \right] \cdot \frac{V}{t}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (8)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий характер выноса примеси;  $\lg$  – десятичный логарифм выражения;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий тип выработки;  $C_0$  – допустимая концентрация соответствующих газов, %;  $C$  – ожидаемая начальная концентрация соответствующих газов, %;  $t$  – расчетное время проветривания, мин;  $V$  – проветриваемый объем,  $\text{м}^3$ .

Данная формула не учитывает фоновые концентрации соответствующих компонентов. Для их учета необходимо скорректировать формулу следующим образом:

$$Q_3 = \left[ k_1 \cdot \left( \lg \frac{C + C_{\text{фон}}}{C_0 + C_{\text{фон}}} \right) + k_2 \right] \cdot \frac{V}{t}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (9)$$

где  $C_{\text{фон}}$  – фоновая концентрация соответствующих газов (после калориферов), %.

Для определения расхода воздуха по фактору «газы от машин с ДВС» применяется:

$$Q_{\text{ДВС}} = \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{доп}}} \cdot g_{\text{вых}}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (10)$$

где  $C_{\text{вых}}$  – концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на  $\text{NO}_2$ ), % по объему;  $C_{\text{доп}}$  – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему;  $g_{\text{вых}}$  – количество выхлопных газов после очистки,  $\text{м}^3/\text{мин}$ .

В данной формуле (10) также не учитываются фоновые концентрации ядовитых компонентов в воздухе, поэтому для их учета необходимо скорректировать формулу:

$$Q_{\text{ДВС}} = \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{доп}} + C_{\text{фон}}} \cdot g_{\text{вых}}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (11)$$

где  $C_{\text{фон}}$  – фоновая концентрация соответствующих газов (после калориферов), %.

Кроме корректировки выше представленных формул в качестве исходных данных для РКВ в методику необходимо добавить таблицу с рассчитанными фоновыми концентрациями ядовитых газов, поступающих в рудник. После запуска калориферной установки следует провести экспериментальные замеры и скорректировать фоновые концентрации с учетом проведенных испытаний.

### Выводы

Проведенные расчеты концентрации ядовитых газов после калориферов прямого нагрева показали, что при использовании для воздухоподготовки только калориферов прямого нагрева для рассматриваемых условий ВКМКС возможно превышение ПДК по оксидам азота ( $\text{NO}_x$ ). Исходя из этого предложена комбинированная схема нагрева воздуха, которая предусматривает применение как газовых калориферов прямого нагрева, так и рекуперативных, с целью снижения концентрации ядовитых газов в воздухе, поступающем в горные выработки рудника.

Для определения концентраций ядовитых веществ в воздухе, поступающем в рудник после нагрева в комбинированной газовой калориферной, было рассмотрено два варианта:

- вариант 1 – предлагаемый (8 калориферов прямого нагрева и 3 рекуперативных);
- вариант 2 – проектный (4 калорифера прямого нагрева и 16 рекуперативных).

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, поступающем на проветривание в подземные выработки рудника, сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, поступающем на проветривание в подземные выработки рудника

Компонент	Концентрация в воздухе, поступающем в рудник	ПДК
Вариант 1 (8 калориферов прямого нагрева и 3 рекуперативных)		
Оксид углерода (CO)	13,56 мг/м <sup>3</sup>	20 мг/м <sup>3</sup>
Окислы азота (NO <sub>x</sub> )	4,63 мг/м <sup>3</sup>	5 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )	0,245 %	0,5 %
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	0,052 мг/м <sup>3</sup>	10 мг/м <sup>3</sup>
Кислород (O <sub>2</sub> )	20,57 %	20,0 %
Вариант 2 (4 калорифера прямого нагрева и 16 рекуперативных)		
Оксид углерода (CO)	7,4 мг/м <sup>3</sup>	20 мг/м <sup>3</sup>
Окислы азота (NO <sub>x</sub> )	2,31 мг/м <sup>3</sup>	5 мг/м <sup>3</sup>
Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> )	0,172 %	0,5 %
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	0,043 мг/м <sup>3</sup>	10 мг/м <sup>3</sup>
Кислород (O <sub>2</sub> )	20,74 %	20,0 %

Согласно результатам расчета, как реализация варианта 1, так и реализация варианта 2 позволяет обеспечить подачу в рудник воздуха с содержанием ядовитых газов меньше значений ПДК. Однако следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют достоверные данные о количестве доокисляемого монооксида азота в условиях рудника, поэтому при движении воздуха по подземным выработкам существует риск перехода монооксида азота (NO) в диоксид азота (NO<sub>2</sub>). В результате при определенных условиях может наблюдаться превышение ПДК по диоксиду азота (2 мг/м<sup>3</sup>). На основе многолетних наблюдений можно ожидать, что при прохождении воздуха по выработкам около 10-30% монооксида азота перейдет в диоксид азота, следовательно для исключения риска превышения ПДК по диоксиду азота рекомендуется использовать только вариант 2 – проектные решения.

На основании проведенного анализа методики расчета требуемого количества воздуха (РКВ) для учета влияния газовой калориферной на состав рудничного воздуха предложены модификации в расчетные формулы по определению расхода воздуха по фактору «газы от взрывных работ» и по фактору «газы от машин с ДВС». Внесенные изменения позволяют учесть фоновые концентрации ядовитых газов, образующихся в результате работы газовой калориферной прямого нагрева.

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

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки рудников: дис. ... д.т.н.: 25.00.20: защищена 29.04.10 / Левин Лев Юрьевич. – Пермь, 2010. – 275 с.
2. Левин Л.Ю., Казаков Б.П. Использование газовых теплогенераторов в системах обогрева воздухоподающих стволов калийных рудников // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2008. – № 10. – С. 55-59.
3. Левин Л.Ю., Ключин Ю.А. Исследование и пути решения характерных проблем работы вентиляторных систем воздухоподготовки на примере главной системы воздухоподготовки рудника «Мир». // Вестник ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 3. – С. 138-142.
4. Рязанов В.И., Щелоков А.В. Сравнительная характеристика газовых воздухонагревателей смешительного типа // Молодежь и XXI век – 2018: Материалы VIII Междунар. молодежной науч. конф. – 2018. – Т. 5. – С. 231-234.
5. Бородавкин Д.А., Зайцев А.В. Анализ эффективности применения газовых калориферов прямого нагрева в условиях шахт и рудников // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 95-99. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.19.
6. Величковский В.Т., Маликов Ю. К., Троицкая Н.А., Беленькая М.А., Сергеева Н.В., Широкова О.В., Кашанский С.В., Слышкина Т.В., Симонова О.В., Зыкова В.А. Гигиеническая оценка использования прямого подогрева воздуха, подаваемого в шахту // Гигиена и санитария – 2011. – № 4. – С. 41-45.
7. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч: утв. Госкомитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 5.08.1985 г. – М., 1985. – 24 с.
8. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час: утв. Госкомитетом РФ по охране окруж. среды 9.07.1999 г. – М., 1999. – 76 с.
9. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. гл. сан. врачом РФ 28.01.2021; зарегистрированы в Минюсте РФ 29.01.2021, № 62296. – С. 1025.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2023.4.18

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ИЛИ ЕГО РАЗМОРАЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ МНГОВАРИАНТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Пугин, А.В. Богомялков, К.М. Агеева  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Разработка основных технических решений для проекта на искусственное замораживание и размораживание горных пород при строительстве шахтных стволов предусматривает расчеты для определения рационального режима работы замораживающего комплекса. Данная задача неразрывно связана с определением требуемой холодопроизводительности замораживающей станции и напрямую влияет на выбор холодильного (нагревательного) оборудования. В статье описывается подход к решению указанных задач, основанный на многовариантном численном математическом моделировании процессов тепломассопереноса в искусственно замораживаемом или размораживаемом массиве горных пород. Теплофизическое моделирование производится в программном комплексе «FrozenWall». Предлагаемый подход позволяет в разумные сроки определить параметры режима работы холодильного оборудования или нагревательного оборудования, наилучшего с точки зрения достижения целей всего комплекса строительных работ с минимизацией затрат.

**Ключевые слова:** искусственное замораживание, размораживание, ледопородное ограждение, проектирование, многовариантное моделирование, рациональный режим.

Разработка технических решений для проекта на замораживание и последующее размораживание горных пород все больше требует применения современных методов теплофизического моделирования и численных математических расчетов. Одной из

важнейших задач проектирования является выбор рационального режима работы замораживающего комплекса.

Данная статья описывает методику выбора режима, обеспечивающего максимальную энергоэффективность применяемой технологической схемы в комплексе с остальными видами строительных работ и корректное определение параметров холодильного (нагревательного) оборудования [1, 2]. Под рациональным здесь понимается режим, позволяющий в течение заданного временного периода достичь требуемых для безопасной проходки параметров ЛПО при наименьших энергозатратах на работу замораживающего комплекса.

Согласно [3] холодопроизводительность замораживающей станции следует вычислять по формуле:

$$Q_n = S\alpha_n, \quad (1)$$

где  $S$  – общая площадь внешних поверхностей замораживающих колонок,  $m^2$ ;  $\alpha_n$  – коэффициент тепловосприятости от грунтов к наружной поверхности замораживающей колонки,  $ккал/(m^2 \cdot ч)$ . При этом коэффициент  $\alpha_n$  определяется эмпирически и имеет нестационарный характер. Составителями документа приводятся его справочные величины, которые следует применять в расчете на заданную (минимальную) температуру хладоносителя.

На самом деле данная формула отражает не столько требуемую холодопроизводительность замораживающей станции, сколько теплопоглощающую способность самих замораживающих колонок, то есть их способность отводить тепло от массива при замораживании или передавать его породе при нагревании. Данная формула в развернутом виде присутствует и в инструкции [4]:

$$W_{зк} = \frac{\pi d H n k}{860}, \text{ кВт}; \quad (2)$$

где  $d$  – внешний диаметр трубы замораживающей колонки,  $m$ ;  $H$  – рабочая длина трубы замораживающей колонки,  $m$ ;  $n$  – количество замораживающих колонок;  $k = \alpha_n$ ; но ее значение не является решающим, а сопоставляется со значением холодильной мощности, рассчитанной из количества теплоты, которое необходимо отвести от пород в процессе замораживания исходя из их теплофизических и влажностных характеристик.

