



Федеральное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела
Уральского отделения Российской академии наук

СЕТЕВОЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЕ НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

ISSN 2313-1586

В НОМЕРЕ:

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И
ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
ПРИ ОСВОЕНИИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ГЕОТЕХНИКА ДЛЯ
ОТКРЫТОЙ, ПОДЗЕМНОЙ
И КОМБИНИРОВАННОЙ
ОТРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ

В ПОРЯДКЕ
ОБСУЖДЕНИЯ

ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ

PROBLEMS OF SUBSOIL USE



Сайт
<http://trud.igduran.ru>

Выпуск 4 (39)

2023

16+

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения РАН

№ государственной регистрации Эл № ФС77-56413 от 11.12.2013

Выходит 4 раза в год только в электронном виде

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

С.В. Корнилков, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – главный редактор
В.М. Аленичев, д.т.н., проф., г.н.с., ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург – зам. главного редактора

Члены редакционной коллегии:

Н.Ю. Антонинова, к.т.н., заведующая лабораторией ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
А.А. Абдурасулов, к.ф.-м.н., советник ректора, доцент, Таджикский технический университет имени академика
М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан
Н.Г. Валиев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой горного дела УГГУ, г. Екатеринбург
С.Д. Викторов, д.т.н., проф., заведующий отделом проблем геомеханики и разрушения горных пород ИПКОН РАН,
г. Москва
С.Е. Гавришев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой разработки полезных ископаемых, МГТУ им. Носова,
г. Магнитогорск
С.Ж. Галиев, д.т.н., проф., чл.-корр. НАН РК, вице-президент АО «Казахстанский институт развития индустрии»
Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
А.В. Глебов, д.т.н., заместитель директора ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
Ш.Ш. Заиров, д.т.н., проф., Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Республика Узбекистан
О.В. Зотеев, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления ИГД УрО РАН
И. В. Зырянов, д.т.н., заведующий кафедрой горного дела политехнического института (филиал) СВФУ в г. Мирном
В.С. Коваленко, д.т.н., проф., Горный институт НИТУ «МИСиС», г. Москва
К.Ч. Кожоголов, д.т.н., проф., чл.-корр НАН КР, директор Института геомеханики и освоения недр НАН КР,
г. Бишкек, Киргизская Республика
И.А. Козлова, к.г.-м. н, директор института геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург
И.Л. Кравчук, д.т.н. директор Челябинского Филиала института горного дела УрО РАН, г. Челябинск
М.В. Курленя, д.т.н., проф., академик, научный руководитель ИГД СО РАН, г. Новосибирск
Ю.Г. Лаврикова, д.э.н., проф., директор Института экономики УрО РАН, г. Екатеринбург
С.В. Лукичев, д.т.н., проф., директор ГоИ КНЦ РАН, г. Апатиты
А.М. Макаров, д.т.н., проф., исполнительный директор ООО НИИОГР, г. Челябинск
А.А. Панжин, к.т.н., ученый секретарь ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
А.Е. Пелевин д.т.н., проф. кафедры обогащения полезных ископаемых УГГУ, г. Екатеринбург
И.Ю. Рассказов, д.т.н., чл.-корр. РАН, директор Хабаровского федерального научного центра, г. Хабаровск
Л.С. Рыбникова, д.т.н., с.н.с. ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
Д.И. Симисин, д.т.н., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
И.В. Соколов, д.т.н., директор ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург
С.М. Ткач, д.т.н., директор ИГДС СО РАН, г. Якутск
С.И. Фомин, д.т.н., проф. кафедры, НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург
Хадхуугийн Жаргалсайхан, д.т.н., директор Института горного дела Монгольского государственного университета
науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия
Л.С. Шамганова, д.т.н., член-корреспондент НАН РК, Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Национальный центр по
комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан
В.Л. Яковлев, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН, советник РАН, ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела Уральского отделения РАН

Все статьи проходят обязательное рецензирование

Адрес редакции: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 58, тел. (343)350-35-62

Сайт издания: trud.igduran.ru

Выпускающий редактор: Е.А. Катаева

Редактор: О.А. Истомина

Компьютерный набор и верстка: Я.В. Неугодникова, Т.Г. Петрова

Содержание

ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Смирнов А.А., Барановский К.В., Дьячков П.С.** Система подэтажного обрушения с торцовым выпуском для выемки целиков при отработке пологих рудных тел 6

ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

- Антонов В. А.** Смысловая интерпретация функционально-факторных моделей геомеханических явлений 17
- Далатказин Т.Ш., Коновалова Ю.П., Зуев П.И., Шевченко М.Д.** Новые возможности радонометрии в комплексе геодинамической диагностики 34
- Исмагилова Э.Р.** Причины каналообразования в цементном камне и способы их устранения 43
- Шевченко М.Д., Мельник В.В.** Исследование геомеханического состояния массива горных пород на территории строительства шахтного эксплуатационного копра с использованием геофизических методов 51
- Винальева Е.А.** Обзор современных геодезических приборов для мониторинга деформационных процессов земной поверхности 57
- Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А., Кузнецова Я.А.** Обоснование направлений рекультивации с использованием экологического потенциала природно-территориального комплекса 65

ГЕОТЕХНИКА ДЛЯ ОТКРЫТОЙ, ПОДЗЕМНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Журавлев А.Г., Глебов И.А., Черепанов В.А.** К вопросу повышения производительности и технической готовности мощных отечественных экскаваторов 76
- Реготунов А.С.** Методический подход к оценке и выбору технических решений при адаптации буровых работ к изменяющимся условиям на карьерах 89

В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

- Зубков А.В.** Климатические и геомеханические проблемы на Земле, вызванные изменением космической погоды 105
- Флягин А.С., Федоров Е.В.** Применение эмульсионных взрывчатых веществ при взрывании ледяных покровов 116

**Уважаемые читатели,
авторы нашего журнала,
члены редакционной коллегии и совета!**

*От всей души поздравляю всех
с наступающим Новым 2024 годом
и выражаю глубокую признательность
за вклад каждого из вас в развитие нашего журнала!*

Мы многое сделали вместе в уходящем году!

*Подготовка и рецензирование статей, редакторская
работа, творческие споры в поиске истины, активное общение – все это
было интенсивным и содержательным. Очень надеюсь, что и в дальнейшем
мы будем так же активно сотрудничать. Это прежде всего будет
способствовать росту востребованности нашего издания. Пусть ваши
научные труды принесут большую пользу стране и обществу, а наш журнал
будет авторитетной площадкой для партнерства, дискуссий, обмена
опытом, плодотворного сотрудничества!*

*Выражаю искреннюю благодарность дружной команде журнала за
созидательный труд, профессионализм, упорство и преданность общему
делу, которые доставляют удовольствие от проделанной работы!*

*Позвольте пожелать вам крепкого здоровья, творческого вдохновения,
энергии и оптимизма в реализации всех ваших идей и проектов!*

*Пусть наступающий Новый год станет годом новых неординарных мыслей и
наполнит вашу жизнь актуальными и востребованными результатами
исследований.*

Счастья и успехов в новом году!

Главный редактор

Копилков С.В.



**ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

УДК 622.273.132:622.646

Смирнов Алексей Алексеевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, Екатеринбург,
Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: geotech@igduran.ru

Барановский Кирилл Васильевич
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: geotech@igduran.ru

Дьячков Павел Сергеевич
младший научный сотрудник,
лаборатория подземной геотехнологии,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: dyachkov@igduran.ru

СИСТЕМА ПОДЭТАЖНОГО ОБРУШЕНИЯ С ТОРЦОВЫМ ВЫПУСКОМ ДЛЯ ВЫЕМКИ ЦЕЛИКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ПОЛОГИХ РУДНЫХ ТЕЛ*

Аннотация:

На основании разработанной методики и программы выполнены расчеты оптимальных параметров выработок выпуска при применении подэтажного обрушения с торцовым выпуском для выемки пологих рудных залежей небольшой мощности. Для снижения потерь и разубоживания руды необходимо углубление выработок выпуска в лежачий бок, причем рациональная величина этого углубления определяется размерами обрабатываемых секций. Целесообразно производить предварительный выпуск пустых пород лежачего бока из нижней части выпускных траншей с транспортировкой пород в отвал или в отработанные камеры. Показано, что в рассматриваемых условиях следует использовать комбинированную систему с первоначальной выемкой камер, а подэтажное обрушение применять только для отработки целиков. При добыче бедных руд цветных и черных металлов использование комбинированной системы в указанных условиях позволяет обеспечить приемлемый уровень потерь (7 – 10 %) и разубоживания (10 – 15 %) руды.

Ключевые слова: система подэтажного обрушения, торцовый выпуск руды, угол истечения сыпучего материала, потери, разубоживание, достаточная выработка, траншея.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.006

Smirnov Alexey A.
Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining of Ural Branch of the RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.,
e-mail: geotech@igduran.ru

Baranovskiy Kirill V.
Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
e-mail: geotech@igduran.ru

Dyachkov Pavel S.
Junior Researcher,
Laboratory of underground geotechnology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: dyachkov@igduran.ru

SUBLEVEL CAVING SYSTEM WITH FRONTAL ORE DRAWING FOR EXCAVATING PILLARS OF SLOPING ORE DEPOSITS

Abstract:

Based on the developed methodology and program, calculations were made for the optimal parameters of the ore drawing workings when using sublevel caving with a frontal ore drawing for the extraction of sloping ore deposits of small thickness. To reduce losses and dilution of ore, it is necessary to deepen the ore drawing workings into the lying side, and the rational level of this deepening is determined by the size of the mined sections. It is advisable to apply preliminary lying side waste rock drawing from the lower part of the trenches with transportation of the rocks to the dump or to the open stopping. It is shown that in the conditions under consideration, a combined mining system with the first-stage extraction by open stopping should be used, and sublevel caving should be used only for pillars mining. At mining low-grade ores of non-ferrous and ferrous metals, the use of a combined mining system under the specified conditions makes it possible to ensure an acceptable level of losses (7 – 10 %) and dilution (10 – 15 %) of ore.

Key words: sublevel caving system, frontal ore drawing, bulk material flow angle, losses, dilution, sufficient production, trench.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания Минобрнауки №075-00412-22 ПР. Тема 1. FUWE-2022-0005.

Введение

Подэтажное обрушение с торцовым выпуском руды широко применяется для отработки крутопадающих или мощных рудных тел при вертикальном расположении подэтажей друг над другом. В этом случае выработки выпуска, как правило, проходят по руде, которая включается в общий объем добычи рудника. Однако в определенных условиях данную систему целесообразно применять для отработки пологозалегающих рудных тел небольшой мощности относительно бедных руд, где использование более затратных систем разработки экономически неэффективно. При этом в пределах рудной залежи располагается один подэтаж. Строго говоря, термин «подэтаж» в данном случае неточен, но его использование позволяет исключить описание этой известной системы разработки. В статье рассматривается выемка пологих рудных залежей мощностью 10 - 25 м.

Расчеты показывают, что в данных условиях сплошная выемка залежи подэтажным обрушением неэффективна из-за высоких потерь и разубоживания руды (табл. 1). В расчетах принята минимальная (по условию устойчивости целика между выработками выпуска) ширина секции; при увеличении этой ширины возрастают и потери.

Таблица 1

Потери и разубоживание при традиционном варианте подэтажного обрушения

Ширина секции, м	12,5	12,5	12,5	12,5
Мощность залежи, м	10	15	20	25
Потери при выпуске, %	55,2	40,2	29,76	21,0
Разубоживание, %	36,9	26,4	22,9	21,98

Вследствие этого перспективно применение комбинированной системы разработки, включающей первоочередную выемку камер, принудительное обрушение висячего бока и отработку междукамерных целиков (МКЦ) системой подэтажного обрушения [1 – 3]. Особенности торцового выпуска руды при системе подэтажного обрушения описаны в работах отечественных и зарубежных исследователей [4 – 9]. С учетом этих особенностей разработана методика определения показателей извлечения руды при торцовом выпуске [10, 11], составлен алгоритм и компьютерная программа расчета потерь и разубоживания руды. Для рассматриваемой комбинированной системы разработки актуальная задача – определение рациональных параметров выработок выпуска, что и является целью приведенных в статье исследований.

Теоретические подходы и результаты исследований

Горизонтальные размеры камер и целиков задаются напряженно-деформированным состоянием (НДС) горного массива и в рассматриваемых нами случаях изменяются в пределах от 10 до 20 м. На данном этапе потери и разубоживание руды определялись для выемки целиков между заполненными камерами по условию полного извлечения запасов целика при мощности залежи 10 – 25 м.

При расположении выработок выпуска в пределах рудного тела (по лежащему боку) потери руды достаточно высоки даже с учетом малых потерь в камерах (табл. 2).

Логичным решением является углубление доставочных выработок, в том числе траншеи выпуска, в лежащий бок. Естественно, что при этом возрастают затраты на проходку этих выработок по породе, вернее на дальнейшее перемещение породы, а частично и на ее переработку. Актуальной задачей становится определение оптимальных параметров расположения и размеров выработок выпуска при комбинированной системе. При этом определяющим фактором являются показатели извлечения руды при выемке целиков.

Таблица 2

Потери и разубоживание руды по добычному блоку при расположении выработок выпуска в рудном теле

Мощность залежи, м	10	15	20	25
Междукамерный целик				
Ширина МКЦ, м	8	12	16	20
Потери %	37,55	46,05	49,79	52,19
Разубоживание, %	2,79	0	0	0
Междупанельный целик (МПЦ)				
Ширина МПЦ, м	24	24	24	24
Потери, %	77,40	69,61	66,53	60,16
Разубоживание, %	0	0	0	0
Камера				
Ширина камеры, м	8	12	16	20
Потери, %	3,82	2,56	1,92	1,60
Разубоживание, %	3,82	2,56	1,92	16,0
Всего по блоку				
Потери, %	34,30	35,18	35,02	34,88
Разубоживание, %	3,26	1,48	1,12	1,06

При торцовом выпуске руды существует тесная связь между параметрами полойной отбойки, степенью уплотнения отбитой руды и процессом истечения горной массы, который характеризуется углом наклона потока к горизонту [10, 11]. График изменения угла истечения достаточно хорошо раздробленной горной породы в зависимости от ее разрыхления показан на рис. 1.

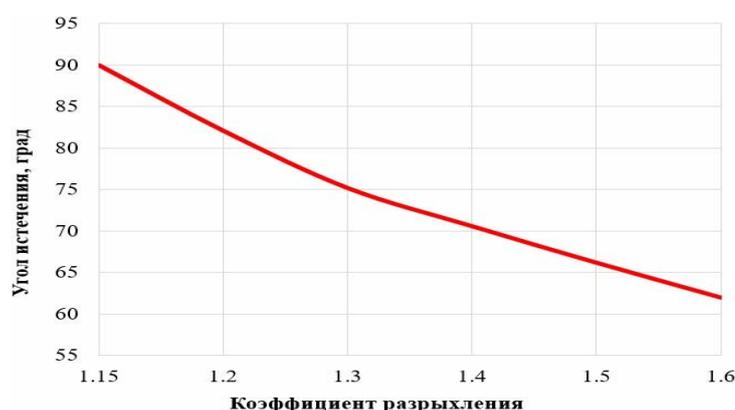


Рис. 1. Зависимость угла истечения раздробленной горной породы от коэффициента ее разрыхления

Из практики применения одностадийных систем разработки (с взрыванием руды в зажиме) известно, что при коэффициенте разрыхления 1,15 - 1,25 отбитая руда теряет свойство сыпучести, что наглядно подтверждается на графике (при $\beta = 90^\circ$ течения сыпучего материала не происходит). В реальных условиях угол истечения материала находится в пределах $65 - 80^\circ$, что подтверждается исследованиями как ИГД УрО РАН [11], так и других ученых [12, 13].