Например, расчетная величина теплопоглощающей способности 36 замораживающих колонок с внешним диаметром 0,146  $m$  и глубиной 200  $m$  при минимальной температуре хладоносителя  $-30^\circ C$  (при  $k = 400$   $ккал/(m^2 \cdot ч)$ ) составит:

$$W_{зк} = \frac{3,14 \cdot 0,146 \cdot 200 \cdot 36 \cdot 375}{860} = 1439 \text{ кВт}. \quad (3)$$

Допустим количество теплоты, которое требуется отвести из массива горных пород для формирования ледопородного ограждения (ЛПО) с учетом издержек на охлаждение массива за его пределами составляет 7 000 000 МДж. Тогда средняя холодопроизводительность замораживающей станции, необходимая для формирования ЛПО в четырехмесячный срок (120 суток) составит:

$$W_{зам} = \frac{0,0116 \cdot 7\,000\,000}{120} = 677 \text{ кВт}. \quad (4)$$

Максимальная же, или так называемая, пиковая холодопроизводительность будет зависеть от выбранного режима работы замораживающего комплекса, но не превысит величину  $W_{ЗК}$ , которая ограничивает возможности системы замораживания.

Закладываемая в проект в качестве требуемой холодопроизводительности величина  $W_{ЗК} = 1439$  кВт впоследствии с большой вероятностью окажется избыточной. Подобранный под данный параметр холодильное оборудование на этапе поддержания ЛПО будет работать непродуктивно либо частично простаивать, увеличивая затраты на величину аренды и обслуживания. Формирование ЛПО при этом произойдет в более короткие сроки, суммарные энергозатраты будут высокими, а подготовка к проходке еще не будет завершена.

Величины  $W_{зам} = 677$  кВт может оказаться недостаточно в период пиковых нагрузок, что увеличит сроки формирования ЛПО и приведет к невыполнению плана производства работ. Упрощенный подход, использующий простые аналитические формулы и интегральные оценки, ограничивает возможности дальнейшей рационализации режима.

Ранее в работах [5, 6] описывался программный комплекс «FrozenWall» [7], позволяющий выполнять детальное численное моделирование процессов теплопереноса при искусственном замораживании горных пород. Разработанное программное обеспечение рассматривалось в аспекте термометрического контроля формирования и состояния ЛПО на участке строительства вертикального шахтного ствола.

Возможности программы позволяют использовать ее на этапе разработки основных технических решений для проекта на замораживание горных пород, в том числе для выбора режима работы замораживающего комплекса. Начальная теплофизическая модель, созданная на основе геологических сведений и параметризованная по данным лабораторных испытаний горных пород с участка строительства ствола, позволяет выполнить многовариантное численное моделирование теплораспределения в замораживаемом массиве с оценкой динамики формирования ЛПО.

Встроенный модуль «С/Н-Power» позволяет при заданном графике изменения температур прямого потока и расхода хладоносителя в рассольной сети вычислить суммарное количество теплоты, отобранное замораживающими колонками из массива за единицу времени, на заданный момент времени с начала замораживания, т.е. величину, эквивалентную холодильной мощности «нетто»  $W_{netto}$ . В данном случае «нетто» означает, что эта величина не учитывает теплопритоки в рассольную сеть от работающего насосного оборудования, внешней среды и другие возможные потери мощности холодильного оборудования.

Режим работы замораживающей станции определяется начальной  $T_0$  и минимальной (рабочей)  $T_{min}$  температурой, функцией  $T = T(\tau)$  изменения температуры прямого потока хладоносителя со временем  $\tau$  и его расходом  $q$ . Данные параметры являются входными для решения задачи выбора режима. При проектировании понижение температуры хладоносителя чаще всего задается функцией  $T(\tau)$  вида:

$$T(\tau) = \begin{cases} T_0 + \Delta T \tau, & \text{при } 0 < \tau < \tau_1 \\ T_{min}, & \text{при } \tau_1 \leq \tau < \tau_2 \end{cases} \quad (5)$$

вследствие ее простоты, где  $\tau_1$  – момент выхода на режим активного замораживания, т.е. достижения рабочей температуры  $T_{min}$ ;  $\tau_2$  – момент перехода на режим поддержания ЛПО;  $\Delta T(\tau) = Const$  – декремент изменения температуры за единицу времени.

В процессе многовариантного моделирования рассматривается конечное число  $P = N \times M$  режимов, описывающихся различными комбинациями параметров  $T_{min} = \{T_{1min}, T_{2min}, \dots, T_{Nmin}\}$  и  $\Delta T = \{\Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_M\}$ . Величина  $T_0$  определяется естественной температурой массива в интервале замораживания горных пород и поэтому не входит в число варьируемых параметров.

Диапазон изменения минимальной температуры хладоносителя определяется исходя из условий замораживания: геотермии, температуры внешней среды, криогидратной точки хладоносителя, минерализации подземных вод, скорости их фильтрации через область формирования ЛПО. Величина  $\Delta T$  напрямую определяет затраты холодильной мощности в различные моменты формирования ЛПО.

Предположим, что фильтрация подземных вод отсутствует, их минерализация незначительна, а максимальная естественная температура массива не превышает  $+20^{\circ}\text{C}$ . На начальном этапе для упрощения целесообразно рассмотреть два значения  $T_{min}$ , например,  $T_{min} = \{-20, -30\}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) и два значения  $\Delta T = \left\{\frac{1}{2}, 1\right\}$  ( $^{\circ}\text{C}/\text{сутки}$ ). Таким образом, потребуется промоделировать четыре режима работы замораживающей станции, чтобы понять, какой из них наиболее энергоэффективен.

Основным критерием выбора рационального режима является одновременное соблюдение следующих условий:

- 1) по времени – в расчетный срок (120 суток) обеспечивается достижение минимально требуемой толщины и температуры ЛПО во всех в интервале замораживания;
- 2) по энергоэффективности – пиковое значение «холодильной мощности» замораживающих колонок, рассчитанное в ПО «FrozenWall» минимально.

При необходимости дальнейшей рационализации следует рассмотреть другие пары значений  $T_{min}$  и  $\Delta T$  в окрестности ранее выбранных, что и называется многовариантным моделированием.

Предположим, что путем небольшого числа последовательных приближений определен режим, соответствующий обоим критериям и дающий пиковое значение  $W_{netto} = 1000$  кВт. Для получения  $W_{brutto}$  документ [3] рекомендует использовать запас на потери холода в рассольной сети в диапазоне от 1% до 1,5%  $W_{netto}$ , т.е.  $W_{brutto} = 1,015 \cdot W_{netto}$ . В различной проектной документации ранее авторами встречалась величина коэффициента потерь холодильной мощности вплоть до 1,2, т.е.  $W_{brutto} = 1,2 \cdot W_{netto}$ , возможно обусловленная конструктивными особенностями выбранного холодильного оборудования, теплоизоляции рассолопроводов, жаркими климатическими условиями и иными факторами, обеспечивающими повышенные теплопритоки в рассольную сеть. В любом случае вопрос о допустимом диапазоне величины данного коэффициента требует дополнительной, в том числе экспериментальной, проработки.

В документе [4] рекомендуется применять коэффициент 1,2, однако опыт показывает, что определяемая им величина запаса должна учитывать на какой сезон (время года) приходится пиковая нагрузка на холодильное или нагревательное оборудование. Если активная стадия искусственного замораживания производится в зимний период, характеризующийся существенно отрицательными средними температурами внешней среды, и применяемое оборудование работает с высоким коэффициентом полезного действия (КПД), то данный коэффициент действительно может быть сведен в расчете к единице. В жаркий летний период, когда температуры внешней среды могут длительно удерживаться выше  $+30^{\circ}\text{C}$ , целесообразно вводить в расчет запас холодопроизводительности оборудования.

Аналогично, если искусственное (принудительное) размораживание ЛПО производится в летний период, оборудование, нагревающее теплоноситель в рассольной сети, действует с максимальной эффективностью, поскольку потери теплоты минимальны. В зимний период требуется учесть потери тепловой мощности. Соответствие сроков отдельных этапов замораживания и размораживания породного массива сезонности климатических изменений в целом повышает энергоэффективность данных процессов.

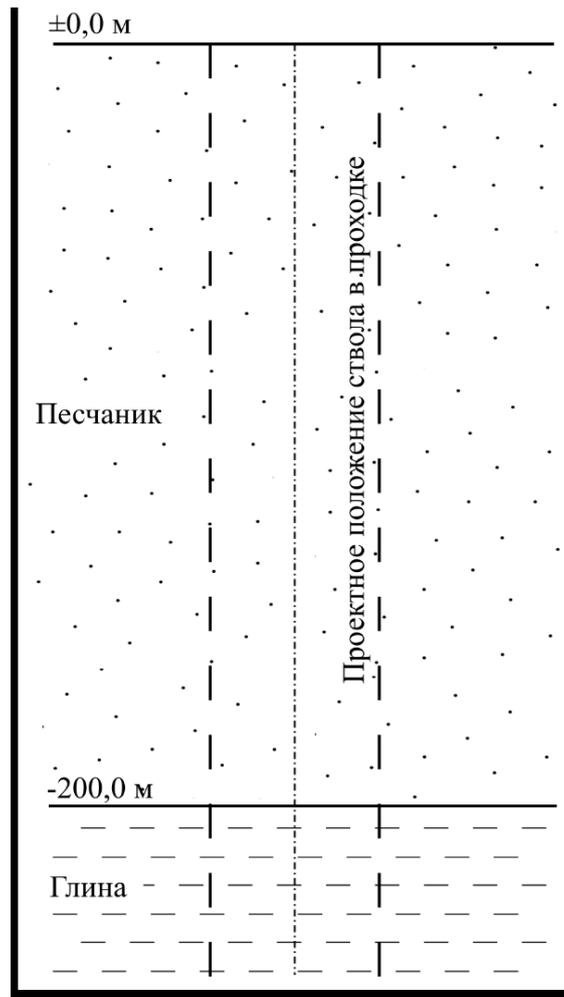


Рис. 1. Модельный геологический разрез участка строительства шахтного ствола

Рассмотрим простой модельный пример (рис. 1): пусть толща пород до глубины 200 м сложена обводненным слабосцементированным песчаником, ниже – глиной (региональный водоупор). Положим, расчетное значение минимально требуемой толщины ЛПО в песчанике составляет 2,0 м, а температура прочной породы  $-10^{\circ}\text{C}$ . Планируемое время активного замораживания составляет 120 суток или 4 месяца. Формирование ЛПО производится в холодный зимний период, когда внешние теплопритоки в рассольную сеть от насосного оборудования полностью компенсируются отбором теплоты во внешнюю среду.

Исследуем четыре режима активного замораживания:

1.  $T_0 = +10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{min} = -30^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = -1^{\circ}\text{C/сутки}$ ;
2.  $T_0 = +10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{min} = -25^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = -1^{\circ}\text{C/сутки}$ ;
3.  $T_0 = +10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{min} = -30^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = -0,5^{\circ}\text{C/сутки}$ ;
4.  $T_0 = +10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{min} = -25^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = -0,5^{\circ}\text{C/сутки}$ .

Результаты численного моделирования процесса формирования ЛПО при четырех указанных режимах активного замораживания представлены в таблице 1 и на рисунке 2.

Отметим, что при использовании всех режимов минимально требуемая толщина 2,0 м по температуре прочной породы  $-10^{\circ}\text{C}$  достигается в течение планируемого периода активного замораживания. При этом режимы 1 и 2 являются более энергозатратными как по средней величине требуемой холодопроизводительности (холодильной мощности) замораживающей станции  $\bar{W}$ , так и по пиковой нагрузке  $W_{max}$ .

Таблица 1

Параметры ЛПО при 4-х режимах работы замораживающей станции

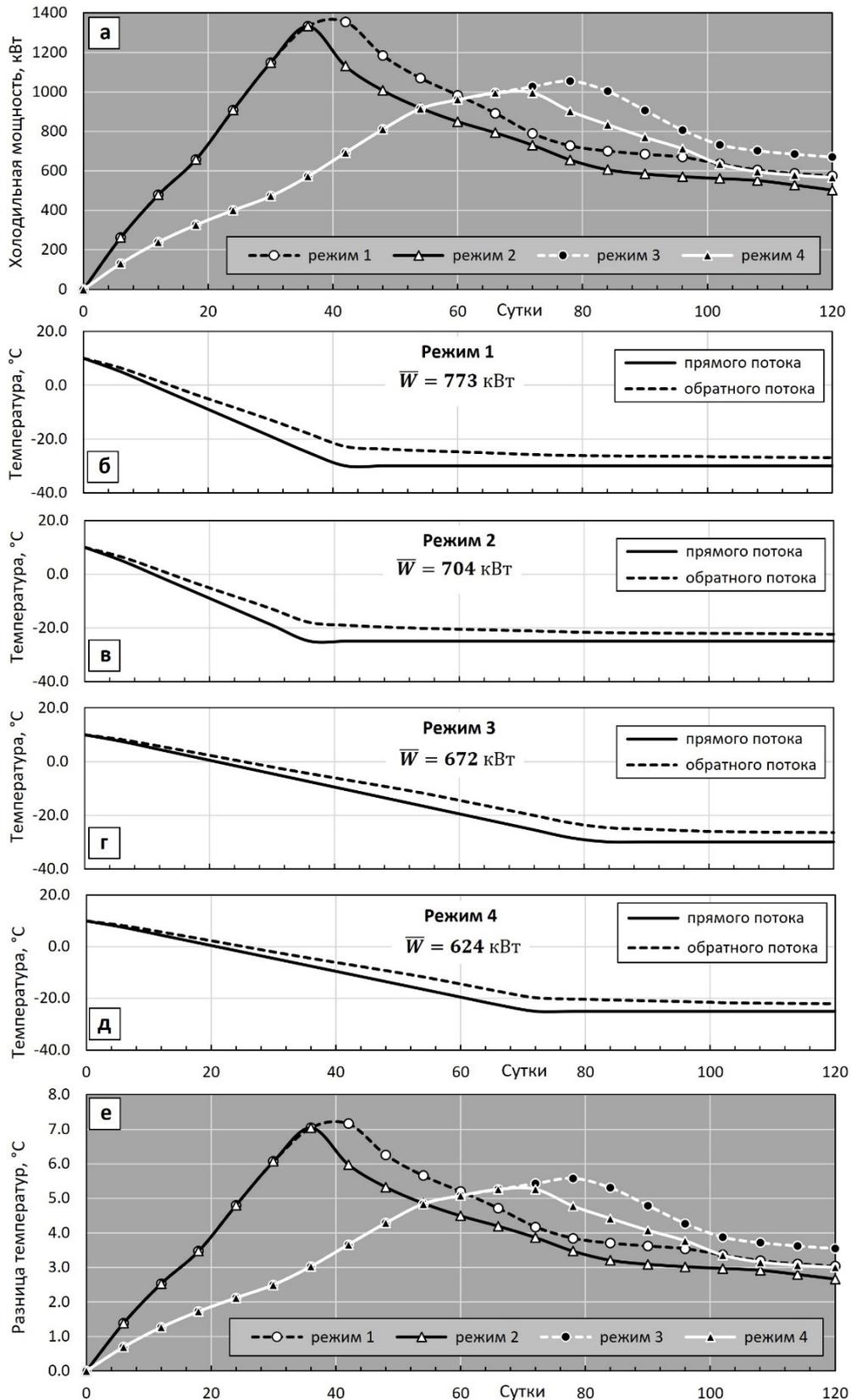
Режим №	Время с начала замораживания, сутки	Толщина ЛПО по температуре прочной породы - 10°C, м	Толщина ЛПО по границам мерзлой породы, м	Средняя холодопроизводительность замораживающей станции в течение времени (1), кВт	Максимальная холодопроизводительность замораживающей станции (пиковая нагрузка), кВт	Максимальная разница температур прямого и обратного потоков хладоносителя в рассольной сети (при пиковой нагрузке), °C
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	75	2,0	4,1	847	1354	7,2
	120	3,2	5,8	773		
2	99	2,0	4,6	738	1332	7,0
	120	2,5	5,5	704		
3	100	2,0	4,1	667	1055	5,6
	120	2,5	4,8	672		
4	120	2,0	4,6	624	995	5,3

Режим 1 приведет к формированию ЛПО с требуемыми параметрами в срок 75 суток, режим 2 – за 99 суток. Однако это не ускорит начало проходки, поскольку подготовительные работы еще не будут завершены. Во избежание непродуктивных энергозатрат и избыточного роста ЛПО во вне и особенно внутри контура проходки потребуются ранний переход в режим его поддержания (пассивное замораживание) с определением более сложного алгоритма регулирования температуры хладоносителя в рассольной сети.

Немаловажным фактором является максимальная разница температур прямого и обратного потоков хладоносителя. Увеличение данного параметра приводит к усложнению конструкции теплообменных аппаратов в составе холодильного оборудования, например, за счет компенсаторов, предотвращающих разрыв патрубков вследствие изменения их линейных размеров.

Режим 3 приводит к формированию ЛПО в течение 100 суток, но характеризуется существенно меньшими значениями требуемой (средней и пиковой) холодопроизводительности замораживающей станции и разницы температур прямого и обратного потоков хладоносителя в рассольной сети. Тем не менее, так же, как режимы 1 и 2, требует раннего перехода к поддержанию ЛПО до завершения подготовительных работ.

Рациональным представляется режим 4, позволяющий сформировать ЛПО с требуемыми параметрами к концу четырехмесячного подготовительного периода. Средняя холодопроизводительность замораживающей станции, затраченная для формирования ЛПО требуемой толщины, в данном режиме на 36% меньше, чем при использовании режима 1, на 18% меньше, чем для режима 2 и на 12% меньше, чем для режима 3. При этом пиковая нагрузка в режиме 4 меньше на 36%, чем в режиме 1, на 34% меньше, чем в режиме 2 и на 10% меньше, чем в режиме 3. Дальнейшее уменьшение величины  $\Delta T$  или повышение  $T_{min}$  не позволят обеспечить достижение требуемых параметров ЛПО в расчетные сроки.



**Рис. 2.** Результаты многовариантного моделирования процесса формирования ЛПО в ПО «FrozenWall»: (а) динамика холодильной мощности замораживающей станции для 4-х режимов работы; (б)-(д) графики изменения температур прямого и обратного потоков хладоносителя в рассольной сети; (е) динамика изменения разницы температур прямого и обратного потоков хладоносителя для каждого режима работы замораживающей станции

Допустим, что в составе замораживающей станции предполагается использовать блоки холодильного оборудования мощностью 200 кВт. Тогда для поддержания пиковой нагрузки в режимах 1 и 2 организации, осуществляющей искусственное замораживание и проходку ствола, потребуется приобрести или взять в аренду минимум 7 блоков, в режиме 3 – 6 блоков, а в режиме 4 – 5 блоков, что на 29% и 17% сократит соответствующие капитальные и эксплуатационные затраты.

С другой стороны, если требуется сократить подготовительный период до 3-х месяцев, следует в качестве рационального рассмотреть режим 1, позволяющий достичь требуемых параметров ЛПО намного быстрее остальных. В данном случае речь не будет идти о выборе режима замораживания с минимальными энергозатратами. Однако в случае аренды оборудования предусмотренная проектом возможность вывода из эксплуатации незадействованных холодильных блоков с последующим возвратом арендодателю позволит минимизировать данную статью затрат быстрее, чем при использовании других режимов.

Поэтому выбор режима активного замораживания целесообразно производить в комплексе всех строительных работ. Аналогичным образом может быть рассчитан режим искусственного размораживания ЛПО, требующий нагрева теплоносителя в замораживающих колонках.

Предложенная методика определения рационального режима с позиций энергоэффективности содержит 5 пунктов.