Интенсивность истечения руды и параметры ее потока в значительной степени зависят от площади активного сечения на уровне кровли доставочной выработки. При отгрузке руды погрузо-доставочными машинами ширина активного сечения может быть принята равной ширине выработки. Глубина сечения зависит от глубины внедрения ковша машины (1,5 – 2 м). Принято, что для свободного истечения руды величина минимального сечения потока должна быть в пять – семь раз больше максимального размера выпускаемых кусков. За застревание руды при выпуске ответственны не все ее куски, а только наиболее крупная их часть, которая ориентировочно может быть охарактеризована как средняя между средневзвешенным размером куска всей руды и величиной принятого негабаритного куска и даже в случае качественного дробления при взрыве равна 0,4 – 0,5 м. Вследствие этого в выпускном отверстии периодически возникают зависания, которые ликвидируются или подбором навала руды, или непосредственным воздействием ковша машины на зависание. В соответствии с исследованиями [16, 17] частота этих зависаний при средней кусковатости руды составляет 1/7 – 10 м³. Величина подбора навала руды ограничивается положением ковша машины под козырьком выпускного отверстия, откос руды в этом случае примерно равен 45°, и максимальная глубина активного сечения равна высоте выработки доставки (3,5 – 4 м). То есть в процессе выпуска эта глубина будет пульсировать в пределах 1,5 – 4 м (в среднем 2,75 м).

Для свободного истечения руды необходимо максимально возможное расширение потока, что достигается уменьшением угла истечения за счет наибольшего разрыхления материала в пределах выпускной траншеи. Такое разрыхление происходит за счет высыпания части материала в доставочную выработку. В таком случае минимальные размеры траншеи определяются исходя из допущения, что коэффициент разрыхления материала (K_p) в свободной засыпке равен 1,5.

$$(Q_{\text{тр}} + Q_{\text{комп}})/Q_{\text{тр}} \geq 1,5, \quad (1)$$

где $Q_{\text{тр}}$ – объем траншеи на толщину отбиваемого слоя (d), м³,

$Q_{\text{комп}}$ – компенсационный объем, м³.

$$Q_{\text{комп}} = abd, \text{ м}^3, \quad (2)$$

где a и b – ширина и высота доставочной выработки, м.

Взрывом зарядов веера скважин зажимающая порода уплотняется, и отбиваемый слой разрыхляется примерно до величины 1,33. Нижняя часть отбиваемого слоя руды при взрыве выбрасывается в выработку. При этом фронтального уплотнения породы в нижней части слоя (траншеи) не происходит. Высота этой части примерно равна Л.Н.С., или толщине слоя. Принимается, что выше величина фронтального уплотнения породы монотонно увеличивается и на уровне верхнего сечения траншеи достигает максимума. Вследствие этого компенсационный объем, на который расширяется отбиваемый слой в пределах траншеи, несколько увеличивается. За счет компенсации часть материала выше траншеи при взрыве перемещается вниз и также разрыхляется. Коэффициент разрыхления этой части материала над кровлей выработки также можно принять равным 1,5, а угол истечения материала равным 66,2°. Над разрыхленной частью располагается более уплотненный материал ($K_p = 1,33$), угол истечения которого принят 73,5°. Условный переход (высота над кровлей доставочной выработки) от $K_p = 1,33$ к $K_p = 1,5$ зависит от размеров выработок выпуска и в свою очередь определяет показатели извлечения руды.

Степень заглубления доставочных выработок в лежащий бок зависит от горно-геологических условий и технологических параметров. В то же время такое заглубление существенно влияет на показатели извлечения руды, поэтому практический интерес представляет определение его рациональной величины. На данном этапе исследо-

ваний потери и разубоживание руды рассчитывались для случая выемки целиков между заполненными камерами по условию полного извлечения запасов целика при мощности залежи 20 м.

При расположении доставочной выработки непосредственно под рудным телом при небольшой ширине целика (10 – 12 м) потери руды целика составляют 10 – 18 % при разубоживании 20 – 28 %, что для комбинированной системы является вполне приемлемым. Однако при увеличении ширины целика потери его запасов существенно возрастают примерно до 40 % (рис. 2). При этом показатели извлечения руды заметно зависят от ширины доставочной выработки.

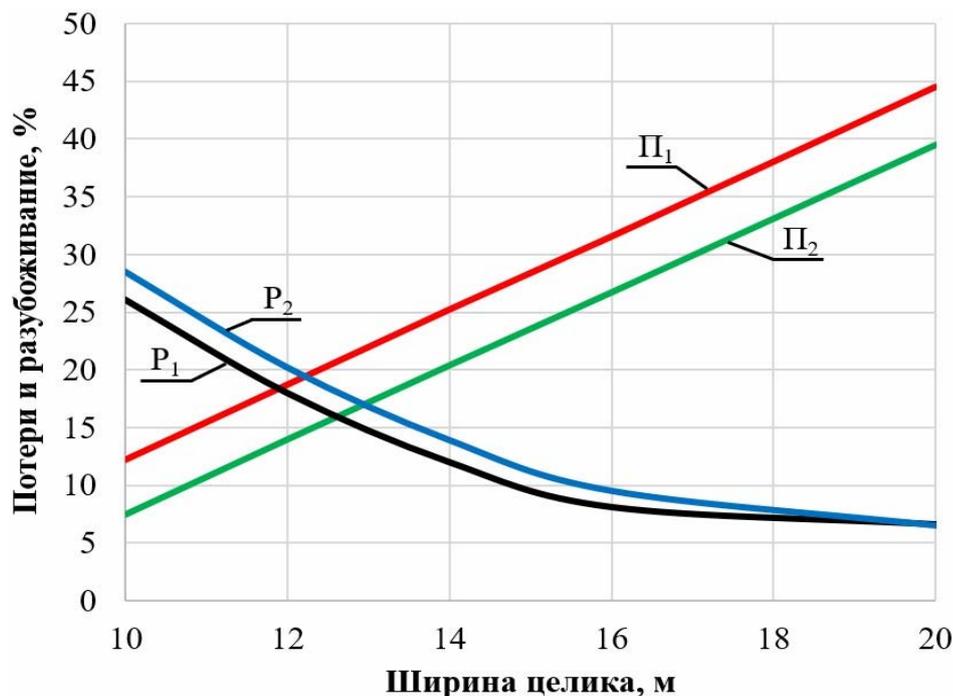


Рис. 2. Зависимость потерь (П) и разубоживания (Р) руды от ширины целика и ширины доставочной выработки:

П₁, P₁ – при ширине выработки 4 м; П₂, P₂ – при ширине выработки 5 м

Вследствие этого при относительно большой ширине целика целесообразно углубление выработок выпуска (в том числе траншеи) на большую величину. При этом возможен предварительный выпуск пустой породы из нижней части траншеи без смешивания с рудой, что позволяет существенно снизить разубоживание. Результаты расчетов для ширины целика шириной 12 – 20 м приведены в табл. 3. Величина предварительного выпуска породы представлена как отношение ее объема ($Q_{\text{пор}}$) к объему эксплуатационных запасов ($Q_{\text{эсп.}}$).

Очевидно, что существует предельная величина углубки, превышение которой не приводит к увеличению извлечения руды из целика. Расчеты показали, что эта величина прямо пропорциональна ширине целика и равна примерно 1,1 ширины целика. Надо отметить, что практически вряд ли целесообразно увеличивать величину углубки более 15 – 17 м вследствие существенного повышения объема выемки пустых пород.

Минимальный угол наклона образующих траншеи можно принять равным 40° (при меньших углах трудно установить буровой станок в выработке). Максимальный угол наклона определяется минимальным углом истечения горной массы и может быть принят равным 65°. Причем угол раствора траншеи мало влияет на показатели извлечения руды и на величину предварительного выпуска породы (табл. 4).

Таблица 3

**Показатели извлечения руды в зависимости от величины углубки
выработок выпуска в лежащий бок**

Величина углубки по подошве выработки, м	Потери, %	Разубоживание, %	$Q_{\text{пор}}/Q_{\text{экср}}, \%$
МКЦ-12 м, В – 4 м			
4	18,7	18,0	0
8	9,7	24,9	10,2
12	1,5	29,6	21,3
16	0	35,6	32,1
МКЦ-12 м, В – 5 м			
4	13,9	20,2	0
8	7,0	23,3	11,7
12	0	31,5	24,4
МКЦ-16 м, В – 4 м			
4	31,7	8,1	0
8	20,5	11,8	10,2
12	9,9	14,1	21,3
16	2,2	18,3	32,1
МКЦ-16 м, В – 5 м			
4	26,7	9,5	0
8	17,2	13,6	11,7
12	7,4	15,5	24,4
16	0,6	19,3	36,0
МКЦ-20 м, В – 4 м			
4	44,5	6,6	0
8	31,0	5,6	10,2
12	19,9	4,6	21,3
16	10,3	3,3	32,1
МКЦ-20 м, В – 5 м			
4	39,4	6,4	0
8	28,3	6,2	11,7
12	16,0	5,2	24,3
16	8,0	4,6	32,1

Примечание: Принятая величина углубки соответствует расстоянию от подошвы выработки до рудного тела

Таблица 4

**Влияние угла раствора траншеи на показатели извлечения руды
при ширине целика 14 м и величине углубки 8 м**

Угол раствора траншеи, град	40	45	50	55	60	65
Потери, %	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96	14,96
Разубоживание, %	14,34	14,25	14,18	14,13	14,08	14,03
$Q_{\text{пор}}/Q_{\text{экср}}, \%$	10,56	10,57	10,58	10,59	10,60	10,60

Для уменьшения объема отбойки породы раствор траншеи наиболее целесообразно принимать равным 60° вне зависимости от ширины целика и глубины углубки

выработок выпуска в лежащий бок. В этом случае часть потерь руды может оставаться в виде целиков на лежащем боку.

Несколько неожиданным выглядит некоторое улучшение показателей извлечения руды при уменьшении высоты доставочной выработки. Но этот параметр изменяется в небольших пределах и в основном зависит от габаритов применяемого оборудования.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что при отработке пологих рудных тел выемка целиков подэтажным обрушением с торцовым выпуском при комбинированной системе разработки позволяет обеспечить вполне приемлемый уровень извлечения руды при рациональных размерах выработок выпуска и оптимальной величине их углубления в лежащий бок.

Применяемая методика и программа позволяют определить потери и разубоживание руды при торцовом выпуске в зависимости от всего комплекса изменяющихся параметров расположения как обрабатываемых секций (целиков), так и выработок выпуска. На данном этапе расчеты ограничивались условием выемки всех балансовых запасов целиков. Но в дальнейшем на этой основе возможно обоснование оптимального соотношения потерь и разубоживания руды, что потребует учета показателей обогащения и расчета экономической эффективности использования комбинированной системы разработки для выемки пологих рудных залежей небольшой мощности.

Заключение

1. При добыче бедных руд цветных и черных металлов использование комбинированной системы разработки с выемкой целиков подэтажным обрушением с торцовым выпуском для отработки пологих месторождений небольшой мощности позволяет обеспечить приемлемый уровень потерь (7 – 10 %) и разубоживания (10 – 15 %) руды.

2. Для получения приемлемого уровня показателей извлечения руды выработки выпуска должны располагаться в лежащем боку, причем степень их углубки зависит от размеров целиков и определяет значение потерь и разубоживания руды.

3. Угол наклона образующих траншеи выпуска практически не влияет на потери и разубоживание руды. Для снижения объема взрывааемых пород рекомендуется принимать угол раствора траншеи равным 60° при возможном его значении в интервале $40 - 65^\circ$.

4. Существенное снижение потерь руды происходит при увеличении ширины доставочной выработки, поэтому рекомендуется ее максимально возможное по горно-геологическим условиям расширение.

5. Значительное уменьшение разубоживания (иногда вдвое) достигается при предварительном выпуске пустых пород лежащего бока из нижней части траншеи и их транспортировке в отвал или в отработанные камеры.

Список литературы

1. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Никитин И.В., Криницын Р.В., 2021. Обоснование конструкции и параметров комбинированной системы разработки пологой залежи бедных комплексных руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 – 1, С. 88–104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88.

2. Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., Соломеин Ю.М., 2022. Исследование влияния показателей извлечения на эффективность подземной отработки месторождений бедных комплексных руд. *Горная промышленность*, № 1S, С. 46 – 52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52.

3. Соколов И.В., Антипин Ю.Г., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., 2022. Пути повышения эффективности подземной разработки пологих месторождений

бедных комплексных руд. *Проблемы недропользования*, № 4 (35), С. 33 – 43. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.033.

4. Стажевский С.Б., 1996. Об особенностях течения раздробленных горных пород при добыче руд с подэтажным обрушением. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*, № 5, С. 72 – 89.

5. Русин Е.П., Стажевский С.Б., 2017. О современном состоянии и перспективах шведского варианта системы добычи руд с подэтажным обрушением. *Сборник материалов XIII Международного научного конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017»*, Т. 2, С. 112 – 116.

6. Janelid I., 1972. Study of the gravity flow process in sublevel caving. *Proceedings of the International Sublevel Caving Symposium, Atlas Copco, Stockholm*, pp. 25 – 27.

7. Kvapil R., Hartman L., 1992. Sublevel caving: SME mining engineering handbook. *Society of Mining, Metallurgy and Explorations*, pp. 1789 – 1814.

8. Lapčević V., Torbica S., 2017. Numerical Investigation of Caved Rock Mass Friction and Fragmentation Change Influence on Gravity Flow Formation in Sublevel Caving. *Minerals*, V. 7 (56), pp. 1 – 18. DOI: 10.3390/min7040056

9. Lapčević V., Torbica S., Asadzadeh M., Đokić N., Duranović M., Petrović M., 2018. Influence of boundary conditions in DEM models of sublevel caving on dilution and recovery. *Podzemni radovi*, № 33. pp. 1 – 15. DOI: 10.5937/PodRad1833001L

10. Смирнов А.А., Барановский К.В., 2022. Критический анализ теоретических положений по выпуску руды под обрушенными породами. *Проблемы недропользования*, № 3 (34), С. 136 – 145. DOI: 10.25635/2314-1586.2022.03.136

11. Смирнов А.А., Барановский К.В., Рожков А.А., Никитин И.В., 2023. Определение рациональных параметров технологии с обрушением и торцовым выпуском руды в условиях северных регионов России. *Известия вузов. Горный журнал*, № 6, DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-...-...

12. Лукичев С.В., Лаптев В.В., 2019. Изучение механизма истечения руды при торцевом выпуске на основе численного моделирования поведения горной массы с неоднородным гранулометрическим составом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11 (специальный выпуск 37), С. 214 – 223. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-214- 223.

13. Лаптев В.В., Лукичев С.В., 2023. Использование метода дискретных элементов для исследования механизма формирования потерь руды применительно к условиям торцевого выпуска. *Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых*. № 4, С. 52 – 29. DOI: 10.15372/FTPRPI20230406

14. Жиронкин А.Ф., Денисов Е.М., Щелканов В.А., 1967. *Совершенствование конструкции днищ блоков и средства механизации выпуска, доставки и погрузки руды при системах с массовым обрушением на железных рудниках Среднего Урала. Одностадийная выемка в мощных рудных месторождениях*. Москва: Наука.

15. Корнев Г.Н., 1967. К вопросу об определении пульсаций и давления при истечении дискретного материала. *Совершенствование методов подземной разработки рудных месторождений*. Кольский филиал АН СССР. Ленинград: ЛО «Наука», С.121 - 125.

References

1. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Nikitin I.V., Krinitsyn R.V., 2021. Obosnovanie konstruktсии i parametrov kombinirovannoi sistemy razrabotki pologoï zalezhi bednykh kompleksnykh rud [Substantiation of the design and parameters of the combined system for the development of a shallow deposit of poor complex ores]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 1, P. 88–104. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-51-0-88.

2. Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., Solomein Yu.M., 2022. Issledovanie vliyaniya pokazatelei izvlecheniya na effektivnost' podzemnoi otrabotki

mestorozhdenii bednykh kompleksnykh rud [Investigation of the effect of extraction indicators on the efficiency of underground mining for deposits of poor complex ores]. *Gornaya promyshlennost'*, № 1S, P. 46 – 52. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-46-52.

3. Sokolov I.V., Antipin Yu.G., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., 2022. Puti povysheniya effektivnosti podzemnoi razrabotki pologikh mestorozhdenii bednykh kompleksnykh rud [Ways to increase the efficiency of underground mining of shallow deposits of poor complex ores]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4 (35), S. 33 – 43. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.033.

4. Stazhevskii S.B., 1996. Ob osobennostyakh techeniya razdroblennykh gornykh porod pri dobyche rud s podetazhnym obrusheniem [On the peculiarities of the flow of fragmented rocks during the extraction of ores with a sublevel collapse]. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, № 5, P. 72 – 89.