1. Знание точного срока (или их возможных вариантов), в течение которого производится подготовка к началу проходческих работ и необходимо сформировать ЛПО с минимально требуемыми параметрами.
2. Выбор 3-4 режимов работы замораживающей станции, характеризующихся некоторыми граничными параметрами, расходом хладоносителя в рассольной сети (по результатам гидравлического расчета), минимальной (рабочей) температурой его прямого потока и декрементом ее изменения.
3. Численное (многовариантное) моделирование процесса формирования ЛПО при использовании каждого из выбранных режимов с расчетом изменения требуемой холодопроизводительности замораживающей станции (нетто).
4. Определение теплового влияния насосного оборудования и внешних теплопри токов в рассольную сеть с последующим определением полной величины требуемой холодопроизводительности замораживающей станции, расчетом температуры обратного потока и разницы температур прямого и обратного потоков хладоносителя в рассольной сети.
5. Определение рационального режима или более близкого к таковому из исследованных, при необходимости изменение параметров по п. 2 с повторением процедур по п. 3.

Предложенный подход может быть развит для дальнейшего повышения энергоэффективности искусственного замораживания или размораживания. Функция  $T(\tau)$ , например, может быть выбрана отличной от линейной, обеспечивающей динамическое изменение декремента  $\Delta T = \Delta T(\tau)$  из условия не превышения пиковой или средней холодопроизводительности замораживающей станции, или, как вариант, максимальной разницы температур прямого и обратного потоков хладоносителя в рассольной сети.

Разработанная методика используется при разработке основных технических решений для проектов на искусственное замораживание и размораживание горных пород при строительстве шахтных стволов, а созданное специалистами института ПО «FrozenWall» является уникальным инструментом ее успешной реализации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номера НИОКТР 122012000396-6, 122030100425-6).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семин М.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С. Выбор параметров и обоснование режима работы замораживающих колонок для поддержания толщины ледопородного ограждения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 5. – С. 194-205. – DOI: 10.15372/FTPRPI20200522.
2. Семин М.А., Богомягков А.В., Левин Л.Ю. Определение технологических параметров систем замораживания пород из условия поддержания проектной толщины ледопородного ограждения // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 192-202. – DOI: 10.17073/2500-0632-2021-3-192-202.
3. ВСН 189-78. Инструкция по проектированию и производству работ по искусственному замораживанию грунтов при строительстве метрополитенов и тоннелей / Минтрансстрой: Утв. Гл. техн. упр. 10.05.78: [Введ. В действие 01.10.78]. – М., 1978. – 68 с.
4. Инструкция по расчету параметров, контролю и управлению искусственным замораживанием горных пород при строительстве шахтных стволов на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий». – Пермь; Солигорск, 2019. – 65 с.
5. Левин Л.Ю., Семин М.А., Богомягков А.В., Паршаков О.С. Применение программного комплекса «FrozenWall» для расчета искусственного замораживания пород // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. – 2019. – № 4. – С. 269-282.
6. Богомягков А.В., Пугин А.В. Совершенствование математической модели теплопереноса в замораживаемом породном массиве, реализованной в программе FrozenWall // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2023. – Т. 334. – № 2. – С. 164-174. – DOI: 10.18799/24131830/2023/2/3808.
7. «Frozen Wall»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2018666337 / Богомягков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А.; заявитель и правообладатель ПФИЦ УрО РАН. – 2018663501; заявл. 28.11.2018; зарегистрировано 17.12.2018; опубл. 17.12.2018. – 1 с.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.4.19

### О НЕОБХОДИМОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ГЛАВНОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ НОРМАТИВНОГО СРОКА СЛУЖБЫ ДЛЯ ВЫБОРА ВАРИАНТА ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ

А.Е. Суханов, С.В. Мальцев  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** При необходимости развития подземных рудников и увеличения границ их шахтного поля требуется разработка проекта, который учитывает всевозможные факторы, влияющие на безопасность ведения горных работ, в том числе и оценка технического состояния главной вентиляторной установки. Поскольку главные вентиляторы являются объектами, которые обеспечивают непрерывную подачу свежего воздуха в горные выработки, необходим комплексный подход при оценке их технического состояния для прогнозирования надежности оборудования на период перспективного развития. В данной статье описан порядок проведения работ по обследованию технического состояния главной вентиляторной установки, описаны методы неразрушающего контроля, используемые во время работы и представлен перечень рекомендаций, разработанных по результатам выполненной работы.

**Ключевые слова:** калийный рудник, главная вентиляторная установка, дефектоскопия, перспективное развитие, неразрушающий контроль, центробежный вентилятор, обследование оборудования.

#### Введение

Согласно существующим требованиям федеральных норм и правил «Правила безопасности при ведении горных работ...» подземные горные выработки должны проветриваться непрерывно вентиляторами главного проветривания и вспомогательными вентиляторами главного проветривания, установленными в соответствии

с разработанным проектом [1]. Кроме того, в РД-03-427-01 указано, что нормативный срок службы вентиляторной установки главного проветривания составляет 30 лет (диаметр рабочего колеса вентилятора более 3150 мм). После прохождения данного срока не реже одного раза в семь лет необходимо проходить экспертное обследование установок.

Таким образом, для полноценного обеспечения всех рабочих зон требуемым количеством воздуха главная вентиляторная установка рудника должна находиться в работоспособном состоянии на протяжении всего срока службы предприятия, а её мощности должно быть достаточно для транспортировки свежей воздушной струи до самых отдаленных рабочих зон.

При проведении обследования главной вентиляторной установки выполняется проверка толщины лопаток рабочих колес, состояние подвижных валов, подшипников, осевого направляющего аппарата и приводов [2]. Без получения общей картины о текущем состоянии оборудования сложно подготовить заключение о возможности продления срока службы главной вентиляторной установки. Комплексная оценка состояния агрегатов главной вентиляторной установки позволит определить целесообразность замены ГВУ или реконструкции ее при проведении технического перевооружения.

Главная вентиляторная установка на калийных рудниках работает в агрессивной среде, для которой характерна повышенная влажность и высокое содержание соляной пыли [3]. В связи с этим появляется необходимость обследования оборудования на предмет коррозионного износа, суть которого заключается в визуальном обследовании и проведении толщинометрии лопаток рабочих колес вентиляторов главного проветривания, а также осевых направляющих аппаратов [4]. Производительность главных вентиляторов на калийных рудниках может достигать 30 000 м<sup>3</sup>/мин [5]. Исходящая струя, проходящая через рабочее колесо вентилятора, содержит в себе множество абразивных примесей, в том числе и частицы соляной пыли или рудной мелочи. В совокупности данные факторы способны ускорять процессы абразивного и коррозионного износов элементов оборудования.

Сотрудниками Горного института УрО РАН совместно с техническими специалистами предприятия проведено комплексное обследование технического состояния главной вентиляторной установки одного из калийных рудников. В данной работе приводится описание узлов и агрегатов, подвергаемых процессу неразрушающего контроля, типы диагностики и результаты обследования.

### **Объект исследования**

Объектом исследования в данной статье является главная вентиляторная установка одного из калийных рудников. Срок эксплуатации обследуемого оборудования на момент проведения замеров составлял более 40 лет. В связи с длительной эксплуатацией ГВУ и перспективным развитием рудника актуальность получил вопрос определения текущего состояния комплекса главной вентиляторной установки, который включает в себя: рабочие колеса, осевые направляющие аппараты, валы, а также опорные подшипники.

На руднике имеются три вентиляторных агрегата типа ВРЦД – 4,5 с приводами разной мощности, основные параметры которых представлены в таблице 1.

Все вентиляторные агрегаты оснащены приводом, состоящим из двух электродвигателей: синхронного и асинхронного. Синхронный двигатель служит основным приводным при работе вентилятора в его нормальном режиме. Асинхронный двигатель с фазным ротором предназначен для разгона синхронного двигателя, а также используется при необходимости работы вентилятора с пониженной производительностью.

Таблица 1

## Технические характеристики вентилятора ВРЦД – 4,5

Параметр	Величина	
	ВУ № 1, 2	ВУ № 3
Год производства	1964 г	1972 г
Частота вращения	375 об/мин	500 об/мин
Мощность привода асинхронного двигателя (АД)	500 кВт	500 кВт
Мощность привода синхронного двигателя (СД)	1600 кВт	4000 кВт
Производительность	100...420 м <sup>3</sup> /с	140...570 м <sup>3</sup> /с
Статическое давление	150...460 кг/м <sup>2</sup>	270...820 кг/м <sup>2</sup>
Габариты агрегата	11730 x 9780 x 4900 мм	

Регулирование производительности вентиляторов главного проветривания возможно путем изменения работы синхронного (СД) и асинхронного (АД) двигателей, а также изменением угла поворота осевого направляющего аппарата, который располагается на одном валу вместе с рабочим колесом самого вентилятора. Главный вал рабочего колеса смонтирован на опорных подшипниках качения, которые также являлись объектом детального анализа.

### Комплексное обследование оборудования

#### 1. Вибродиагностика подшипников качения.

При появлении многих видов дефектов в подшипниковых узлах в результате контакта дефектных участков одних поверхностей с другими поверхностями трения качения могут возникать короткие ударные импульсы, в результате которых появляется вибрация. При значительном износе поверхностей качения из-за их неровностей возникает низкочастотная вибрация всего агрегата.

При обследовании подшипниковых узлов использовался вибронализатор СД-12, а также программное обеспечение «Dream-32». Замеры производились на опорах качения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. По результатам обследования подшипников рабочего колеса выявлены такие дефекты, как бой вала, наличие раковин на наружном кольце, а также наличие дефектов на сепараторе подшипника. Обследование подшипников качения синхронных электрических машин дефектов не показало.

#### 2. Обследование валов вентиляторных установок.

Анализ литературных источников показал, что галтели вала являются наиболее подверженными усталостным дефектам [6, 7, 8, 9]. Обследование валов производится методами цветной и вихретоковой дефектоскопии участков галтелей валов вентиляторных агрегатов.

При проведении цветной дефектоскопии на предварительно очищенную и обезжиренную поверхность наносят жидкость красного цвета специального состава с большой капиллярной активностью. Далее жидкость проникает в существующие

микротрещины. После этого производится удаление избытка краски и оставшиеся следы являются маркерами наличия зон, требующих повышенного внимания. Для обследования валов использовались следующие инструменты: дефектоскопический набор «CRACK MARKER», люксметр ТКА-Люкс, фонарь СВГ-7, линейка и штангенциркуль.

Вихретоковая дефектоскопия, так же как и цветная, относится к обследованиям неразрушающего типа. Для проведения подобного рода дефектоскопии во время обследования использовался вихретоковый дефектоскоп Mentor EM и вихретоковый преобразователь. Схема, описывающая принцип метода, представлена на рисунке 1.

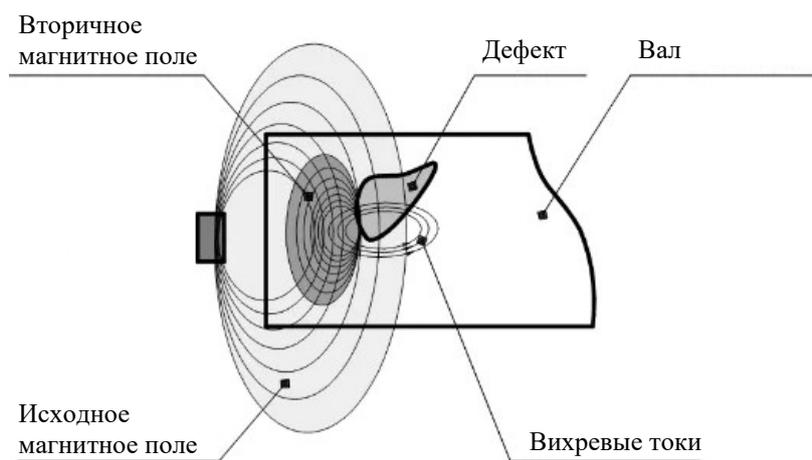


Рис. 1. Сущность вихретоковой дефектоскопии

Сущность метода заключается в создании переменного магнитного поля вблизи объекта исследования – вала. Образованное магнитное поле инициирует создание вихревых токов внутри вала, которые при наличии трещин или полостей изменяют свою конфигурацию. Фиксация этих изменений является исходными данными, сигнализирующими о наличии дефектов, развивающихся внутри исследуемого объекта.

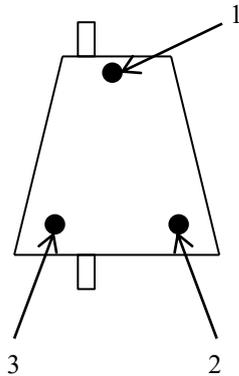
Результаты обследования галтелей валов показали, что дефектов в виде трещин в исследуемых зонах не обнаружено.

### 3. Толщинометрия лопаток.

Состояние лопаток рабочего колеса и осевого направляющего аппарата напрямую влияют на эффективность работы вентилятора главного проветривания. Для анализа целостности указанных элементов использовался метод визуального контроля, а также ультразвуковой толщинометрии. Сущность метода ультразвукового измерения толщины заключается в измерении времени прохождения импульса внутри исследуемого тела. Импульс, создаваемый преобразователем, проникает в объект контроля, проходит до противоположной поверхности и возвращается к приемнику. Время прохождения импульса фиксируется прибором и полученные данные преобразуются в расстояние, пройденное сигналом. Для проведения исследования применялись ультразвуковой преобразователь ПЭП П112-5-10/2-А-01 и ультразвуковой толщинометр «Булат-1М».

На рисунке 2 представлены места проведения контрольных замеров на лопатках осевого направляющего аппарата (ОНА) и рабочего колеса.

Лопатка ОНА  
(с 2-х сторон):



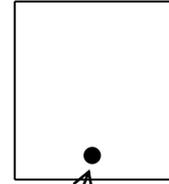
Лопатка рабочего колеса:

Вид сверху:



Вид А

Вид А:



1

Рис. 2. Расположение точек замера на лопатках

Результаты визуального обследования лопаток осевых направляющих аппаратов показали наличие сквозной коррозии на всех трех исследуемых вентиляторах. Максимальная величина площади зафиксированной коррозии имеет размеры 200×60 мм.

По итогу проведения толщинометрии лопаток направляющих аппаратов были выявлены максимальные и минимальные толщины контрольных участков (таблица 2).

Таблица 2

Максимальные и минимальные толщины контрольных участков направляющих аппаратов

Агрегат		Направляющий аппарат	
		min	max
ВУ №1	лицевая сторона	1,39 мм	3,29 мм
	оборотная сторона	7,09 мм	9,88 мм
ВУ №2	лицевая сторона	1,24 мм	3,01 мм
	оборотная сторона	4,20 мм	9,31 мм
ВУ №3	лицевая сторона	1,54 мм	3,10 мм
	оборотная сторона	4,98 мм	9,93 мм

Далее сравнение полученных результатов производилось с данными из конструкторских чертежей, прилагаемых к вентиляторам. Размеры, принятые к сравнению, представлены на рисунке 3. Погрешность представленных размеров может составлять до 0,5 мм.

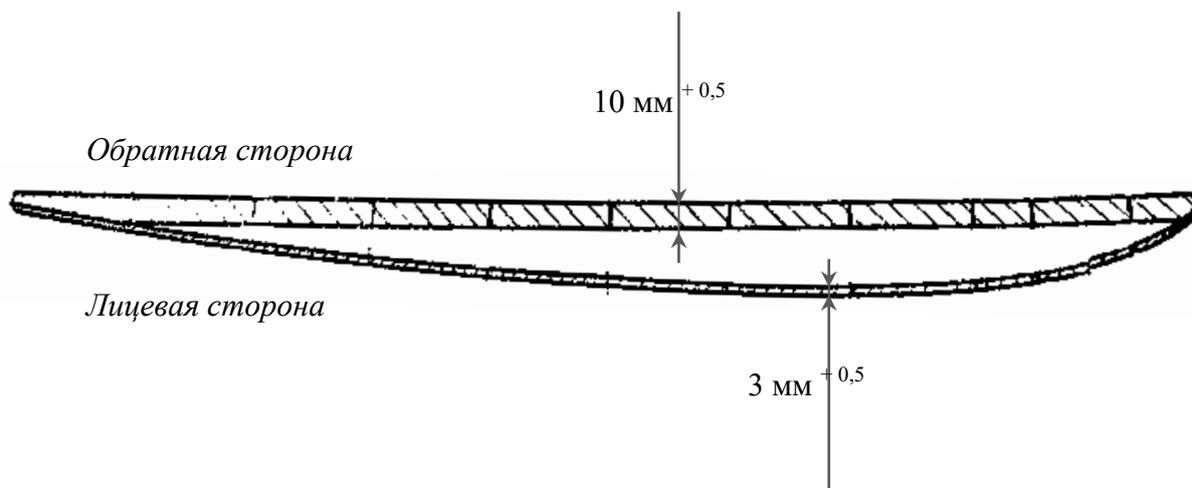


Рис. 3. Заводские размеры толщин стенок лопаток направляющих аппаратов

Результаты замеров, выполненных методом толщинометрии и их сравнения с заводскими значениями, износ некоторых лопаток направляющего аппарата составляет более 50% от первоначального (заводского) состояния.

Результаты толщинометрии лопаток рабочих колес центробежного вентилятора типа ВРЦД – 4,5 представлены в таблице 3.

Таблица 3

Максимальные и минимальные толщины контрольных участков рабочих колес

Агрегат	Рабочее колесо	
	min	max
ВУ №1	2,85 мм	4,10 мм
ВУ №2	2,70 мм	3,54 мм
ВУ №3	4,14 мм	4,96 мм

По результатам проведенных исследований методом ультразвуковой толщинометрии выявлено, что максимальная и минимальная величины отличаются на 46%. Анализируя полученные значения максимальных замеренных величин, можно сделать вывод, что износ лопаток рабочих колес на агрегатах ВУ 1 и ВУ 2 больше, чем у агрегата ВУ 3. Это объясняется величиной наработки вентиляторных агрегатов, которая у ВУ 1 и ВУ 2 значительно больше ввиду того, что режим работы ВУ 3 подразумевает её запуск только при отсутствии возможности работы первых двух агрегатов. Описанные факты указывают на наличие абразивного и коррозионного износов лопаток рабочих колес и, как следствие, подтверждается актуальность проведения толщинометрии данных элементов.

#### Разработка рекомендаций по результатам обследования

Обследование лопаток направляющих аппаратов показало наличие следов коррозии и значительного абразивного износа. В связи с уже длительной эксплуатацией направляющих аппаратов и с присутствием дефектов для стабильной работы оборудования рекомендуется заменить направляющие аппараты и смежное с ними оборудование на всех трех агрегатах. Также рекомендовано произвести ревизию кожухов направляющих

аппаратов, суть которой заключается в нанесении свежего антикоррозийного покрытия изнутри и, при необходимости, снаружи.

Обследование подшипниковых узлов указало на наличие средних и сильных по уровню дефектов, таких как биение вала, дефекты наружного кольца, дефекты сепаратора. При модернизации механического оборудования главной вентиляторной установки рекомендуется произвести замену всех подшипников качения.

### **Выводы**

Вопрос обследования технического состояния главных вентиляторных установок на калийных рудниках Российской Федерации с каждым годом становится более актуальным ввиду старения существующего оборудования. Проведение дефектоскопии узлов и агрегатов главной вентиляторной установки является экономически более выгодным в сравнении с комплексной заменой всего оборудования. Такой подход позволяет выявить и устранить существующие проблемы, продлевая срок службы оборудования и снижая затраты на его замену.

Данная работа описывает перечень технических обследований, выполненных на одном из калийных рудников, где полученные результаты показали отсутствие необходимости полной замены оборудования, но выявили необходимость частичной модернизации. Было выявлено, что лопатки направляющих аппаратов сильно подвержены влиянию агрессивной среды, в которой эксплуатируется оборудование. Подтверждением тому является наличие сквозных отверстий, образовавшихся в результате воздействия коррозии. Ввиду чего выдана рекомендация по замене лопаток осевого направляющего аппарата. Анализ результатов обследования подшипниковых узлов указал на наличие дефектов при их работе, в результате чего выдана рекомендация о их ревизии или полной замене.