5. Rusin E.P., Stazhevskii S.B., 2017. O sovremennom sostoyanii i perspektivakh shvedskogo varianta sistemy dobychi rud s podetazhnym obrusheniem [About the current state and prospects of the Swedish version of the ore mining system with a sublevel collapse]. *Sbornik materialov XIII Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa "Interespo GEO-Sibir'-2017"*, V. 2, P. 112 – 116.

6. Janelid I., 1972. Study of the gravity flow process in sublevel caving. *Proceedings of the International Sublevel Caving Symposium, Atlas Copco, Stockholm*, pp. 25 – 27.

7. Kvapil R., Hartman L., 1992. Sublevel caving: SME mining engineering handbook. *Society of Mining, Metallurgy and Explorations*, pp. 1789 – 1814.

8. Lapčević V., Torbica S., 2017. Numerical Investigation of Caved Rock Mass Friction and Fragmentation Change Influence on Gravity Flow Formation in Sublevel Caving. *Minerals*, V. 7 (56), pp. 1 – 18. DOI: 10.3390/min7040056

9. Lapčević V., Torbica S., Asadizadeh M., Đokić N., Duranović M., Petrović M., 2018. Influence of boundary conditions in DEM models of sublevel caving on dilution and recovery. *Podzemni radovi*, № 33, pp. 1 – 15. DOI: 10.5937/PodRad1833001L

10. Smirnov A.A., Baranovskii K.V., 2022. Kriticheskii analiz teoreticheskikh polozhenii po vypusku rudy pod obrushennymi porodami [Determination of rational parameters of the technology with collapse and face ore release in the conditions of the northern regions of Russia]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 3 (34), P. 136 – 145. DOI: 10.25635/2314-1586.2022.03.136

11. Smirnov A.A., Baranovskii K.V., Rozhkov A.A., Nikitin I.V., 2023. Opredelenie ratsional'nykh parametrov tekhnologii s obrusheniem i tortsovim vypuskom rudy v usloviyakh severnykh regionov Rossii [Determination of rational parameters of the technology with collapse and face ore release in the conditions of the northern regions of Russia]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, № 6, DOI: 10.21440/0536-1028-2023-6-...-..

12. Lukichev S.V., Laptev V.V., 2019. Izuchenie mekhanizma istecheniya rudy pri tortsevom vypuske na osnove chislennogo modelirovaniya povedeniya gornoj massy s neodnorodnym granulometricheskim sostavom [Study of the mechanism of ore outflow during end discharge based on numerical modeling of the behavior of a rock mass with an inhomogeneous granulometric composition]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, № 11 (spetsial'nyi vypusk 37), P. 214 – 223. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-214- 223.

13. Laptev V.V., Lukichev S.V., 2023. Ispol'zovanie metoda diskretnykh elementov dlya issledovaniya mekhanizma formirovaniya poter' rudy primenitel'no k usloviyam tortsevogo vypuska [Use of the method of specific elements to study the mechanism of formation of ore losses in relation to the conditions of end discharge]. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh*. № 4, P. 52 – 29. DOI: 10.15372/FTPRPI20230406

14. Zhironkin A.F., Denisov E.M., Shchelkanov V.A., 1967. Sovershenstvovanie konstruksii dnishch blokov i sredstva mekhanizatsii vypuska, dostavki i pogruzki rudy pri sistemakh s massovym obrusheniem na zheleznykh rudnikakh Srednego Urala. *Odnostadiinaya*

vyemka v moshchnykh rudnykh mestorozhdeniyakh [Improvement of the design of block bottoms and means of mechanization of ore release, delivery and loading in systems with massive collapse in the iron mines of the Middle Urals]. Moscow: Nauka.

15. Kornev G.N., 1967. K voprosu ob opredelenii pul'satsii i davleniya pri istechenii diskretnogo materiala. Sovershenstvovanie metodov podzemnoi razrabotki rudnykh mestorozhdenii [On the issue of determining pulsations and pressure at the expiration of discrete material]. Kol'skii filial AN SSSR. Leningrad: LO "Nauka", P.121 – 125.



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

УДК 622:519.87

Антонов Владимир Александрович
главный научный сотрудник,
доктор технических наук,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58.
e-mail: Antonov@igduran.ru

СМЫСЛОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ФАКТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Аннотация:

Изложена методология построения и смысловой интерпретации функционально-факторных моделей экспериментально наблюдаемых геомеханических явлений горного производства. Методология включает структуру моделирования и приемы смысловой интерпретации наиболее востребованных в научных исследованиях двумерных моделей, рассчитываемых компьютерной программой "Тренды ФСП-1" и содержащих одну или две степенные или экспоненциальные функции, сопряженные с постоянной составляющей или наклонной асимптотой. В приемах смысловой интерпретации моделей учитывается влияние причинных факторов – воздействующих обстоятельств и процессов геомеханического явления, приводящих при росте аргумента к подъему или спаду его зависимой величины. Особенности ее изменений выражаются модельными параметрами соответствующих факторных функций, дающими конкретное представление – как круто или полого и во сколько раз они увеличиваются или уменьшаются при росте аргумента на обусловленный интервал. Сформулированное таким образом описание изменений зависимой величины, характеризуемых влиянием причинных факторов, функциональными параметрами и коэффициентами, составляет суть обнаруженных новых знаний об исследуемом явлении. В качестве иллюстрации смысловой интерпретации моделей приведены пять практических примеров экспериментальных геомеханических исследований. На примерах показано, что по данной методологии достигается главная их цель – установить и объяснить закономерности становления и развития наблюдаемого явления. Смысловая интерпретация модели, сформулированная по аналогии с приведенными примерами, может составить защищаемое научное положение в диссертационном исследовании.

Ключевые слова: геомеханическое явление горного производства, данные эксперимента, влияющие факторы, математическая функциональная модель, смысловая интерпретация.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.017

Antonov Vladimir A.
Chief Researcher
Doctor of Engineering Sciences,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: Antonov@igduran.ru

SEMANTIC INTERPRETATION OF FUNCTIONAL-FACTORY MODELS OF GEOMECHANICAL PHENOMENA

Abstract:

The paper concerns the methodology of construction and semantic interpretation of functional-factorial models of experimentally observed geomechanical phenomena in mining. The methodology includes the structure of modeling and methods of semantic interpretation of the two-dimensional models most in demand in scientific research, calculated by the computer program "FSP-1 Trends" and containing one or two power or exponential functions associated with a constant component or an oblique asymptote. In the methods of semantic interpretation of models, the influence of causal factors is taken into account – the influencing circumstances and processes of the geomechanical phenomenon, leading, with the growth of the argument, to the rise or fall of its dependent value. The features of such changes are expressed by the model parameters of the functions, which give a specific idea – how steep or flat and how many times they increase or decrease with the growth of the argument by a specified interval. The description of changes in the dependent value formulated in this way, characterized by the influence of causal factors, functional parameters and coefficients, is the essence of the discovered new knowledge about the phenomenon under study. As an illustration of the semantic interpretation of the models, five practical examples of experimental geomechanical studies are given. The examples show that this methodology achieves their main goal – to establish and explain the patterns of formation and development of the observed phenomenon. The semantic interpretation of the model, formulated by analogy with the examples given, can constitute a defended scientific position in dissertation research.

Key words: geomechanical phenomenon of mining, experimental data, influencing factors, mathematical functional model, semantic interpretation.

Введение

Исследования геомеханических явлений напряженно-деформированного состояния сложных по структуре и составу массивов горных пород и техногенных объектов горного производства проводятся для оценки и прогнозирования степени безопасности ведения горных работ и содержания отмеченных объектов [1, 2]. Они осуществляются чаще всего эмпирическими методами на основе результатов натуральных измерений или имитационно-численных экспериментов. Методологическим приемом исследований традиционно остается моделирование геомеханических процессов по данным, полученным в опытах и экспериментах [3 – 5]. Цель моделирования состоит в раскрытии и понимании их связей, извлечении из них новых знаний о геомеханических процессах, дающих целостностное представление о состоянии и закономерностях развития наблюдаемого геомеханического явления.

Отмеченный подход к моделированию и достижению его цели в большинстве экспериментальных исследований в полной мере не реализуется из-за недостатка соответствующего методологического и математического обеспечения. Чаще всего исследования ограничиваются, к сожалению, лишь уровнем вербального толкования локальных особенностей графиков зафиксированных значений геомеханических величин либо уровнем их формально-статистической аппроксимации моделями регрессии, содержащимися в широко распространенной компьютерной программе "Microsoft Excel". Однако математические выражения полученных моделей, например, полиномиальных, остаются лишь формулами, поскольку не имеют смысловой интерпретации, т.е. не отражают физическую суть исследуемых механических процессов [6, 7]. Очевидно, что здесь требуется не формальная аппроксимация экспериментальных данных, а учет содержательной информации о геомеханическом процессе, раскрывающей характерные свойства их связей.

В данной статье приведены результаты методологических исследований в отмеченном направлении. Рассмотрена содержательная структура и смысловая интерпретация наиболее востребованных в научных исследованиях двумерных функционально-факторных степенных и экспоненциальных математических моделей, раскрывающих характерные особенности связей экспериментально наблюдаемого геомеханического явления.

Структура моделирования и интерпретации

Содержательный анализ связей и свойств экспериментальных данных осуществляется по методологии нелинейного функционально-факторного моделирования [8], развитой в Институте горного дела УрО РАН. Основная ее суть состоит в формировании моделей наблюдаемых явлений математическими функциями, описывающими особенности изменения данных эксперимента по принципу учета влияющих факторов, т.е. воздействующих причинных обстоятельств и процессов геомеханического явления. Структура функционально-факторного моделирования геомеханических процессов и явлений приведена в табл. 1. Действие каждого причинного фактора, приводящее по мере роста аргументов – независимых величин – к монотонному увеличению или уменьшению зависимой физической величины, выражается математической функцией. Оптимальные параметры функций, например, показатели степени, рассчитываются и определяются специально разработанным методом приближений параболической вершины (МППВ) [9] как рациональные числа (дробные, положительные, отрицательные) по критерию наилучшего приближения модели к данным эксперимента.

Наиболее востребованы в научных геомеханических исследованиях двумерные функционально-факторные модели с постоянной составляющей и степенными или экспоненциальными функциями, отображающие деформационные и динамические процессы, происходящие в массивах горных пород и объектах инженерной инфраструктуры. Расчет и построение таких моделей реализуется компьютерной программой "Трен-

ды ФСП-1" [10] (тренды функционально-факторные с самоопределяющимися параметрами). Построенные модели имеют повышенный коэффициент детерминации, указывающий на их близкое приближение к данным эксперимента. Однако широкое их применение в научных исследованиях сдерживается, поскольку без смысловой интерпретации они остаются по-прежнему лишь формальными.

Таблица 1

Структура функционально-факторного моделирования и интерпретации

Вид геомеханического явления	Аргументы модели	Влияющие факторы	Смысловая Интерпретация модели
Формирование и пространственно-временное развитие напряженно-деформированного состояния приконтурного горного массива	Геопространственные и временные координаты	Изменяющиеся в пространстве и времени деформационные, структурные и другие свойства горного массива	Функциональное описание и пояснение характерных особенностей становления и развития напряженно-деформированного состояния горного массива
Изменение напряженно-деформированного состояния горных техногенных объектов	Конфигурационные и технологические параметры техногенных объектов	Изменяющиеся режимы горных работ и сопутствующих геомеханических процессов	Функциональное описание и пояснение напряженно-деформированного состояния техногенных объектов
Изменение зависимой физической величины, характеризующей геомеханические свойства горных пород и массивов	Независимые физические величины геомеханического явления	Процессы и механизм причинного изменения зависимой величины	Функциональное описание и пояснение особенностей связи зависимой величины с аргументами

Под смысловой интерпретацией понимается пояснение свойств исследуемого геомеханического явления по полученной модели в следующих трех аспектах:

– указать причинный процесс (фактор), влияющий на общее или локальное изменение зависимой физической величины геомеханического явления (рост или спад ее значений);

– дать разъяснение – как модельные параметры отображают характерные особенности изменения зависимой величины геомеханического явления, происходящего под влиянием факторов при росте аргумента;

– отметить уровень достоверности модели, т.е. ее погрешность в обусловленном доверительном интервале.

Влияющий фактор определяется из теоретических или экспериментальных представлений о природе, источнике причинного обстоятельства или процесса, изменяющего физическую величину наблюдаемого явления при разных значениях аргумента в каждом конкретном исследовании. Причинными факторами могут быть, например, изменяющиеся в геопространственных координатах свойства горных пород (упругость, пластичность, трещиноватость и т.д.), а также наличие их неоднородной структуры или переменного влияния на результаты экспериментальных наблюдений конфигурации и ориентиров горной выработки.

Особенности криволинейного функционального изменения зависимой величины выражаются значениями содержащихся в моделях параметров, которые дают четкое представление – как круто или полого и во сколько раз функции увеличиваются или

уменьшаются при росте аргумента на обусловленный интервал. При этом изменение функции может быть выпуклым или вогнутым. Если провести прямую линию, соединяющую две точки ее графика, построенного в правосторонней системе координат в пределах одной монотонности, то при расположении прямой над графиком он считается выпуклым вниз или просто выпуклым. Если прямая линия окажется под графиком, то он (с выпуклостью вверх) считается вогнутым. При наличии двух противоположных монотонностей в данных эксперимента график зависимой величины в построенной модели может иметь перегиб или экстремум.

Характерные особенности моделируемого изменения зависимой величины содержатся также в толковании коэффициента A , умножаемого на факторную функцию, и постоянной составляющей B . Наличие ее в модели свидетельствует о смещенной относительности исследуемого геомеханического процесса, когда существует начальное (фоновое) или асимптотическое значение зависимой физической величины. По мере роста аргумента факторная функция удаляется или приближается к нему. В частном случае отсутствия смещенной относительности $B=0$. Если по смыслу исследуемого процесса необходимо исключить влияние постоянной составляющей, то построение модели проводится по смещенным данным эксперимента на интервал x_0 или y_0 .

Уровень достоверности модели может быть выражен относительной ее погрешностью или среднеквадратичным отклонением зависимой величины от данных эксперимента. Поскольку они тоже зарегистрированы со случайным разбросом воспроизводимости, то достоверной является модель, погрешность которой соизмерима с погрешностью эксперимента.

Интерпретация моделей, содержащих степенные функции

Рассмотрим модели, описывающие изменение зависимой величины y постоянной составляющей B и одной или двумя степенными функциями вида Ax^μ , где μ – показатель степени, x – аргумент ($x > 0$). Выделим два значения одной функции, взятых при аргументе x и увеличенном аргументе на интервал Δx ($x+\Delta x$). Отношение значений представим в виде дроби

$$\frac{A(x+\Delta x)^\mu}{Ax^\mu} = \left(\frac{\Delta x}{x} + 1\right)^\mu = K_a^\mu = K$$

Данное соотношение имеет следующее толкование. При заданном относительном приросте аргумента на долю $\Delta x/x$, т. е. его увеличении в K_a раз, значение степенной функции с показателем μ увеличивается или уменьшается в K раз. График изменений отношения K при разном показателе степени и относительном приросте аргумента показан на рис. 1.

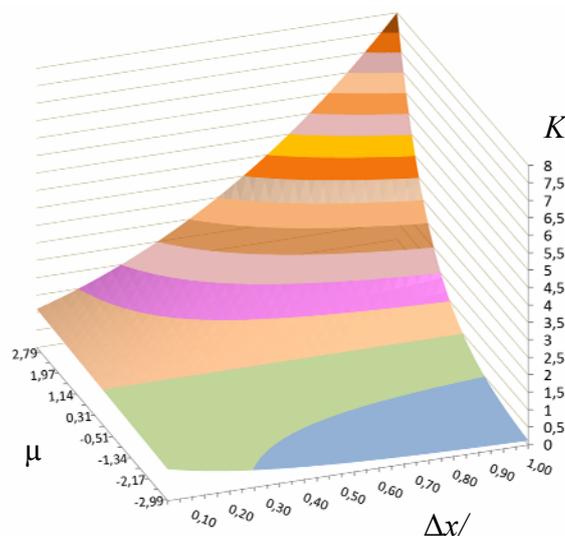


Рис. 1. График изменения отношения K

Отметим характерные особенности изменения степенной функции. Они определяются соотношением параметров K и K_a . При нулевом показателе степени ($\mu=0$) отношение K при любых приращениях аргумента равно единице. При значениях $\mu>0$ получаем функциональное увеличение зависимой величины ($K>1$). Если показатель μ находится в интервале $0<\mu<1$, то функция увеличивается в меньшей степени, чем аргумент ($K<K_a$). Когда показатель степени больше единицы ($\mu>1$), то она увеличивается в большей степени ($K>K_a$). При отрицательных значениях показателя степени ($\mu<0$) отношение K оказывается в интервале $0<K<1$, т. е. зависимая величина уменьшается в K раз.