Отсутствие необходимости комплексной реконструкции главной вентиляторной установки с полной заменой оборудования позволит снизить перечень затрат для горного предприятия без снижения уровня безопасности при ведении горных работ.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР № 122012000396-6 и № 121111800053-1).*

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
2. РД 03-427-01. Методические указания по проведению экспертных обследований вентиляторных установок главного проветривания. Вып. 11: утв. Госгортехнадзором России 20.12.2001, № 61, действуют с 01.04.2002. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03).
3. Исаевич А.Г., Трушкова Н.А. Исследование причин и механизмов возникновения соляных образований в скипо-вентиляционных стволах калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №. 4. – С. 195-200.
4. Синкин Д.В., Антипов С.М., Илюшин В.В., Самохин А.В. Целесообразность и особенности ультразвуковой толщинометрии металлоконструкций шахтных вентиляторов главного проветривания при проведении экспертизы промышленной безопасности // Евразийский Союз Ученых. – 2016. – №. 3-3 (24). – С. 65-67.
5. Левин Л.Ю., Суханов А.Е., Исаевич А.Г. Увеличение энергоэффективности систем вентиляции калийных рудников путем реализации последовательного проветривания камер служебного назначения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 4. – С. 93-106. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_4\_0\_93.

6. Мальцев А.А., Тронников А.И. Оценка вероятности безотказной работы галтели рабочего валка по критерию циклической прочности // Оригинальные исследования. – 2020. – Т. 10, №. 9. – С. 102-109.
7. Костичев В.Э. Применение динамического моделирования для оценки влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости // Вестник СГАУ. – 2015. – Т. 14, №. 1. – С. 147-153. – DOI: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-147-153.
8. Коротков М.М. Ультразвуковая толщинометрия: учеб. пособие. – Томск: изд-во ТПУ, 2008. – 94 с.
9. Арон А.В., Леонтьев Л.Б., Флорианская М.В. Повышение надежности втулок цилиндров судовых ДВС при трещинообразовании в галтели опорного бурта // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2004. – №. 5. – С. 36-41.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.4.20

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОТСТАВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА ОТ ГРУДИ ЗАБОЯ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ВОЗДУХООБМЕНА В ТУПИКОВЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

А.В. Таций

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Данная работа посвящена анализу влияния величины отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя на интенсивность воздухообмена. В работе приводятся результаты численного моделирования процесса проветривания тупиковой горной выработки с использованием вентиляционного трубопровода нагнетательным способом. Геометрические параметры выработки соответствуют типовым выработкам полиметаллических рудников, проводимых буровзрывным способом. Результаты исследования указывают на возможность увеличения отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя без ухудшения интенсивности массообмена вблизи тупикового забоя. Этот вывод важен с точки зрения ресурсосбережения и повышения энергоэффективности проветривания тупиковых горных выработок. Полученные результаты могут быть применены при отступлении от пункта 182 Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых».

**Ключевые слова:** рудник, тупиковая выработка, нагнетательный способ проветривания, воздухообмен, массообмен, безопасность.

### Введение

В современных условиях при увеличении интенсивности ведения горнопроходческих работ необходим постоянный контроль за безопасностью. В части проветривания тупиковых горных выработок существует ряд обязательных требований, предписанных Федеральными нормами и правилами промышленной безопасности [1], которые, в частности, устанавливают, что отставание вентиляционных труб от забоя не должно превышать 10 метров при площади сечения забоя не более 16 метров, а при площади сечения забоя более 16 метров величина отставания вентиляционных труб не должна превышать 15 метров.

Соблюдение данного требования замедляет скорость ведения горных работ, а также снижает энергоэффективность вентиляции. Это связано прежде всего с тем, что в выработках, проводимых буровзрывным способом, при соблюдении раннее приведенного требования регулярно происходит повреждение вентиляционного трубопровода, что приводит к простоем горных работ вследствие нарушения вентиляции [2].

Результаты многочисленных исследований указывают на то, что для калийных и полиметаллических рудников, не опасных по газам, данное требование является чрезмерно жестким [3-6]. Анализ проводился как с привлечением аппарата вычис-

лительной механики жидкости и газа [3, 4], так и в рамках одномерных подходов [6, 7]. При этом авторы уделяли большее внимание вопросам определения динамики выноса вредных примесей из тупиковой выработки, не проводя при этом детальный анализ закономерностей распределения воздушных потоков внутри выработки. В то время как понимание особенностей вихревого движения воздуха в тупиковой выработке также крайне важно для формулировки выводов относительно возможности увеличения отставания конца вентиляционного трубопровода от груди забоя. Настоящее исследование направлено на устранение данного пробела. В статье описаны результаты исследования закономерностей движения воздушных потоков в тупиковой выработке при различных отставаниях конца вентиляционного трубопровода от тупикового забоя.

### Разработки модели

В настоящий момент для описания массообмена в тупиковых горных выработках, проветриваемых нагнетательным способом, могут применяться различные модели перемешивания встречных потоков воздуха. Подходы для создания этих моделей могут быть основаны на использовании 3D моделирования или аналитических подходов. Так, к примеру, в [7] предложена одномерная модель, основанная на следующих приближениях.

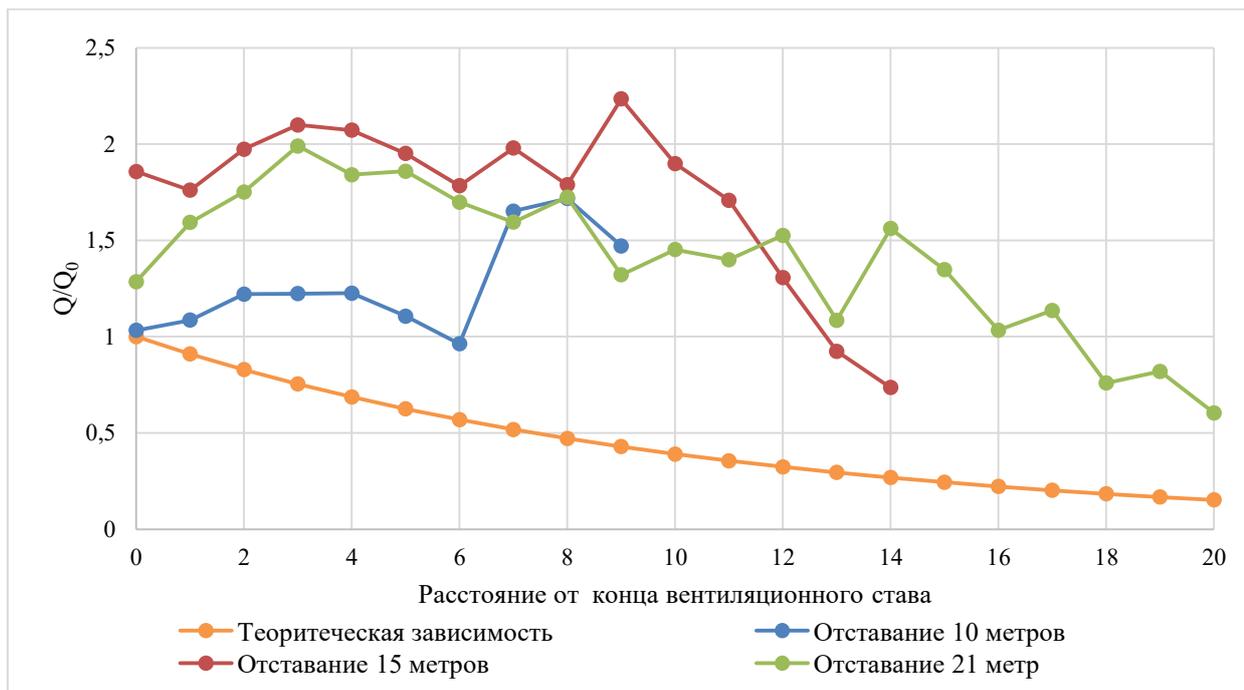
1. Струя расширяется до половины сечения выработки с неизменным расходом. После раскрытия струи движение воздуха представляет собой горизонтальное движение двух встречных потоков одинакового сечения.
2. Уменьшение расхода воздуха после раскрытия струи происходит в результате непрерывного перетекания воздуха из прямого в обратный поток в результате вязкого трения потоков между собой.
3. Коэффициент турбулентной вязкости на границе потоков моделируется так же, как и для свободной осесимметричной струи [8].

Данная модель использована авторами в [7], чтобы получить зависимость количества воздуха, двигающегося к забою, от расстояния до конца трубопровода. Эта зависимость представлена на рис. 1. Количество воздуха, двигающегося к забою, по сути характеризует интенсивность массообмена в поперечном сечении выработки. График представляет собой экспоненциальную убывающую кривую, описываемую приведенным уравнением:

$$Q = Q_0 \cdot \exp\left(\frac{-0,47x}{H}\right) \quad (1)$$

где,  $Q$  – расход воздуха в поперечном сечении выработки, направленный в сторону груди забоя,  $Q_0$  – дебит вентилятора,  $H$  – высота выработки.  $x_0$  – расстояние от конца вентиляционного трубопровода в сторону забоя.

Однако в результате проведения нами натурального эксперимента в тупиковой горной выработке площадью 29,3 м<sup>2</sup> и дебитом вентилятора 17,4 м<sup>3</sup>/с получено, что интенсивность массообмена существенно иначе зависит от расстояния до конца трубопровода. Экспериментальные кривые для  $Q$  представлены на рис. 1 для отставаний конца трубопровода от забоя, равных 10, 15 и 21 метр. В зависимости от отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя графики интенсивности массообмена в тупиковой горной выработке и график теоретической зависимости, очевидно, различаются. Данные эксперимента позволяют предположить, что воздухообмен в тупиковой горной выработке может изменяться по иному закону, нежели по представленной аналитической зависимости.



**Рис. 1.** Теоритическая и экспериментальные зависимости интенсивности массообмена в тупиковой горной выработке

В попытке определить истинные закономерности и подтвердить наблюдаемые в эксперименте зависимости проведен анализ закономерности влияния величины отставания вентиляционного трубопровода, а также скорости потока свежего воздуха, на величину интенсивности массообмена, с использованием альтернативного подхода – трехмерного численного моделирования.

Объектом исследования в данной работе является тупиковая горная выработка (рис. 2), проветриваемая вентиляционным трубопроводом нагнетательным способом. Отставание конца вентиляционного трубопровода от тупикового забоя принято равным 10, 15, 20, 25, 30 и 35 метров. Высота и ширина выработки составляет 5 метров и соответствует выработкам проходимых буровзрывным способом на полиметаллических рудниках. Скорость воздушного потока на выходе из вентиляционного трубопровода принималась равной 15 м/с и 20 м/с.