Возможна более обобщенная интерпретация характерных изменений физической величины, описываемых степенной функцией. Логарифмируя уравнение связи между K_a^μ и K , представим его в виде соотношения

$$\ln K = \mu \ln K_a.$$

Его толкование состоит в том, что логарифм относительного изменения физической величины прямо пропорционален логарифму соответствующего относительного роста аргумента. Коэффициентом пропорциональности является показатель степени μ . Графики связей этих параметров показаны на рис. 2.

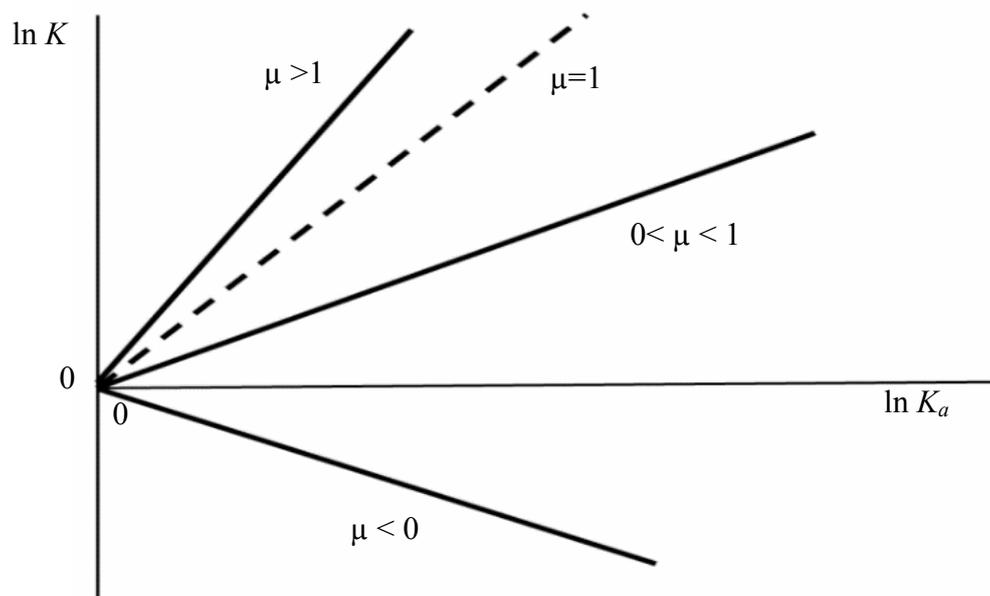


Рис. 2. Графики связей параметров степенной функции

Изменения зависимой величины во многих геомеханических процессах описываются степенной функцией с учетом ее сопряжения не с постоянной составляющей B , а с наклонно расположенной асимптотой. Она выражается линейной функцией с угловым коэффициентом B_x . Смысл коэффициента A в модели представляется частным значением функции, когда аргумент равен единице ($x=1$). Варианты построения и смысловой интерпретации моделей, содержащих степенную функцию зависимой величины в сочетании с постоянной составляющей или с наклонной асимптотой, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Интерпретация моделей со степенной функцией, содержащих постоянную составляющую $y = Ax^\mu + B$ или наклонную асимптоту $y = Ax^\mu + B_x x + B$

Знак коэф. A	Знак показателя μ	Типичный график	Интерпретация характерных K -изменений степенной функции $K = K_a^\mu$
$A > 0$	$\mu > 0$		Увеличивается от значения постоянной составляющей B так вогнуто ($0 < \mu < 1$) или выпукло ($\mu > 1$), что при росте аргумента в K_a раз превышает над ней в меньшей степени в $K < K_a$ раз или, соответственно, в большей степени в $K > K_a$ раз ($K > 1$)
$A < 0$			Уменьшается от значения постоянной составляющей B так выпукло ($0 < \mu < 1$) или вогнуто ($\mu > 1$), что при росте аргумента в K_a раз понижается от нее в меньшей степени в $K < K_a$ раз или, соответственно, в большей степени в $K > K_a$ раз ($K > 1$)
$A > 0$	$\mu < 0$		Уменьшается, приближаясь сверху к постоянной составляющей B или наклонной асимптоте с отрицательным угловым коэффициентом B_x так выпукло, что с ростом аргумента в K_a раз превышение над ними уменьшается в K раз ($K < 1$)
$A < 0$			

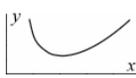
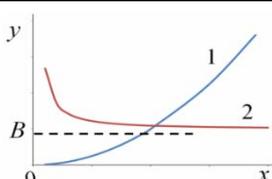
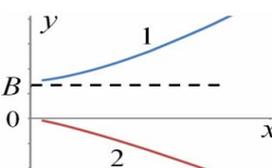
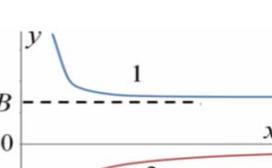
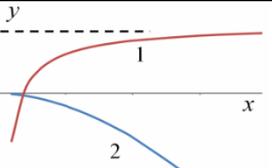
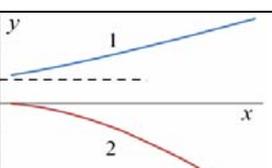
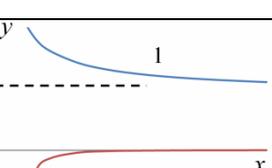
Физическая величина некоторых сложных геомеханических явлений изменяется под влиянием двух противоположно действующих факторов. Один из них приводит к росту физической величины, а другой – к ее спаду. В модели это отображается двумя соответствующими факторными функциями с противоположными монотонностями. Положение разделяющего их экстремума определяется дифференцированием математического выражения модели с последующим приравниванием полученного результата к нулю. В итоге получаем следующую формулу расчета значения аргумента x_3 , при котором зависимая величина имеет экстремум (максимум или минимум)

$$x_3 = \left(-\frac{\mu_2 A_2}{\mu_1 A_1} \right)^{\frac{1}{\mu_1 - \mu_2}}$$

Таблица 3

Интерпретация моделей с двумя степенными функциями, образующими экстремум

$$y = A_1x^{\mu_1} + A_2x^{\mu_2} + B$$

Знак коэф. A	Знак и показатель μ	Графики факторных функций	Варианты интерпретации характерных K -изменений факторных степенных функций $K_1 = K_a^{\mu_1}, K_2 = K_a^{\mu_2}$
Функция y выпуклая с минимумом 			
$A_1 > 0$ $A_2 > 0$	$\mu_1 > 0$ $\mu_2 < 0$		Влияние функции фактора 2 уменьшается в K_2 раза, приближая ее совместно с постоянной составляющей к значению B , а влияние функции фактора 1 увеличивается в большей степени в K_1 раз ($K_1 > 1, K_2 < 1, K_1 > K_2$)
$A_1 > 0$ $A_2 < 0$	$\mu_1 > 0$ $\mu_2 > 0$ $\mu_1 > \mu_2$		Влияние функции 2 отрицательного фактора возрастает в K_2 раза, а противоположное влияние функции 1 положительного фактора увеличивается в большей степени от значения постоянной составляющей B в K_1 раз ($K_1 > 1, K_2 > 1, K_1 > K_2$)
	$\mu_1 < 0$ $\mu_2 < 0$ $\mu_1 < \mu_2$		Влияние функции 1 положительного фактора уменьшается в K_1 раз, приближая ее совместно с постоянной составляющей к значению B , а противоположное влияние функции 2 отрицательного фактора слабеет в меньшей степени в K_2 раза ($K_1 < 1, K_2 < 1, K_1 < K_2$)
Функция y вогнутая с максимумом 			
$A_1 < 0$ $A_2 < 0$	$\mu_1 < 0$ $\mu_2 > 0$		Влияние функции фактора 1 сокращается в K_1 раза, приближая ее совместно с постоянной составляющей к значению B , а отрицательная функция фактора 2 увеличивается в большей степени в K_2 раз ($K_1 < 1, K_2 > 1, K_1 < K_2$)
$A_1 > 0$ $A_2 < 0$	$\mu_1 > 0$ $\mu_2 > 0$ $\mu_1 < \mu_2$		Влияние функции положительного фактора 1 увеличивается в K_1 раз от значения постоянной составляющей B , а противоположное влияние функции отрицательного фактора 2 возрастает в большей степени в K_2 раза ($K_1 > 1, K_2 > 1, K_1 < K_2$)
	$\mu_1 < 0$ $\mu_2 < 0$ $\mu_1 > \mu_2$		Влияние функции 2 отрицательного фактора слабеет в K_2 раза, а влияние функции 1 положительного фактора уменьшается в меньшей степени в K_1 раз, приближая ее совместно с постоянной составляющей к значению B ($K_1 < 1, K_2 < 1, K_1 > K_2$)

Чередование монотонностей в изменении зависимой величины и образование ее экстремума отображается в конкретной модели сочетанием знаков ее коэффициентов и показателей степени. Постоянная составляющая B в формулировках интерпретации таких моделей относится к определенной факторной функции в зависимости от теоретических или экспериментальных представлений об их связях в конкретном геомеханическом исследовании. Возможные варианты смысловой интерпретации моделей с двумя степенными функциями, образующими экстремум, приведены в табл. 3.

Интерпретация моделей, содержащих экспоненциальные функции

Экспоненциальные модели, описывающие изменение зависимой величины y , также содержат постоянную составляющую B и одну или две экспоненциальные функции вида $Ae^{x/\lambda}$, где λ – интервал релаксации, x – аргумент ($-\infty < x < \infty$). Выделим два значения одной функции, взятых при текущем аргументе x и увеличенном на интервал λ ($x+\lambda$). Представим отношение значений в виде дроби

$$\frac{Ae^{\frac{x+\lambda}{\lambda}}}{Ae^{\frac{x}{\lambda}}} = e$$

Данное соотношение имеет следующее толкование. При приросте аргумента x на интервал релаксации $\lambda > 0$ значение экспоненциальной функции увеличивается в e раз, где e – основание натурального логарифма. Если в показателе степени будет содержаться интервал релаксации с отрицательным знаком ($\lambda < 0$), то при росте аргумента на интервал $|\lambda|$ отношение функций уменьшается в e раз. Чем меньше интервал релаксации (по его модулю), тем более круто изменяется экспоненциальная функция. Отметим, что коэффициент A в модели представляется частным значением факторной функции, когда аргумент равен нулю ($x=0$).

Изменения зависимой величины в некоторых процессах описываются показательной функцией в сочетании с ее постоянной составляющей или асимптотой, наклоненной с угловым коэффициентом B_x . Варианты построения и смысловой интерпретации таких моделей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Интерпретация моделей с экспоненциальной функцией, содержащих постоянную составляющую $y = Ae^{x/\lambda} + B$ или наклонную асимптоту $y = Ae^{x/\lambda} + B_x x + B$

Знак коэф. A	Знак интервала λ	Типичные графики		Интерпретация характерных изменений экспоненциальной функции
$A > 0$	$\lambda > 0$			Увеличивается от постоянной составляющей B или асимптоты с положительным угловым коэффициентом B_x так выпукло, что при росте аргумента на интервал λ превышает над ними в e раз
	$\lambda < 0$			Уменьшается так выпукло, что при росте аргумента на интервал $ \lambda $ приближается сверху к постоянной составляющей B или асимптоте с отрицательным угловым коэффициентом B_x в e раз
$A < 0$	$\lambda > 0$			Уменьшается так вогнуто, что при росте аргумента на интервал λ удаляется от постоянной составляющей B или асимптоты с отрицательным угловым коэффициентом B_x в e раз
	$\lambda < 0$			Увеличивается так вогнуто, что при росте аргумента на интервал $ \lambda $ приближается снизу к постоянной составляющей B или асимптоте с положительным угловым коэффициентом B_x в e раз

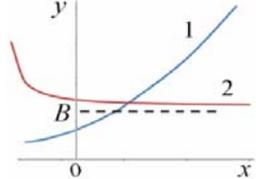
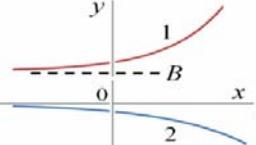
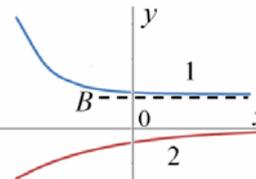
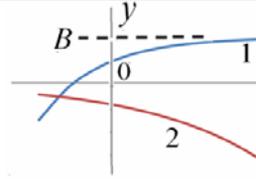
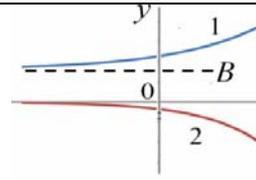
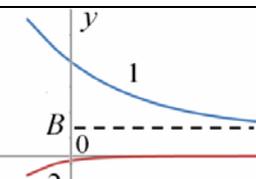
Модели, описывающие изменение зависимой величины по двум противоположным монотонностям, содержат экстремум. Его положение определяется также по результатам дифференцирования математического выражения модели. Значение аргумента x_3 , при котором образуется экстремум, рассчитывается по следующей формуле:

$$x_3 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \left(- \frac{\lambda_1 A_2}{\lambda_2 A_1} \right).$$

Таблица 5

Интерпретация моделей с двумя экспоненциальными функциями, образующими

экстремум $y = A_1 e^{\frac{x}{\lambda_1}} + A_2 e^{\frac{x}{\lambda_2}} + B$

Знак коэф. A	Знаки интервалов λ	Графики факторных функций	Варианты интерпретации характерных изменений факторных экспоненциальных функций
Функция y выпуклая с минимумом 			
$A_1 > 0$ $A_2 > 0$	$\lambda_1 > 0$ $\lambda_2 < 0$ $\lambda_1 > \lambda_2 $		Влияние факторной функции 2 уменьшается с интервалом релаксации $ \lambda_2 $, приближая ее совместно с постоянной составляющей к ее значению B , а влияние факторной функции 1 увеличивается с меньшей крутизной и большим интервалом релаксации λ_1
$A_1 > 0$ $A_2 < 0$	$\lambda_1 > 0$ $\lambda_2 > 0$ $\lambda_1 < \lambda_2$		Влияние функции 2 отрицательного фактора возрастает с интервалом релаксации λ_2 , а противоположное влияние функции 1 положительного фактора увеличивается с большей крутизной и меньшим интервалом релаксации λ_1
	$\lambda_1 < 0$ $\lambda_2 < 0$ $ \lambda_1 < \lambda_2 $		Влияние функции 1 положительного фактора уменьшается с интервалом релаксации $ \lambda_1 $, приближая ее совместно с постоянной составляющей к значению B , а противоположное влияние функции отрицательного фактора слабеет с меньшей крутизной и большим интервалом релаксации $ \lambda_2 $
Функция y вогнутая с максимумом 			
$A_1 < 0$ $A_2 < 0$	$\lambda_1 < 0$ $\lambda_2 > 0$		Влияние функции 1 отрицательного фактора слабеет с интервалом релаксации $ \lambda_1 $, приближая ее совместно с постоянной составляющей к ее значению B , а функция 2 отрицательного фактора увеличивается с меньшей крутизной и большим интервалом релаксации λ_2
$A_1 > 0$ $A_2 < 0$	$\lambda_1 > 0$ $\lambda_2 > 0$ $\lambda_1 > \lambda_2$		Влияние функции 1 положительного фактора увеличивается от постоянной составляющей B с интервалом релаксации λ_1 , а противоположное влияние функции 2 отрицательного фактора возрастает с большей крутизной и меньшим интервалом релаксации λ_2
	$\lambda_1 < 0$ $\lambda_2 < 0$ $ \lambda_1 > \lambda_2 $		Влияние функции 2 отрицательного фактора слабеет с интервалом релаксации $ \lambda_2 $, а противоположное влияние функции 1 положительного фактора уменьшается с меньшей крутизной и большим интервалом релаксации $ \lambda_1 $, приближая ее совместно с постоянной составляющей к значению B

Свойства интерпретации модели с двумя экспоненциальными факторными функциями, образующими экстремум, приведены в табл. 5. Здесь дано описание вариантов характерных изменений функций, объясняющих с учетом знаков модельных коэффициентов и параметров монотонности роста и спада зависимой физической величины и образование ее максимума или минимума. В формулировках вариантов постоянная составляющая B может по сопряжению относиться к факторной функции 1 или 2 в зависимости от условий исследуемого геомеханического процесса.