Численное моделирование проводилось в программном продукте Ansys CFX. Для расчета применялась модель турбулентности Realizable K-Epsilon (RKE) [9-11]. Для вычисления интенсивности массообмена в поперечном сечении выработки необходимо определить результат отношения расхода потока воздуха в этом сечении, направленного в забой, и расхода воздуха, поступающего на проветривание выработки. Для определения расхода,двигающегося к забою (см. рис. 3), можно использовать формулу:

$$Q = \int_S \max|-V_x, 0| dS \quad (2)$$

Для построения графика интенсивности массообмена требуется вычислить распределение аэродинамических параметров в тупиковой выработке. Далее необходимо построить множество поперечных сечений вдоль продольной оси выработки и рассчитать интеграл (1) для рассматриваемых сечений.

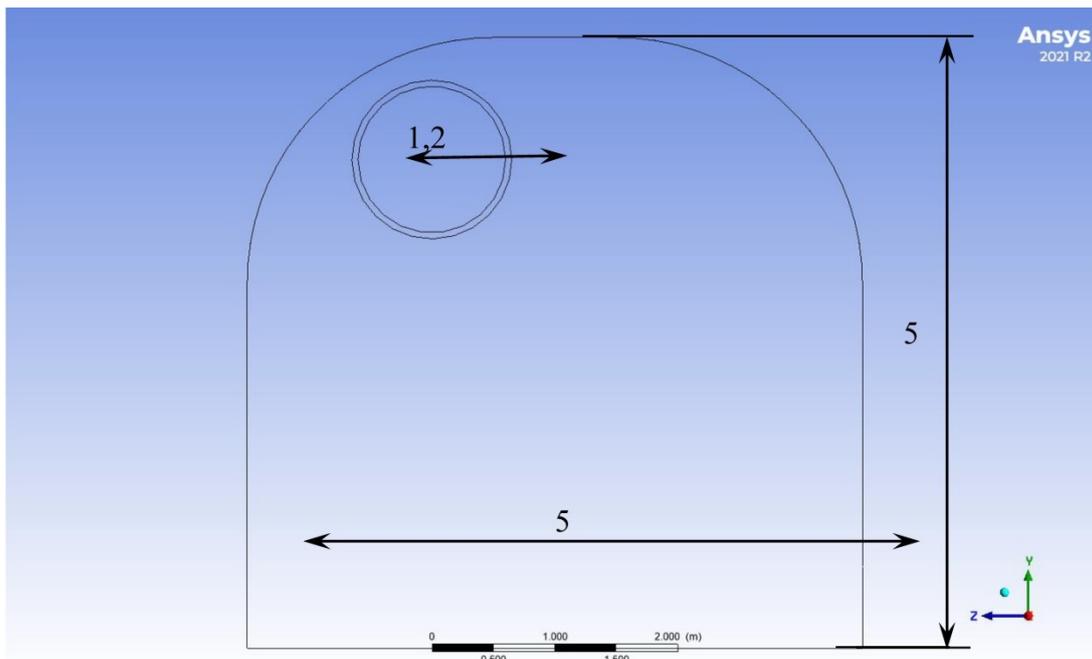


Рис. 2. Поперечное сечение выработки

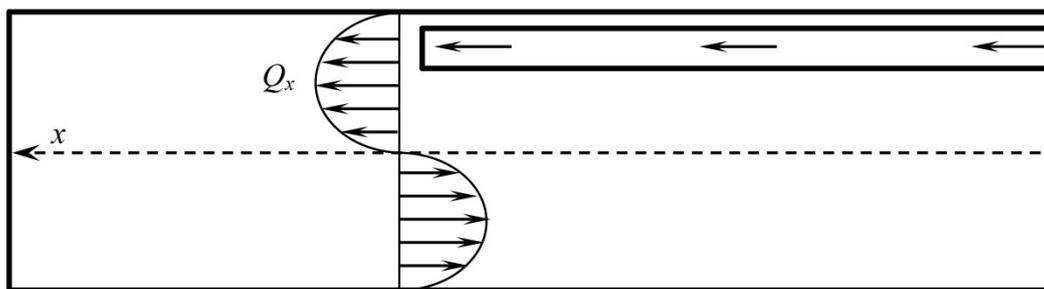


Рис. 3. Модель расчета количества воздуха в тупиковой выработке

### Результаты численного моделирования

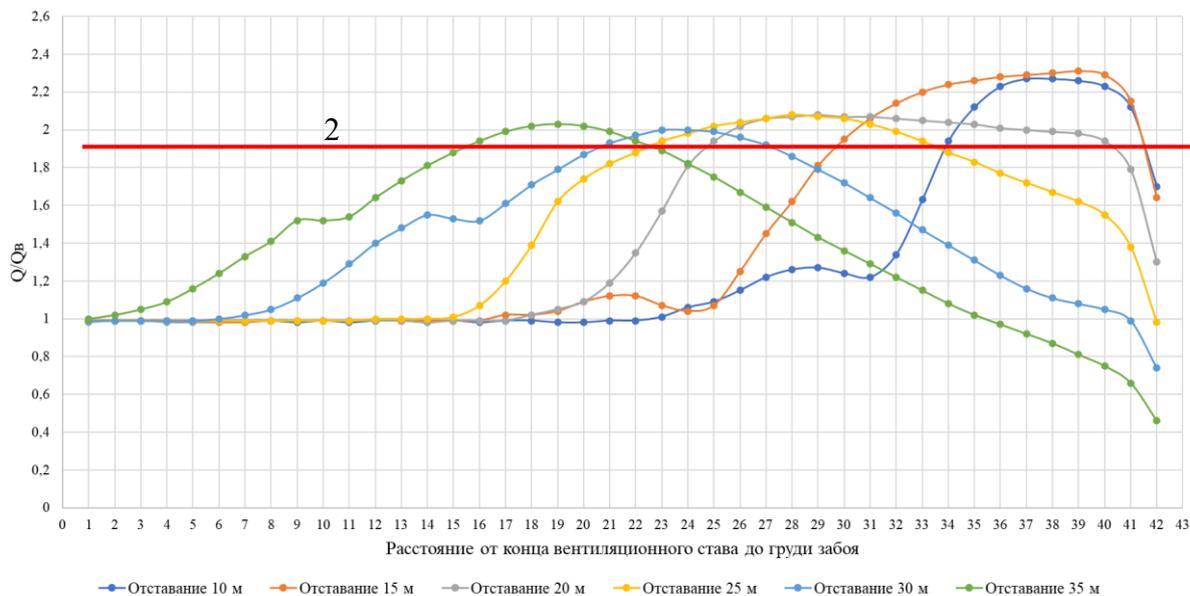
#### исследования интенсивности массообмена в тупиковой горной выработке

Результаты моделирования при отставании трубопровода в 10 и 15 метров от груди забоя представлены зависимостью безразмерного расхода воздуха  $Q$  и поступающего расхода воздуха  $Q_x$  по оси ординат,двигающегося к забою тупиковой горной выработки, от координаты  $x$  вдоль оси выработки (рисунок 4). По кривым можно наблюдать, что интенсивность массообмена резко возрастает после конца вентиляционного трубопровода, а при отставании трубопровода 20 метров и более интенсивность выходит на постоянное значение около 2 с отклонением не более 5%.

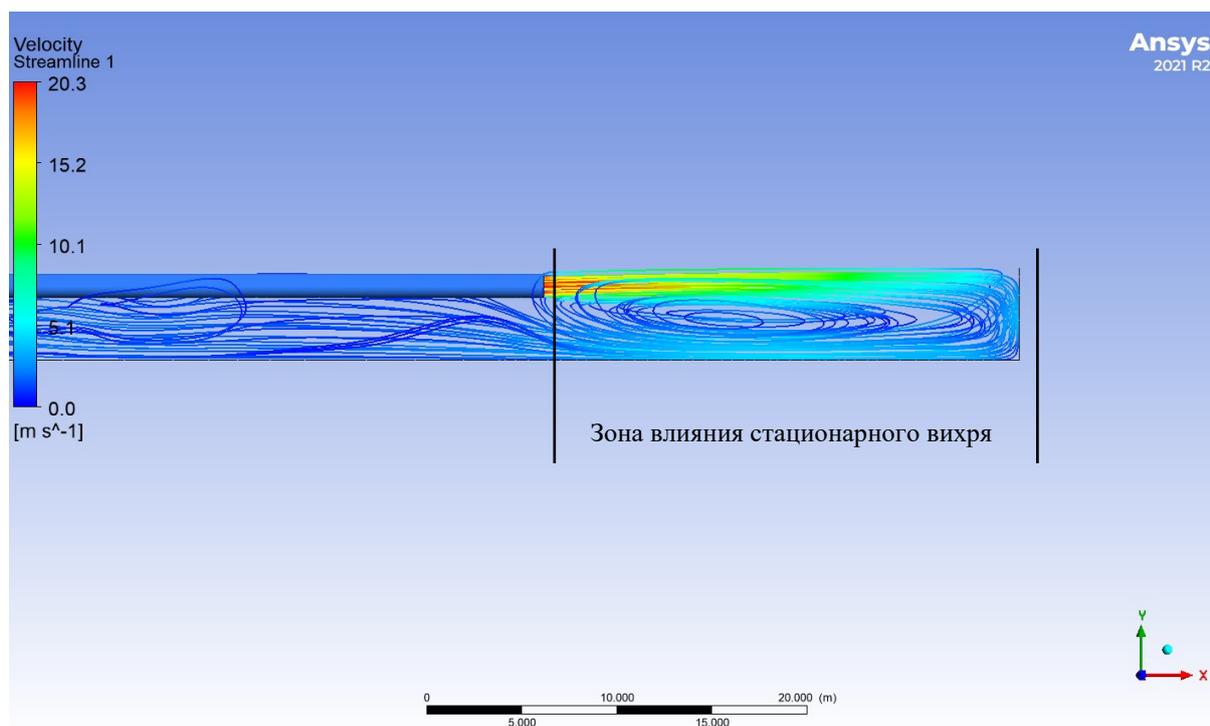
При увеличении скорости воздушного потока до 20 м/с (рисунок 6) кривые практически не изменяются, что позволяет сказать о том, что интенсивность массообмена слабо зависит от скорости потока воздуха, выходящего из вентиляционного трубопровода.