Примеры построения и интерпретации моделей

Пример 1. В статье [11] приведено дискретное распределение вертикального напряжения σ_v в бетонной крепи воздухоподающего ствола рудника «Таймырский» (см. рис. 3), определенного на разной глубине h методом щелевой разгрузки. На графике значения зафиксированных напряжений дополнены интервалами экспериментальной среднеквадратичной погрешности. С ростом глубины напряжение нелинейно увеличивается.

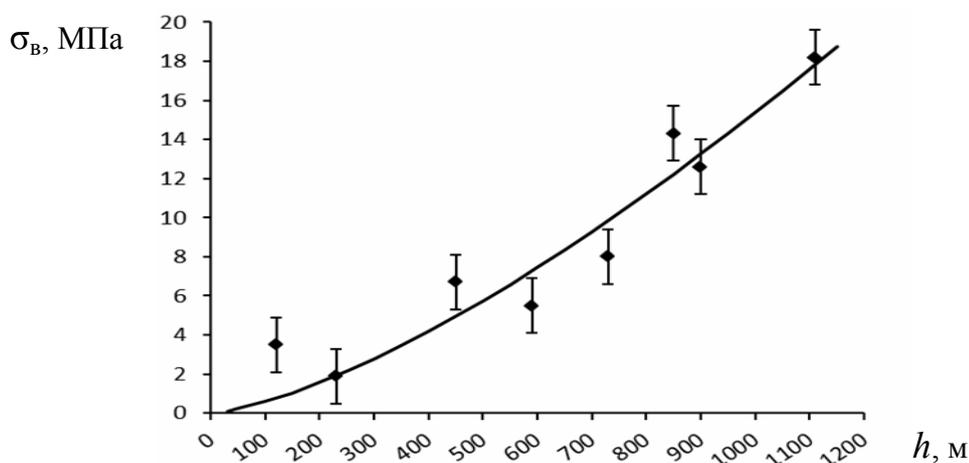


Рис. 3. Распределение экспериментального напряжения и график функционально-факторной модели

Зависимость напряжения крепи ствола от глубины его отметки представлена моделью полиномиальной регрессии. Несмотря на высокий коэффициент ее детерминации, она выражает лишь формальную аппроксимацию данных эксперимента и не содержит никакой смысловой информации о характере их связи.

Недостаток отмеченной интерпретации данных эксперимента восполняется построением функционально-факторной модели. Учтено, что напряжение в бетонной крепи ствола увеличивается при его углублении из-за фактора уплотнения и соответствующей деструкции материала ствола и окружающих горных пород. Влияние данного фактора выражается степенной функцией. В результате построена следующая модель:

$$\sigma_v = 0,00086h^{1,42}.$$

Ее график показан на рис. 3. По модели определено, что при относительном росте глубины в K_a раз, например $K_a=1,5$, логарифм относительного изменения напряжения в бетонной крепи ствола увеличивается в $1,42 \cdot \ln K_a$ раза (по примеру получаем $K=1,78$).

Теперь смысловая интерпретация полученной математической модели состоит в следующем. Напряжение вертикальной нагрузки σ_v бетонной крепи воздухоподающего ствола рудника «Таймырский» по мере углубления его отметки

h в интервале от 0 до 1200 м изменяется из-за уплотнения и деструкции материала ствола и окружающих горных пород с относительной погрешностью 9 % по степенной функции с показателем 1,42. Напряжение увеличивается так выпукло, что на глубине 1 м равно 0,00086 МПа, а при углублении отметки ствола в 1,5 раза оно увеличивается в большей степени в 1,78 раза.

Пример 2. В исследованиях [12] описан деформационный процесс в горных выработках угольных шахт, закрепленных анкерной крепью. С целью определения закономерностей деформирования образующейся системы "анкеры – приконтурный горный массив" проведены измерения и представлен соответствующий график вогнутой зависимости опускания кровли ΔN_0 подготовительной горной выработки, расположенной в зоне влияния очистных работ, от срока A их поддержания. Для наглядности опускания кровли исходные данные представлены на рис. 4 в левосторонней системе координат с указанием оценочной относительной погрешности эксперимента 10 %. Существенное опускание кровли по графику в начальный период наблюдений объясняется сокращением пустот, трещин и уплотнением налегающих горных пород. В последующий период скрепленная система "анкеры – приконтурный горный массив" стабилизируется, и кровля из-за ее упруго-пластичных свойств опускается значительно медленнее. Описание графика ограничено формальной аппроксимацией степенной функцией без пояснения ее параметров и отображающих свойств.

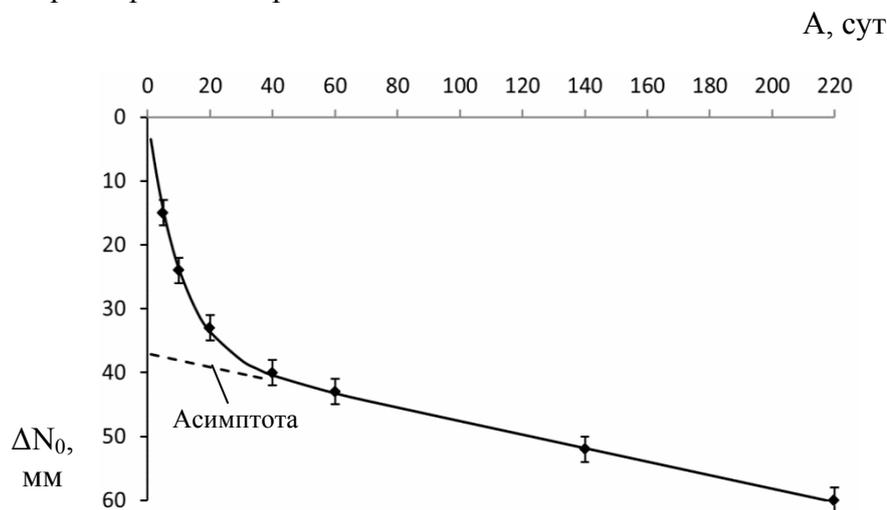


Рис. 4. График опускания кровли подготовительной горной выработки угольного месторождения в зоне влияния очистных работ

Для описания причинных закономерностей опускания кровли подготовительной выработки по исходным данным построена функционально-факторная модель. С учетом влияния факторов уплотнения горных пород в начале хронологических наблюдений и последующей их упруго-пластичной стабилизации модель сформирована в следующем виде:

$$\Delta N_0 = -37 e^{-\frac{A}{10,5}} + 0,1A + 37 .$$

График модели показан на рис. 4. По ее структуре и значениям параметров дадим следующее толкование искомой закономерности. Кровля подготовительной горной выработки угольного месторождения, расположенная и закрепленная анкерами в зоне влияния очистных работ, по мере увеличения срока их поддержания до 220 суток, опускается вогнуто с относительной погрешностью 10 % по экспоненциальной функции и наклонной асимптоте. На начальном этапе поддержания (35 – 40 суток) кровля

опускается из-за сокращения пустот, трещин и уплотнения налегающих горных пород экспоненциально с временным интервалом релаксации 10,5 суток на 37 мм, приближаясь к асимптоте. В последующий период поддержания горных работ из-за сформировавшейся жестко-упругой системы "анкеры – приконтурный горный массив" кровля опускается почти линейно с угловым коэффициентом 0,1 мм/сут.

Пример 3. Эффективность взрывного разрушения горных пород существенно возрастает по мере увеличения скорости детонации применяемого в горном деле эмульсионного взрывчатого вещества "Поремит-1а", зависящей от его плотности. Оптимальное ее значение определено в статье [13] по дискретному распределению экспериментально измеренных скоростей при разной плотности вещества. Данные эксперимента аппроксимированы моделью параболической регрессии, показывающей локализацию максимума скорости детонации. Однако из-за сугубо формального подхода к построению данная модель не описывает и не объясняет причинные обстоятельства ее изменения, приводящие к максимуму.

С целью раскрытия закономерностей процесса детонации по исходным данным построена функционально-факторная модель. Результаты многократно повторяющихся измерений скорости детонации оценены по погрешности, усреднены по методике [14] и представлены на рис. 5. В экспериментальном распределении скорости V наблюдаются две противоположные монотонности – ее рост и спад. Поэтому в модельном изменении скорости учтено влияние соответствующих факторов детонации – энерговыделение сближающихся эмульсионных компонент вещества и экранирование энерговыделения из-за их переуплотнения. Влияние факторов, зависящее от плотности взрывчатого вещества ρ , выражено степенными функциями. В итоге модель сформирована в виде

$$V = 103100 (\rho - 1,145)^{0,812} - 232300 (\rho - 1,145)^{1,31} .$$

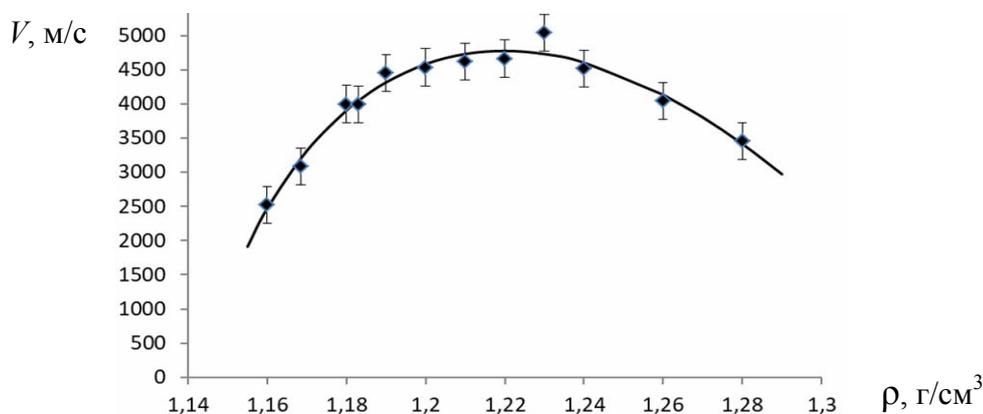


Рис. 5. Изменение скорости детонации взрывчатого вещества в эксперименте (точки) и по модели (график)

График модели показан на рис. 5. Дадим следующую смысловую интерпретацию ее аналитическому содержанию. Скорость детонации промышленного эмульсионного взрывчатого вещества "Поремит-1а", применяемого в горном деле для разрушения горных пород, по мере роста плотности вещества в интервале от 1,145 до 1,34 г/см³ изменяется с относительной погрешностью 0,1 по сумме двух степенных функций с показателями 0,812 и 1,31 так вогнуто, что при плотности 1,22 г/см³ достигает максимального значения 4875 м/с. Оно обусловлено тем, что при росте разности плотности взрывчатого вещества с его значением 1,145 г/см³ в 1,05 раз влияние фактора энерговыделения вещества увеличивается по положительной степенной функции в 1,04 раза, а противоположное влияние экранирующего фактора, ограничивающего детонацию, увеличивается по отрицательной степенной функции, в большей степени в 1,07 раз.

Пример 4. В статье [15] приведены результаты экспериментальных исследований прочности прямоугольных образцов квазипластичной соляной породы – сильвинита, измеренной при разном боковом давлении. Зависимость увеличивающейся прочности $\sigma_{п}$ от бокового давления $\sigma_{бок}$ выражена усредняющим графиком, визуализация которого дает лишь приближенное вербальное представление о вогнутом характере ее связи с боковым давлением.

Учитывая погрешность экспериментальных измерений и возможную универсальность зависимости $\sigma_{п}$ от $\sigma_{бок}$, данные прочности образцов сильвинита отнесены к значению $\sigma_{п0}=21,6$ МПа, наблюдаемому при отсутствии бокового давления. Результаты измерений в относительных единицах представлены на рис. 6. По этим данным построена следующая функционально-факторная модель зависимости относительной прочности образцов сильвинита от бокового давления:

$$\frac{\sigma_{п}}{\sigma_{п0}} = 1 + 0,63 \sigma_{бок}^{0,62}.$$

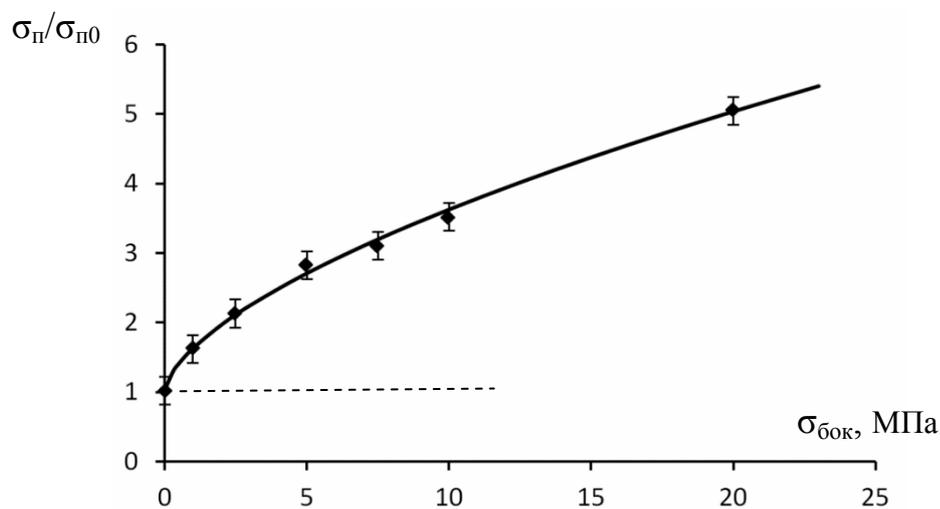


Рис. 6. Распределение относительной экспериментальной прочности образцов сильвинита и график моделируемой ее зависимости от бокового давления

График модели показан на рис. 6. Учитывая ее математическое выражение, дадим следующее смысловое толкование результатам эксперимента. Относительная прочность прямоугольных образцов соляной горной породы – сильвинита, выраженная в долях прочности 21,6 МПа, наблюдаемой при отсутствии бокового давления, по мере его роста, приводящего к объемному сжатию и развитию пластичности образцов, увеличивается от единицы с относительной погрешностью 7 % по степенной функции с показателем 0,62. При этом относительная прочность изменяется так вогнуто, что при боковом давлении 1 МПа составляет 1,63, а логарифм отношения ее приростов над единицей в 0,62 раза меньше логарифма отношений соответствующих значений бокового давления. Его увеличение в 1,5 раза приводит к превышению относительной прочности образцов сильвинита над единицей в меньшей степени в 1,29 раза.

Пример 5. Трудоемкость разрушения горной породы оценивается по 20-балльной шкале ее крепости, предложенной профессором М. М. Протодыяконовым. Непосредственное определение крепости весьма сложное, поскольку содержит процедуры дробления пробы горной породы на специальной установке, ее просеивание, многократное деление и взвешивание. Поэтому наиболее просто крепость f определяют косвенно по ее графическим или математическим связям с известной прочностью горных пород на сжатие $\sigma_{сж}$. Соответствующие графики, приведенные в работе [16] и

построенные по формуле Л. И. Барона [17]

$$f = \frac{\sigma_{сж}}{30} + \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{3}}, \text{ показаны на рис. 7.}$$

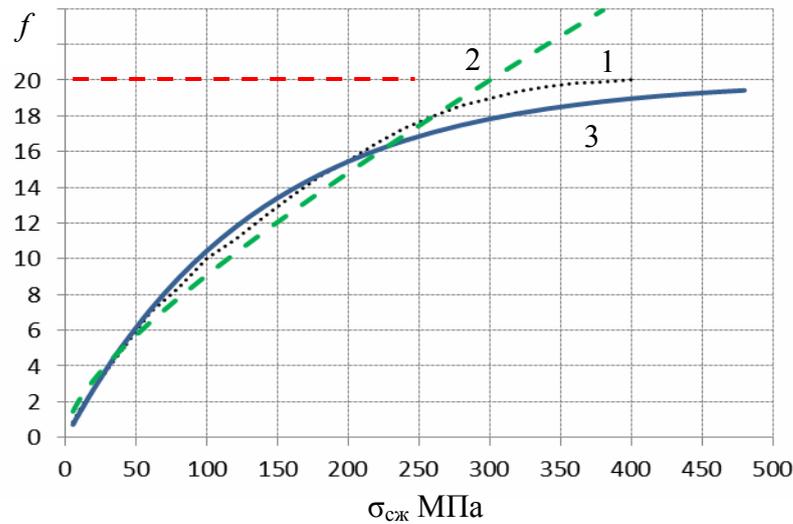


Рис. 7. Графики зависимости крепости горной породы от ее прочности, построенные по данным:
1 – работы [16]; 2 – формулы Л.И. Барона;
3 – функционально-факторной модели

Использование известных графиков ограничено прочностью горных пород, при которой крепость становится максимальной $f=20$. Так графическая зависимость (точки) ограничена прочностью горных пород 400 МПа, а зависимость Л. И. Барона (пунктир) – прочностью 300 МПа. Поэтому по данным графикам невозможно оценить по 20-балльной шкале крепость горных пород, обладающих значительно большей прочностью 400 – 600 МПа, например, кварцитов и базальтов.

Отмеченные ограничения в определении крепости горных пород снимаются в функционально-факторной модели путем введения экспоненциальной функции крепости, приближающейся асимптотически снизу к ее максимальному значению. Соответствующую зависимость f от $\sigma_{сж}$, с учетом наименьшего ее отклонения от известных графиков, представим математической формулой

$$f = 20 \left(1 - e^{-\frac{\sigma_{сж}}{135}} \right).$$

График полученной зависимости показан на рис. 7 сплошной линией. Дадим следующую ее смысловую трактовку. Крепость горных пород f , оцениваемая по 20-балльной шкале профессора М. М. Протодяконова, увеличивается в связи с ростом их прочности на сжатие $\sigma_{сж}$ по экспоненциальной функции, вогнуто приближаясь с интервалом релаксации 135 МПа к максимальной отметке крепости 20 баллов.

Заключение

По представленной методологии построения и смысловой интерпретации функционально-факторных моделей достигается главная цель экспериментального научного исследования геомеханических явлений – установить и объяснить закономерности их становления и развития. Поскольку геомеханическое явление выражается в изменении его зависимой физической величины, то установление и толкование причин и особенностей ее функциональной связи с аргументами с помощью влияющих факторов, модельных параметров и коэффициентов составляют суть обнаруженных новых знаний об исследуемом явлении.

Следует добавить, что смысловая интерпретация функционально-факторных моделей, сформулированная по аналогии с приведенными примерами, из-за раскрытия новых знаний о конкретном наблюдаемом геомеханическом явлении может составить защищаемое научное положение в диссертационном исследовании.

Список литературы

1. Сашурин А.Д., 2019. Геомеханическое обеспечение недропользования: проблемы, задачи, решения. *Проблемы недропользования*, № 3 (22), С. 71 – 76. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.071
2. Heim A., 1978. Mechanismus der Gebirgsbildung. *Bale*.
3. Зуев Б.Ю., Пальцев А.И., 2010. Научно-методические основы физического моделирования нелинейных геомеханических процессов при подземной разработке полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5, С.18 - 28.
4. Мазуров Б.Т., 2019. Математическое моделирование при исследовании геодинамики. *Новосибирск: Агентство «Сиб-принт»*, 360 с.
5. Сахно И.Г., 2012. Численное моделирование геомеханических процессов с учетом их нелинейности. *Проблемы горного давления*, № 1 – 2 (20 – 21), С. 57 – 67.
6. Данилов А.М., Гарькина И.А., 2014. *Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем*. Пенза: ПГУАС, С. 22
7. Коновалов Ю.В., 2014. *Статистическое моделирование с использованием регрессионного анализа*. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, С. 5, 40
8. Антонов В.А., 2017. Метод нелинейной функционально-факторной регрессии в экспериментальных горно-технологических исследованиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S23, С. 90 – 98.
9. Антонов В.А., 2018. Извлечение математико-статистических закономерностей в экспериментальных исследованиях горно-технологических процессов. *Проблемы недропользования*, № 4 (19), С. 61 – 70. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.061
10. Антонов В.А., Яковлев М.В., 2012. О программе для ЭВМ "Тренды ФСП-1" и ее применении в информационных системах горных предприятий. *Информационные технологии в горном деле: доклады Всероссийской научной конференции с международным участием*, С. 26 – 34.
11. Ермолович Е.А., Яцыняк С.Д., Синица И.В., 2022. Геомеханическое обследование воздухопадающего ствола рудника «Таймырский». *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, Вып. 4, С. 424.
12. Демин В.Ф., Баймульдин М.М., Демина Т.В., 2014. Оценка параметров деформационных процессов в горных выработках, закрепленных анкерной крепью. *Известия вузов. Горный журнал*, № 1, С. 76.
13. Жариков С.Н., Реготунов А.С., Кутуев В.А., 2022. Современные научные исследования лаборатории разрушения горных пород ИГД УрО РАН и перспективы их развития. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 81. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.073
14. Антонов В.А., 2014. Достоверность регрессионных моделей в горно-технологических исследованиях. *Проблемы недропользования*, № 3 (3). С. 216 –222.
15. Паньков И.Л., Асанов В.А., Ударцев А.А., Кузьминых В.С., 2016. Практика использования испытательного оборудования при изучении деформирования и разрушения квазипластичных горных пород в лабораторных условиях. *Вестник КРСУ*, том 16, № 1, С. 166.
16. Ржевский В.В., Новик Г.Я., 1978. *Основы физики горных пород*. Москва: Недра, С. 241.
17. Барон Л.И., Логунцов Б.М., Позин Е.З., 1962. *Определение свойств горных пород*. Москва: Госгортехиздат, С. 259.

References

1. Sashurin A.D., 2019. Geomekhanicheskoe obespechenie nedropol'zovaniya: problemy, zadachi, resheniya [Geomechanical support of subsoil use: problems, tasks, solutions]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3 (22), P. 71 – 76. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.03.071
2. Heim A., 1978. Mechanismus der Gebirgsbildung. *Bale*.
3. Zuev B.Yu., Pal'tsev A.I., 2010. Nauchno-metodicheskie osnovy fizicheskogo modelirovaniya nelineinykh geomekhanicheskikh protsessov pri podzemnoi razrabotke poleznykh iskopaemykh [Scientific and methodological foundations of physical modeling of non-linear geomechanical processes in underground mining]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 5, P. 18 – 28.
4. Mazurov B.T., 2019. Matematicheskoe modelirovanie pri issledovanii geodinamiki [Mathematical modeling in the study of geodynamics]. Novosibirsk: Agentstvo "Sib-print", 360 p.
5. Sakhno I.G., 2012. Chislennoe modelirovanie geomekhanicheskikh protsessov s uchetom ikh nelineinosti [Numerical modeling of geomechanical processes taking into account their nonlinearity]. Problemy gornogo davleniya, № 1 – 2 (20 – 21), P. 57 – 67.
6. Danilov A.M., Gar'kina I.A., 2014. Interpolyatsiya, approksimatsiya, optimizatsiya: analiz i sintez slozhnykh system [Interpolation, approximation, optimization: analysis and synthesis of complex systems]. Penza: PGUAS, P. 22
7. Konovalov Yu.V., 2014. Statisticheskoe modelirovanie s ispol'zovaniem regressionnogo analiza [Statistical modeling using regression analysis]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, P. 5, 40
8. Antonov V.A., 2017. Metod nelineinoy funktsional'no-faktornoj regressii v eksperimental'nykh gorno-tekhnologicheskikh issledovaniyakh [Method of non-linear functional-factorial regression in experimental mining and technological research]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S23, P. 90 – 98.
9. Antonov V.A., 2018. Izvlechenie matematiko-statisticheskikh zakonomernostei v eksperimental'nykh issledovaniyakh gorno-tekhnologicheskikh protsessov [Extraction of mathematical and statistical regularities in experimental studies of mining and technological processes]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4 (19), P. 61 – 70. DOI: 10.25635/2313-1586.2018.04.061
10. Antonov V.A., Yakovlev M.V., 2012. O programme dlya EVM "Trendy FSP-1" i ee primenenii v informatsionnykh sistemakh gornyykh predpriyatii [About the computer program "FSP-1 Trends" and its application in information systems of mining enterprises]. Informatsionnye tekhnologii v gornom dele: doklady Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, P. 26 – 34.
11. Ermolovich E.A., Yatsynyak S.D., Sinitsa I.V., 2022. Geomekhanicheskoe obsledovanie vozdukhopadayushchego stvola rudnika "Taimyrskii" [Geomechanical survey of the air-falling shaft of the Taimyrsky mine]. Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle, Vyp. 4, P. 424.
12. Demin V.F., Baimul'din M.M., Demina T.V., 2014. Otsenka parametrov deformatsionnykh protsessov v gornyykh vyrabotkakh, zakreplennykh ankernoj krep'yu. Izvestiya vuzov [Estimation of the parameters of deformation processes in mine workings, fixed with bolts]. Gornyi zhurnal, № 1, P. 76.
13. Zharikov S.N., Regotunov A.S., Kutuev V.A., 2022. Sovremennye nauchnye issledovaniya laboratorii razrusheniya gornyykh porod IGD UrO RAN i perspektivy ikh razvitiya [Modern scientific research of the rock destruction laboratory of the Institute of Mining UB RAS]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3, S. 81. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.073
14. Antonov V.A., 2014. Dostovernost' regressionnykh modelei v gorno-tekhnologicheskikh issledovaniyakh [Reliability of regression models in mining and technological research]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3 (3). P. 216 – 222.

15. Pan'kov I.L., Asanov V.A., Udartsev A.A., Kuz'minykh V.S., 2016. Praktika ispol'zovaniya ispytatel'nogo oborudovaniya pri izuchenii deformirovaniya i razrusheniya kvaziplastichnykh gornyx porod v laboratornykh usloviyakh [Practice of using test equipment in the study of deformation and destruction of quasi-plastic rocks in laboratory conditions]. Vestnik KRSU, V. 16, № 1, P. 166.

16. Rzhetskii V.V., Novik G.Ya., 1978. Osnovy fiziki gornyx porod [Fundamentals of rock physics]. Moscow: Nedra, P. 241.

17. Baron L.I., Loguntsov B.M., Pozin E.Z., 1962. Opredelenie svoistv gornyx porod [Determination of the properties of rocks]. Moscow: Gosgortekhnizdat, P. 259.

УДК 622.83:550.3

Далатказин Тимур Шавкатович

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией технологии
снижения риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: 9043846175@mail.ru

Коновалова Юлия Павловна

старший научный сотрудник,
лаборатория сдвига горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: lisjul@mail.ru

Зуев Павел Игоревич

научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: zuev@igduran.ru

Шевченко Максим Дмитриевич

младший научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения
риска катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

**НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ
РАДОНОМЕТРИИ В КОМПЛЕКСЕ
ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ***

Аннотация:

Представлены результаты исследований по проверке соответствия гипотезы: в соотношении значений объемной активности радона и торона в почвенном воздухе на участках деформаций растяжений увеличивается доля радона, а на участках деформаций сжатия увеличивается доля торона по сравнению с соседними, не охваченными деформациями участками горного массива. Гипотеза сформулирована исходя из современных научных представлений о механизме формирования геодинамической составляющей поля радоновых эманацій в почвенном воздухе и свойств радона и торона. Выполнены экспериментальные исследования на геодинамическом полигоне. Экспериментальные исследования по проверке выдвинутой гипотезы заключались в сравнении результатов радонометрии и геодезических мониторинговых исследований. Экспериментальные исследования полностью подтвердили достоверность выдвинутой гипотезы. Новые возможности использования радонометрии позволяют оперативно, без мониторинговых исследований выявлять участки деформаций растяжения и сжатия в комплексе геодинамической диагностики горного массива для обеспечения безопасности объектов недропользования и в гидрогеологии для определения места заложения гидрогеологических скважин.

Ключевые слова: современная геодинамика, горный массив, деформация растяжения, деформация сжатия, радон, торон.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.034

Dalatkazim Timur Sh.

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of technology for reducing the
risk of catastrophes in subsoil use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiriyaka Str.
e-mail: 9043846175@mail.ru

Konovalova Yuliya P.

Senior Researcher,
Laboratory of technology for reducing the risk of
catastrophes in subsoil use,
Institute of Mining of the Ural Branch of RAS
e-mail: lisjul@mail.ru

Zuev Pavel I.

Researcher, Laboratory of technology for reducing
the risk of catastrophes in subsoil use, Institute of
Mining of the Ural Branch of the RAS
e-mail: zuev@igduran.ru

Shevchenko Maksim D.

Junior Researcher,
Laboratory of technology for reducing the risk of
catastrophes in subsoil use,
Institute of Mining of the Ural Branch RAS
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

**NEW POSSIBILITIES OF RADONOMETRY
IN THE COMPLEX OF GEODYNAMIC
DIAGNOSTICS**

Abstract:

The paper presents the results of studies to test the compliance of the hypothesis: in the ratio of the volumetric activity values of radon and thoron in the soil air, the proportion of radon increases in areas of tensile deformations, and the proportion of thoron increases in areas of compression deformations, compared with neighboring areas not affected by deformations. The hypothesis is formulated based on modern scientific ideas about the mechanism of formation of the geodynamic component of the field of radon emanations in the soil air and the properties of radon and thoron. Experimental studies were carried out at a geodynamic test site. Experimental studies to test the proposed hypothesis consisted of comparing the results of radonometry and geodetic monitoring studies. Experimental studies fully confirmed the reliability of the hypothesis put forward. The results obtained will make it possible to quickly, without monitoring studies, identify areas of tension and compression deformations in the complex of geodynamic diagnostics of a mountain range to ensure the safety of subsoil use objects and in hydrogeology.

Key words: modern geodynamics, mountain range, tensile deformation, compression deformation, radon, thoron.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПП, тема 3 (2022-2024), (FUW-2022-0005), рег. No1021062010531-8-1.5.1.

Введение

Напряженно-деформационное состояние массива горных пород имеет определяющее значение для обеспечения безопасности проектируемых, строящихся и эксплуатируемых объектов недропользования.

Земная кора содержит радиоактивные природные элементы, которые создают естественный радиоактивный фон. В том числе в горных породах, почве, воде, растениях и тканях живых организмов присутствуют члены радиоактивных семейств урана (^{238}U , ^{235}U) и тория (^{232}Th). Эти три радиоактивных элемента образуют цепочки последовательно превращающихся один в другой изотопов, вплоть до образования стабильных изотопов свинца. Газообразными продуктами, которые рождаются в процессе распада трех «семейств», являются гелий-4 и изотопы радона и торона. Повсеместное распространение изотопов радия приводит также к *повсеместному* распространению в природе и в горных породах, в частности, их дочерних продуктов – изотопов радона и торона. Изотопы радона, как и уран, торий, радий, являются альфа-излучателями и в процессе распада продуцируют целое семейство других альфа и бета-излучателей. Период полураспада Rn_{222} составляет 3,8 суток, а период полураспада Tn – 55,6 секунд [1]. Изотопы радона и торона представляют собой радиоактивные газообразные вещества – эманации, которые непрерывно генерируются из всех без исключения горных пород. Изотопы радона и торона, будучи радиоактивными, распадаются, испуская в основном альфа-частицы. Альфа-излучение изотопов радона и продуктов их распада используется при измерении эманаций [2].

Распределение радона и торона в земной коре определяется геохимическими закономерностями распределения урана в горных породах [3].

По подсчетам Кларка [3] 95 % верхнего шестнадцатикилометрового слоя литосферы сложено магматическими породами и только 5 % приходится на осадочные и метаморфические породы. Однако непосредственно в приповерхностных слоях Земной коры – сфере недропользования – доля осадочных пород резко увеличивается.

Наибольшая концентрация урана и радия в магматических горных породах наблюдается в кислых, далее по убывающей в средних и основных, а наименьшая – в ультраосновных породах [4].