Увеличение интенсивности в сечении связано с возникновением стационарного вихря (рисунок 5) в области тупиковой выработки между забоем и областью, где располагается конец вентиляционного трубопровода [2].

Подобный эффект наблюдается и при других отставаниях от груди забоя, при которых пиковая интенсивность массообмена достигает значения 2,3. А при отставании трубопровода 20 метров и более интенсивность массообмена выходит на постоянное значение около 2, с отклонением не более 5%.



**Рис. 4.** Интенсивность массообмена при удалении вентиляционного трубопровода от груди забоя при скорости потока 15 м/с



**Рис. 5.** Стационарный вихрь при удалении конца вент. трубопровода от груди забоя на 25 метров при скорости потока 20 м/с

Границы влияния возникающего стационарного вихря показаны на рисунке 6. Границы определены зоной, в которой интенсивность массообмена  $\geq 1$  или зоной, в которой расход воздуха,двигающегося к забою, не ниже, чем на выходе из вентиляционного трубопровода. В пределах этой границы интенсивность массообмена считается достаточной для того, чтобы обеспечить перемешивание и вынос вредных примесей, образующихся после взрывных работ. При отставаниях трубопровода более 25 метров, эта зона имеет одинаковую протяженность и составляет около 30 метров. С практической точки зрения данное расстояние можно обосновать как такое отставание вентиляционного трубопровода от за-

боя, при котором забой обеспечен достаточным количеством воздуха при заданных геометрических параметрах выработки. Важно отметить, что выбранный критерий для определения границы достаточного проветривания является лишь одним из возможных, а конечный вывод об эффективном проветривании может быть сделан только после рассмотрения закономерностей нестационарного выноса вредных примесей. Тем не менее, полученный результат подтверждает результаты экспериментальных измерений и открывает перспективы для последующего обоснования отступления от требований пункта ФНиП, который устанавливает расстояние от груди забоя в 10 или 15 метров.

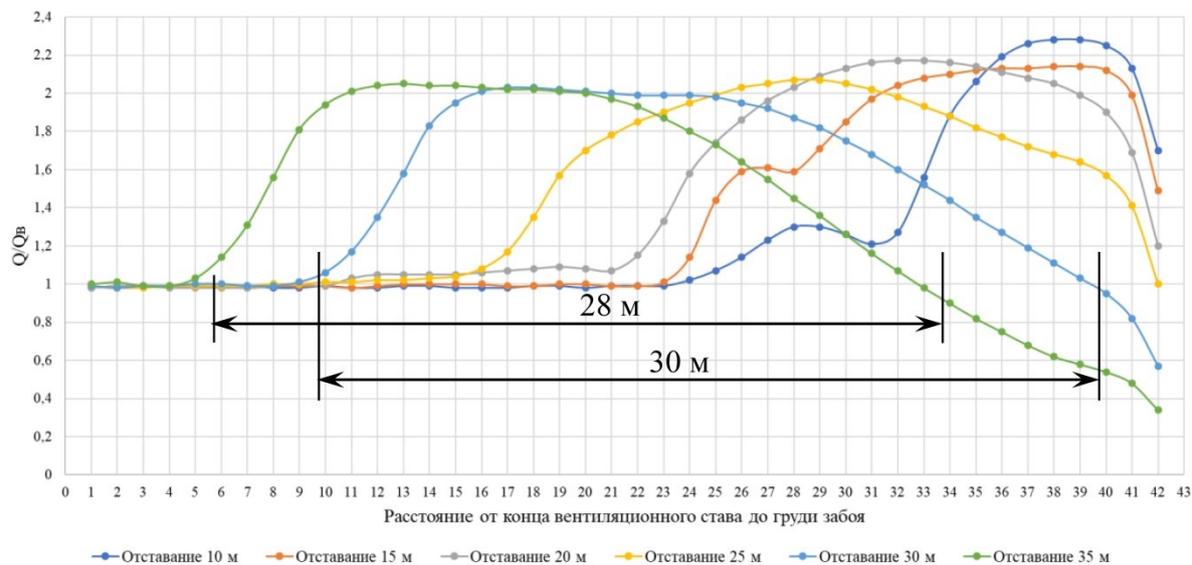


Рис. 6. Интенсивность массообмена при удалении вент. трубопровода от груди забоя при скорости потока 20 м/с

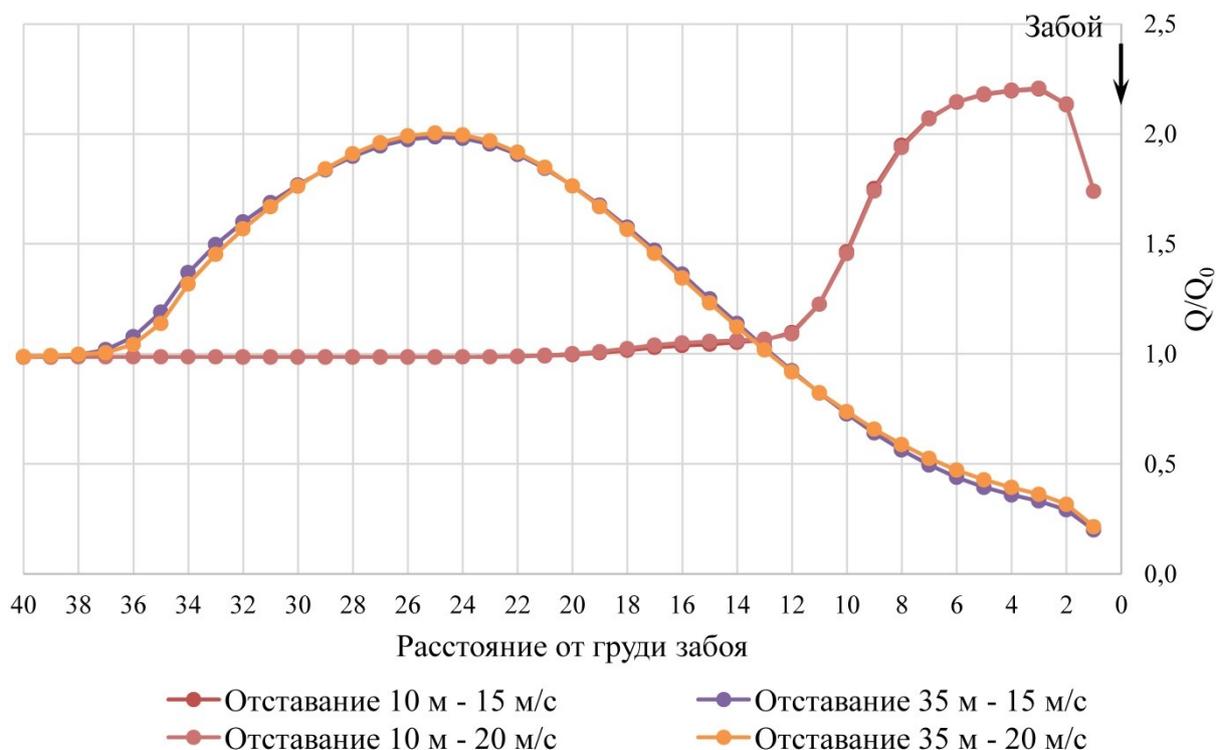


Рис. 7. Интенсивность массообмена при отставании от груди забоя на 10 и 35 метров при скорости потока 15 и 20 м/с

Результаты сравнения при скоростях входящего потока 15 и 20 м/с и отставании трубопровода на 10 и 35 метров представлены на рисунке 7. Наложение графиков при различных скоростях движения поступающего на проветривание потока воздуха подтверждает, что скорость входящего потока воздуха не влияет на интенсивность массообмена.

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы.

1. При проветривании выработок нагнетательным способом у забоя выработки формируется устойчивый стационарный вихрь, интенсифицирующий массообмен.

2. Максимальная интенсивность массообмена зависит от отставания вентиляционного трубопровода; при больших отставаниях трубопровода (более 20 метров) она выходит на постоянное значение около 2 (для рассмотренных параметров задачи).

3. Нарастание интенсивности массообмена происходит по степенному закону с показателем, равным примерно 2 (отклонения не более 5%). В то время как убывание – по линейному закону.

4. Интенсивность массообмена не зависит от скорости потока воздуха, поступающего на проветривание тупиковой горной выработки.

5. Зона влияния возникающего стационарного вихря при принятых геометрических параметрах выработки, при котором интенсивность массообмена  $>1$ , составляет примерно 30 метров при отставании трубопровода 25 метров и более, что можно применить в обосновании для отступления от требований пункта ФНиП, который устанавливает расстояние от груди забоя в 10 или 15 метров.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
2. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Эжектирование возвратного потока воздуха для увеличения дальнобойности направленной в тупик воздушной струи // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 27-36. – DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3624.
3. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 15-23. – DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2715.
4. Козырев С.А., Амосов П.В. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 79-84.
5. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Паршаков О.С., Богомятков А.В. Улучшение проветривания тупиковой выработки путем увеличения начальной скорости воздуха в вентиляционной струе // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 112-118. – DOI: 10.15372/FTPRPI20220112.
6. Мостепанов Ю.Б. Исследование дальнобойности стесненной струи, действующей в забое тупиковой выработки // Изв. вузов. Горн. журн. – 1978. – № 11. – С. 47-50.
7. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Паршаков О.С. О возможности проветривания тупиковых выработок беструбным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 195-199.
8. Дэйли Д.У., Харлеман Д. Механика жидкости: пер с англ. – М.: Энергия, 1971. – 480. С.: ил.
9. Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 5-33. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2021\_6\_0\_5.
10. Левин Л.Ю., Газизуллин Р.Р., Зайцев А.В. Использование программного модуля Ansys CFX при решении научно-производственных задач проветривания шахт и рудников // САПР и графика. – 2011. – № 10. – С. 64-66.
11. Колесов Е.В., Казаков Б.П., Кузьминых Е.Г. Моделирование процесса изменения состава рудничного воздуха в наклонной тупиковой горной выработке // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 79-84. DOI: 10.7242/echo.2020.1.17.

**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 15.11.2023. Формат 60\*84/8. Бумага ВХИ. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 15,81. Тираж 100 экз. Заказ №151149. Бесплатно. Дата выхода в свет 01.12.2023

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

**Адрес редакции:**

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

**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