Возникающие из магмы все типы изверженных пород являются исходным материалом для образования всевозможных пород осадочного и метаморфического комплекса, а также в значительной мере и для формирования почв [5]. Обычно они соответствуют радиоактивности горных пород, которые являются их материнскими источниками.

Содержание урана и радия в осадочных горных породах изменяется в широких пределах и связано с физико-химическими и геологическими условиями формирования самих пород.

Наиболее распространенными осадочными породами являются глины, пески, песчаники.

Глины разнообразны по радиоактивности.

Радиоактивность песков и песчаников связана с присутствием некоторых радиоактивных минералов, например, циркона (малакона, циртолита), эпидота, ураненита, монацита, браннерита, карнотита и др. При отсутствии радиоактивных минералов фоновые значения концентрации радона в песках очень низкие.

Метаморфические породы по содержанию урана занимают промежуточное положение между осадочными и магматическими породами [6]. Концентрация урана в этих породах зависит от первоначального содержания и влияния последующих процессов метаморфизма. Метаморфические изменения в зависимости от конкретных геологических особенностей могут приводить как к увеличению, так и к уменьшению содержания урана [6].

Различные условия миграции и эманирования радона обуславливают аномалии радона в горном массиве. Аномалии радона могут формироваться в связи с тем, что он может накапливаться в порах и трещинах тектонических нарушений, куда поступает по системам микротрещин. То есть радоновыделение определяется не только общей радиоактивностью горных пород, но также их коллекторскими свойствами (способностью аккумулировать радон). Проницаемость и коллекторские свойства тектонических разрывов зависят от степени геодинамической активности этих структур.

При тектонических подвижках пород возможность и интенсивность миграции увеличиваются, так как возникают ее новые пути, а также локальные увеличения давления, дающие импульсы, способствующие продвижению газов по порам и микротрещинам. Кроме того, подвижки препятствуют процессу седиментационного заполнения полостей трещин [7 – 10].

Таким образом, использование радонометрии в геодинамической диагностике основано на положительной корреляционной зависимости между интенсивностью эманирования радона из горных пород и степенью воздействия на них напряженно-деформационного поля, поскольку поле радоновых эманаций надразломных участков формируется в соответствии:

- с дифференциацией по степени проницаемости, характерной для подвижных участков разломной зоны и определяющей условия миграции флюидов;
- с распределением степени воздействия упругих волновых колебаний, вызванных современной геодинамической активностью, на горные породы;
- со свойствами радона.

Взаимосвязь геодинамических процессов с интенсивностью эманирования радона подтверждается мониторинговыми геодезическими измерениями с использованием традиционных методов и высокоточных GPS-технологий спутниковой геодезии [11 – 13]. Это позволяет использовать распределение значений объемной активности эманаций радона в почвенном воздухе, состоящих из Rn_{222} и Rn_{220} для геодинамического районирования горного массива [14].

Исходя из современных представлений о механизме формирования геодинамической составляющей поля эманаций радона в почвенном воздухе, свойствах радона и торона, сформулирована гипотеза: в соотношении значений объемной активности радона и торона в почвенном воздухе на участках деформаций растяжений увеличивается доля радона, а на участках деформаций сжатия увеличивается доля торона по сравнению с соседними, не охваченными деформациями участками.

Рассмотрим геодинамические особенности формирования состава почвенного радона над зоной деформаций растяжения и над зоной деформаций сжатия в горном массиве с одинаковыми прочими параметрами.

Над зоной растяжения в горном массиве в почвенном воздухе аккумулируется смесь радона и торона после миграции к поверхности по раскрытым трещинам после эманации из горных пород. В процессе миграции за счет значительно более быстрого распада по сравнению с Rn_{222} значительная доля Tn в этой смеси уменьшится.

В зоне сжатия трещины в массиве преимущественно сомкнуты. Соответственно, миграция газов из глубины ограничена. Над зоной сжатия в почвенном воздухе эманация радона формируется в основном за счет вибровоздействия на горные породы, возникающем при сжимающих деформациях. Поскольку в данном случае эманация формируется в большей степени вблизи поверхности, то доля нераспавшегося торона по сравнению с долей радона в ней больше по сравнению с соседними, не подверженными сжимающим деформациям участками.

Исходя из вышесказанного гипотетически появляется возможность использовать соотношение торона и радона в почвенном воздухе для выявления и оконтуривания зон сжатия и растяжения в массиве горных пород.

С целью практического подтверждения выдвинутой гипотезы и повышения информативности результатов радонометрии при выполнении геодинамической диагностики, Институтом горного дела УрО РАН в 2023 г. выполнены экспериментальные исследования на геодинамическом полигоне, расположенном в районе г. Краснотурьинск Свердловской области (горный массив промплощадки шахты Северопесчанская).

Характеристика горного массива полигона

Северо-Песчанское месторождение является обособленной группой рудных тел Песчанского железорудного месторождения.

Месторождение приурочено к западному контакту Песчанского диоритового массива, прорывающего осадочные и осадочно-вулканогенные толщи коблецкого яруса нижнего девона. В районе месторождения массив представлен диоритами, габбро-диоритами и габбро. Среди образований коблецкого яруса выделяются внизу мраморизованные известняки и мраморы фроловско-васильевской толщи мощностью свыше 800 м. Стратиграфически выше лежат переслаивающиеся туфопесчаники, туфосланцы и туфы андезитовых порфиритов с прослоями известняков башмаковской или «слоистой» толщи; сверху – роговообманково-плагиоклазовые порфириты и их туфы с резко подчиненным количеством туфопесчаников богословской толщи. С поверхности богословская толща слагает всю площадь Песчанского месторождения.

Вмещающие вулканогенно-осадочные породы и прилегающая часть массива пересекаются многочисленными дайками диабазовых, диоритовых и габбро-диабазовых порфиритов. В пределах Северо-Песчанского месторождения они имеют субмеридиональное простирание с западным падением под углом $40^\circ - 50^\circ$. В целом вмещающие породы залегают полого и срезаются крутым контактом интрузии.

Северо-Песчанский меридиональный разлом прослежен как в пределах одноименного участка, так и к северу и югу от него. Направление падения плоскости смесителя в пределах Северо-Песчанского месторождения восточное под углом $65^\circ - 70^\circ$ [15].

Методы исследований

Экспериментальные исследования по проверке выдвинутой гипотезы заключались в сравнении результатов радонометрии и геодезических мониторинговых исследований.

Экспериментальные исследования по использованию радонометрии для выявления зон растяжения и сжатия состояли из

1) раздельного определения Rn_{222} и Tn при выполнении эманационной съемки; построения карт деформаций растяжения и сжатия исследуемого горного массива по данным радонометрии;

2) сравнительного анализа результатов выявления зон растяжения и сжатия по данным радонометрии с результатами мониторинговых геодезических исследований.

Измерения объемной активности радона ($Bк/м^3$) в почвенном воздухе выполнялись радиометром альфа-активных газов РГА-500 по профильным линиям из шпуров глубиной 0,8 – 1,0 м. Всего было выполнено 45 измерений. Значительная часть исследуемой территории заасфальтирована, на ней расположены производственные здания и сооружения, что не позволило равномерно распределить сеть радонометрических наблюдений, что существенно ограничило исследования. Участок исследований расположен в пределах промплощадки ш. Северопесчанская. На участке оборудована профильная наблюдательная геодезическая линия № 12.

Раздельное определение Rn_{222} и Tn (Rn_{220}) в отбираемых пробах почвенного воздуха выполнялось по следующей методике.

В процессе выполнения эманационной съемки, после измерения объемной активности смеси ($Rn_{222} + Tn$) ($Bк/м^3$), проба почвенного воздуха остается в измерительной камере (краны закрыты) и выдерживается временная пауза продолжительностью

300 с. За этот период T_n , содержащийся в пробе, распадается. Выполняется повторное измерение, в результате которого определяется объемная активность Rn_{222} [6].

Для выявления зон растяжения горного массива исследуемой территории для каждой точки измерения определяется показатель $A_{\text{раст}}$:

$$A_{\text{раст}} = \frac{Q_{Rn222}}{Q_{Tn}},$$

где Q_{Rn222} – объемная активность Rn_{222} , Бк/м³; Q_{Tn} – объемная активность Tn , Бк/м³.

По значениям $A_{\text{раст}}$ строится карта растяжений.

Для выявления зон сжатий в горном массиве исследуемой территории для каждой точки измерения определяется показатель $A_{\text{сжат}}$:

$$A_{\text{сжат}} = \frac{Q_{Tn}}{Q_{Rn222}}.$$

По значениям $A_{\text{сжат}}$ строится карта сжатий.

Числовые параметры горизонтальных деформаций (растяжения, сжатия) земной поверхности определяются на основании инструментальных геодезических измерений расстояний между реперами профильной линии. Измерения выполняются с помощью электронного тахеометра, среднеквадратическая погрешность измерения углов которого не превышает $\pm 2''$. Измерение расстояний между реперами профильных линий тахеометром проводится в прямом и обратном направлениях. Расхождение дважды измеренной длины интервала не должно превышать ± 3 мм. Горизонтальные деформации интервала между реперами ε за период между двумя наблюдениями определяются по формуле:

$$\varepsilon = \frac{d_n - d_{n-1}}{d},$$

где d , d_n , d_{n-1} – горизонтальные проложения интервалов, соответственно, из начального, предыдущего и последующего наблюдений.

Положительные значения деформаций соответствуют увеличению интервала – растяжению, отрицательные значения – сжатию. По результатам измерений строятся графики, на которых горизонтальные деформации относят к середине интервала.

Результаты исследований

В результате выполненных исследований построены:

- карта деформаций растяжения исследуемого участка (рис. 1);
- карта деформаций сжатия исследуемого участка (рис. 2);
- график горизонтальных деформаций реперных интервалов вдоль профильной линии на основании данных геодезических измерений за период 8 месяцев (рис. 3).

Выполнен сравнительный анализ результатов выявления характерных участков горизонтальных деформаций по соотношениям $A_{\text{раст}}$ и $A_{\text{сжат}}$ (см. рис. 1, 2), и данных геодезического мониторинга (см. рис. 3).

По соотношению $A_{\text{раст}}$ выявлена зона растяжений между реперами $Rp7$ и $Rp8$, а по соотношению $A_{\text{сжат}}$ – зона сжатий в окрестностях репера $Rp13$. По данным геодезических измерений за период 8 месяцев на реперном интервале $Rp7$ - $Rp8$ наблюдается повышенное значение растягивающих горизонтальных деформаций на уровне $0,1 \times 10^{-3}$, а на интервале $Rp12$ - $Rp13$ зафиксированы максимальные сжимающие деформации – минус $0,4 \times 10^{-3}$ (рис. 4).

Участок реперной линии 12 в интервале $Rp10$ - $Rp12$ заасфальтирован. Радонометрические измерения здесь выполнить невозможно. Поэтому результаты геодезического мониторинга на указанном интервале не представлены.

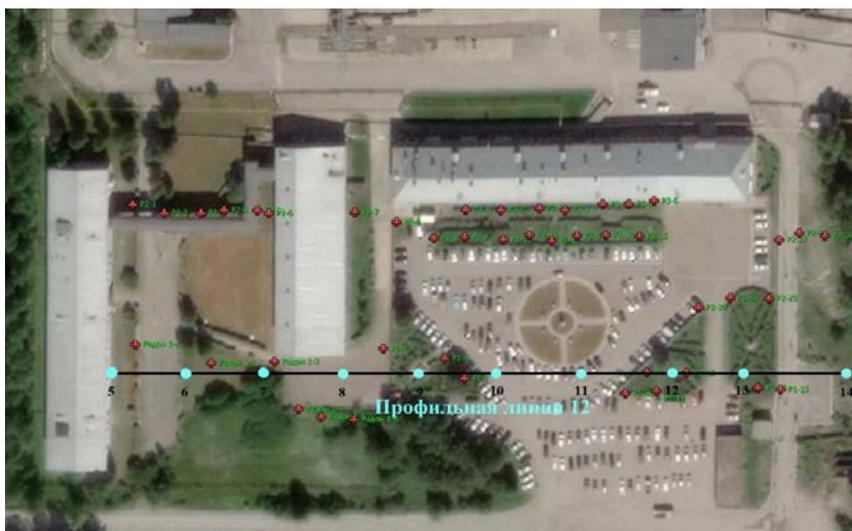


Рис. 1. Схема радонометрических и геодезических исследований. Горный массив участка промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

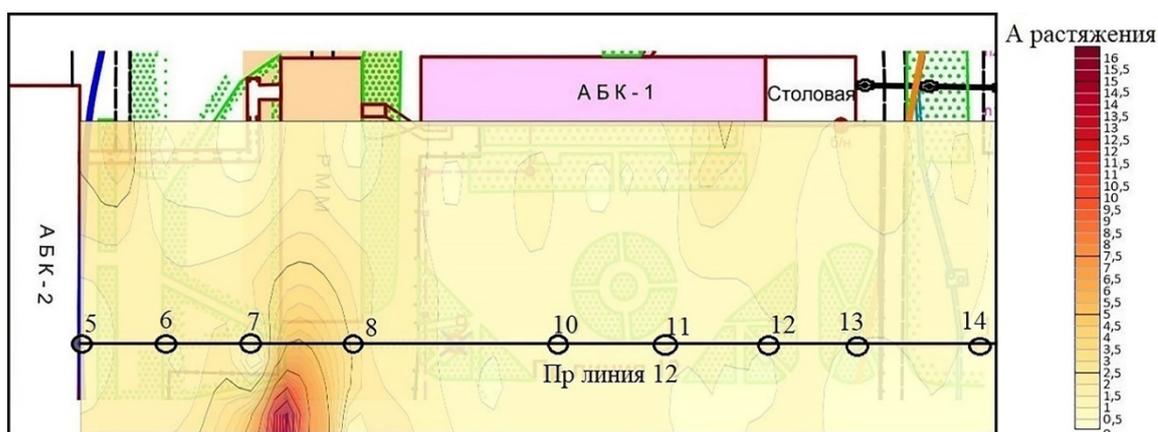


Рис. 2. Карта растягивающих деформаций по соотношению $A_{\text{раст}}$. Горный массив участка промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

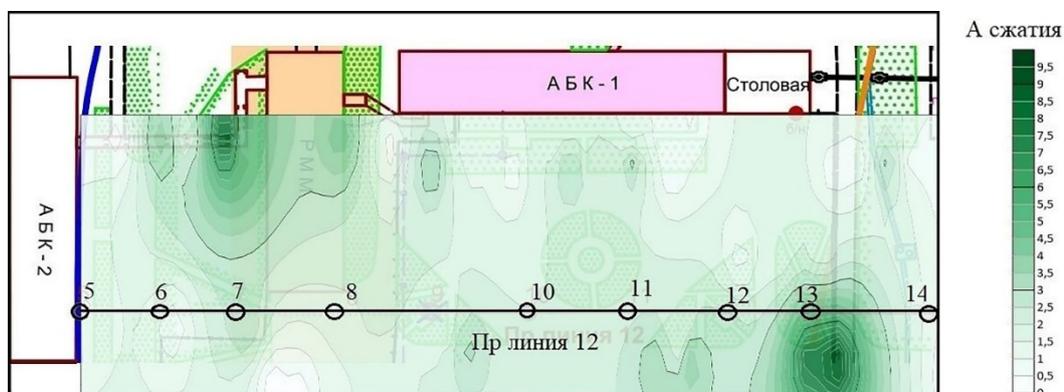


Рис. 3. Карта сжимающих деформаций по соотношению $A_{\text{сжат}}$. Горный массив участка промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.



Рис. 4. График горизонтальных деформаций по профильной геодезической линии 12 за период 8 месяцев. Участок промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

Кроме того, была построена карта геодинамического районирования по нормированным значениям объемной активности радона в почвенном воздухе [14] исследуемого горного массива (рис. 5).

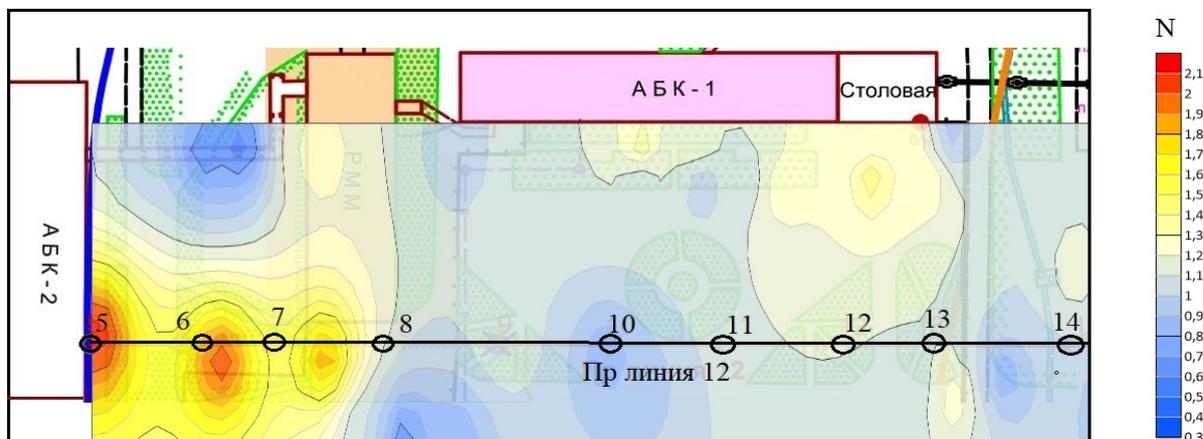


Рис. 5. Карта геодинамического районирования по нормированным значениям объемной активности радона в почвенном воздухе. Горный массив участка промплощадки ш. Северопесчанская, г. Краснотурьинск Свердловской области, 2023 г.

Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований возможности использования соотношения объемной активности (Q , Бк/м³) радона и торона в почвенном воздухе для выявления зон растяжения и сжатия в массиве горных пород и результатов геодинамического районирования по данным радонометрии (см. рис. 2, 3, 5) подтвердил их соответствие.

Заключение

1. Геодезические наблюдения подтвердили достоверность результатов выявления зон деформаций растяжения и деформаций сжатия в горном массиве с использованием радонометрии.

2. Использование соотношения Q_{Rn222} и Q_{Tn} в почвенном воздухе позволяет оперативно, без периодических измерений выявлять и оконтуривать зоны деформаций растяжения и сжатия в массиве горных пород.

3. Распределение соотношений Q_{Rn222} и Q_{Tn} соответствует результатам геодинамического районирования, отражающим напряженно-деформационное состояние изучаемого массива на момент измерений.

Новые возможности использования радонометрии позволят оперативно, без мониторинговых исследований выявлять участки деформаций растяжения и сжатия в комплексе геодинамической диагностики горного массива для обеспечения безопасности объектов недропользования и в гидрогеологии для определения места заложения гидрогеологических скважин.

Список литературы

1. Баранов В.И., 1955. *Радиометрия*. Москва: Изд-во АН СССР, 327 с.
2. Бондаренко В.М. и др., 1983. *Новые методы инженерной геофизики*. Москва: Недра, 224 с.
3. Сердюкова А.С., Капитонов Ю.Т., 1969. *Изотопы радона и короткоживущие продукты их распада в природе*. Москва: Атомиздат, 312 с.
4. Войткевич Г.В., 1961. *Проблемы радиогеологии*. Москва: Госгеолтехиздат, 272 с.
5. Граммаков А.Г., Никонов А.И., Тафеев Г.П., 1957. *Физические и геологические основы методов разведочной радиометрии*. Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 308 с.
6. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н., 1965. *Радиоактивные методы разведки*. Ленинград: Недра, 759 с.
7. Тагильцев С.Н., 2003. *Основы гидрогеомеханики скальных массивов*. Екатеринбург: УГГГА, 88 с.
8. Бондаренко В. М. и др., 1983. *Новые методы инженерной геофизики*. Москва: Недра, 224 с.
9. Ульянов В.Ю. 2015. Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 103 - 107.
10. Ялпуга Е.А., Базеева Р.П., Донченко Э.В. и др., 2020. Методы мониторинга радоновыделения для изучения геодинамически активных зон горного массива. *Журнал теоретической и прикладной механики*, №3 (72), С. 57 – 64.
11. Адушкин В.В. и др., 2005. Резонансные особенности эсхалации природного радона. *ДАН*, Т. 400, № 3.
12. Уткин В.И., Юрков А.К., Козлова И.А., 2008. Выделение радона из горных пород при воздействии на них упругих колебаний различного диапазона. *Геофизика XXI столетия. Сб. науч. тр. девярых геофизических чтений им. В.В. Федынского*. Тверь: ООО Изд-во «ГЕРС», С. 317 – 320.
13. Грацинский В.Г., Горбушина Л.В., Тыминский В.Г., 1967. О выделении радиоактивных газов из образцов горных пород под действием ультразвука. *Изв. АН СССР. Физика Земли*, № 10, С. 91 – 94.
14. Далатказин Т.Ш., 2023. Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии. *Проблемы недропользования*, № 1, С. 64 – 69. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.064>

15. Геология СССР. Т. XII. Пермская, Свердловская, Челябинская и Курганская области. Ч. I. Полезные ископаемые. Министерство геологии СССР, Урал. территориальное геологическое управление; гл. ред. А.В. Сидоренко; ред. тома: К.К. Золоев [и др.]. Москва: Недра, 1973, 632 с.

References

1. Baranov V.I., 1955. Radiometriya [Radiometry]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 327 p.
2. Bondarenko V.M. i dr., 1983. Novye metody inzhenernoi geofiziki [New methods of engineering geophysics]. Moscow: Nedra, 224 p.
3. Serdyukova A.S., Kapitonov Yu.T., 1969. Izotopy radona i korotkozhivushchie produkty ikh raspada v prirode [Isotopes of radon and shortlived radioactive products of their decay in nature]. Moscow: Atomizdat, 312 p.
4. Voitkevich G.V., 1961. Problemy radiogeologii [Problems of radiogeology]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 272 p.
5. Grammakov A.G., Nikonov A.I., Tafeev G.P., 1957. Fizicheskie i geologicheskie osnovy metodov razvedochnoi radiometrii [Physical and geological foundations of exploration radiometry methods]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane neдр, 308 p.
6. Novikov G.F., Kapkov Yu.N., 1965. Radioaktivnye metody razvedki [Radioactive exploration method]. Leningrad: Nedra, 759 p.
7. Tagil'tsev S.N., 2003. Osnovy gidrogeomekhaniki skal'nykh massivov [Fundamentals of hydrogeomechanics of rock masses]. Ekaterinburg: UGGGA, 88 p.
8. Bondarenko V. M. i dr., 1983. Novye metody inzhenernoi geofiziki [New methods of engineering geophysics]. Moscow: Nedra, 224 p.
9. Ul'yanov V.Yu. 2015. Organizatsiya i metodika provedeniya monitoringa radona na ploshchadkakh AES v aseismichnykh regionakh [Organization and methodology of monitoring radon emissions at NPP sites in anti-seismic regions]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, S. 103 – 107.
10. Yalputa E.A., Bazeeva R.P., Donchenko E.V. i dr., 2020. Metody monitoringa radonovydeleniya dlya izucheniya geodinamicheski aktivnykh zon gornogo massiva [Methods of monitoring radon emission for studying geodynamically active zones of the mountain range]. Zhurnal teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki, №3 (72), P. 57 – 64.
11. Adushkin V.V. i dr., 2005. Rezonansnye osobennosti eskhalyatsii prirodnogo radona [Resonant features of natural radon exhalation]. DAN, V. 400, № 3.
12. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kozlova I.A., 2008. Vydelenie radona iz gornykh porod pri vozdeistvii na nikh uprugikh kolebaniy razlichnogo diapazona [Release of radon from rocks when exposed to elastic vibrations of various ranges]. Geofizika XXI stoletiya. Sb. nauch. tr. devyatykh geofizicheskikh chtenii im. V.V. Fedynskogo. Tver': OOO Izd-vo "GERS", P. 317 – 320.
13. Gratsinskii V.G., Gorbushina L.V., Tyminskii V.G., 1967. O vydelenii radioaktivnykh gazov iz obraztsov gornykh porod pod deistviem ul'trazvuka [On the effusion of radioactive gases from rock samples under the influence of ultrasound]. Izv. AN SSSR. Fizika Zemli, № 10, P. 91 – 94.
14. Dalatkazin T.Sh., 2023. Metodicheskie voprosy geodinamicheskogo raionirovaniya massiva gornykh porod s ispol'zovaniem radonometrii [Methodological issues of geodynamic zoning of rock massifs using radonometry]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1, P. 64 – 69. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.064>
15. Geologiya SSSR. T. XII. Permskaya, Sverdlovskaya, Chelyabinskaya i Kurganskaya oblasti. Ch. I. Poleznye iskopaemye [Geology of the USSR. Vol. XII. Perm, Sverdlovsk, Chelyabinsk and Kurgan regions. Part I. Minerals]. Ministerstvo geologii SSSR, Ural. territorial'noe geologicheskoe upravlenie; gl. red. A.V. Sidorenko; red. тома: K.K. Zoloev [i dr.]. Moscow: Nedra, 1973, 632 p.

УДК 622.245

Исмагилова Эльвира Римовна

кандидат технических наук,
магистр нефтегазового дела (Великобритания),
руководитель управления научных
исследований и стратегических разработок
ООО «Научно-исследовательский и проектный
институт уфимского государственного
нефтяного технического университета»,
450075, г. Уфа, ул. Проспект Октября 151
e-mail: Yusupova_elvira@mail.ru

**ПРИЧИНЫ КАНАЛООБРАЗОВАНИЯ
В ЦЕМЕНТНОМ КАМНЕ И СПОСОБЫ
ИХ УСТРАНЕНИЯ***Аннотация:*

В результате разгерметизации заколонного пространства и образования флюидопроводящих каналов на границах контакта обсадная колонна – цементный камень, цементный камень-пласт, а также системы трещин, возникающих при воздействии динамической нагрузки, в разы превосходящей предел прочности камня на изгиб, происходит складывание трасс для миграции пластовых флюидов, в том числе газовых грифонов или заколонной циркуляции воды. Последствиями межколонных флюидопроявлений являются преждевременный износ цементной крепи, сокращение ее безаварийной службы, немедленная остановка скважины на ремонт, все это влечет за собой простои и угнетение режима эксплуатации скважины изменениями во времени градиента давления в зоне дренирования и хоть временным, но снижением подвижности нефти. В связи с тем что специфика технологии и материалов для крепления скважин предопределяют необратимость процесса, каким является цементирование, в некоторых случаях традиционные технологии восстановительных ремонтов оказываются бесполезными, заканчиваясь ликвидацией скважины. Единственным способом профилактики нарушений сплошности цементной крепи и восстановлением герметичности цементного кольца без перевода скважины в ремонт является разработка и применение специального тампонажного материала, который бы обладал самозалечивающимися свойствами, способными к самоактивации в случае разгерметизации крепи скважины.

Ключевые слова: «самозалечивающиеся» цементы, восстановление крепи скважины, разгерметизация заколонного пространства, ремонтно-изоляционные работы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.043

Ismagilova Elvira R.

Candidate of Technical Sciences,
MSc in Petroleum and Gas Engineering (UK), Head
of the Department of Scientific Research and Strategic
Development LLC "Research and Design Institute of the Ufa State Petroleum Technological University",
450075 Ufa, 151 Prospect Oktyabrya,
e-mail: Yusupova_elvira@mail.ru

**CAUSES OF CHANNEL FORMATION
IN CEMENT STONE AND METHODS
OF THEIR ELIMINATION***Abstract:*

As a result of the annular space depressurization and the formation of fluid-conducting channels at the boundaries of the casing-cement stone, cement stone-formation contact, as well as a system of cracks that arise under the influence of a dynamic load, which can be several times greater than the bending strength of the stone, routes are laid for the migration of formation fluids, including gas griffins or behind-the-casing water circulation. The consequences of inter-casing fluid manifestations are premature wear of the cement lining, a reduction in its trouble-free service, immediate shutdown of the well for repairs, all this entails downtime and suppression of the well operating mode due to changes in time of the pressure gradient in the drainage zone and, although temporarily, but a decrease in oil mobility. Due to the fact, that the specific technology and materials for cementing wells predetermine the irreversibility of the process, which cementing is, in some cases traditional restoration technologies turn out to be useless, ending in the abandonment of the well. The only way to prevent violations of the continuity of the cement lining and restore the tightness of the cement ring without transferring the well to repair is the development and use of a special cementing material that would have self-healing properties, capable of self-activation in the event of depressurization of the well lining.

Key words: "self-healing" cements, restoration of well support, depressurization of the borehole annulus, repair and insulation work.

Скважина представляет собой горную выработку цилиндрической формы, стенки которой укрепляются обсаживанием стальными трубами с последующей цементацией затрубного пространства, при этом одной из основных функций цементной крепи скважины является барьерная защита обсадной колонны от воздействий агрессивной среды

и предупреждение миграции пластовых флюидов. Однако в результате проведения внутрискважинных технологических операций, геолого-технических условий и особенностей физико-химической природы гидратации цемента может происходить нарушение сплошности цементной крепи с образованием проводящих каналов, отличающихся формой, размером и местом локализации, в том числе возможно увеличение проницаемости цементного камня, что влечет за собой создание условий для миграции пластовых флюидов. Флюидопроявления могут обнаруживаться в виде газовых грифонов или заколонной циркуляции воды, что неминуемо приводит к нарушению режима эксплуатации скважины [1].

Автор данной работы ставит *целью* изучение природы образования каналов в цементной крепи, рассматривает способы сохранения герметичности цементного камня, предлагает способ восстановления целостности цементного кольца специальным тампонажным материалом с «самозалечивающимися» свойствами, исходя из вида проявления, в частности, профессиональный интерес автора связан с заколонной циркуляцией воды.

В связи с этим *задачами* исследования являются изучение механизма возникновения полостей; обоснование объектов для эффективного применения специального цемента с целью селективного крепления участков крепи, имеющих наибольшую вероятность образования сквозных открытых трещин через определение вида капиллярных дефектов в цементном камне и характеристик трещины; а также оценка размера порового канала, которая послужит обоснованием выбора набухающего элемента, обладающего достаточным водопоглотительным потенциалом в корреляции со степенью разбухания добавки, гипотетически способной перекрыть сечение проводящего канала.

В связи с тем что вопросы профилактики разгерметизации заколонного пространства, а также эффективного восстановления целостности цементного кольца при наличии широкого ассортимента водоизоляционных материалов и технологий ограничения водопритоков до сих пор остаются открытыми, разработка «самозалечивающегося» тампонажного материала, позволяющего цементному камню самостоятельно восстанавливать свою целостность без остановок скважины на ремонты и без доступа человека, является одной из наиболее приоритетных задач и многообещающих методов для ликвидации заколонной циркуляции воды, сопровождающейся восстановлением герметичности крепи скважины.

Необходимо отметить, что полости в зацементированном затрубном пространстве имеют разную природу и механизм образования, основные из них могут возникать (рис. 1) между цементом и обсадной колонной; между цементной крепью и пластом; внутри цементного кольца в виде сквозных каналов; в цементном кольце в виде сквозных каналов, образованных через негерметичность в обсадной колонне [2].

Французские ученые в своих исследованиях по разрушению цементного кольца показывают, что при существующих динамических нагрузках современная скважина подвержена перепаду давления от 1,4 до 5,3 МПа/м. Согласно данным [3] компании Шлюмберже размер водопроводящих каналов составляет около 100 мкм, а усредненный градиент давления прорыва воды по заколонному пространству – около 2,8 МПа/м. Наши отечественные ученые в своих работах показали, что цементное кольцо начинает разрушаться при перепаде давления в 2 МПа/м [1]. Такой разброс в значениях свидетельствует о невозможности точного определения стойкости тампонажного материала к ударным нагрузкам, возникающим при воздействии как нарастающих динамических нагрузок, так и внезапно приложенных сил. Следует отметить, что возникновение заколонной циркуляции может быть также обусловлено не только низким качеством строительства скважин, но и созданием высоких перепадов давления на продуктивные пласты при эксплуатации скважин, дифференциацией текущих пластовых давлений между нефтяными и водонасыщенными пластами, следствием поступления контурной и нагнетаемой воды, подтягивания конуса подошвенной воды.

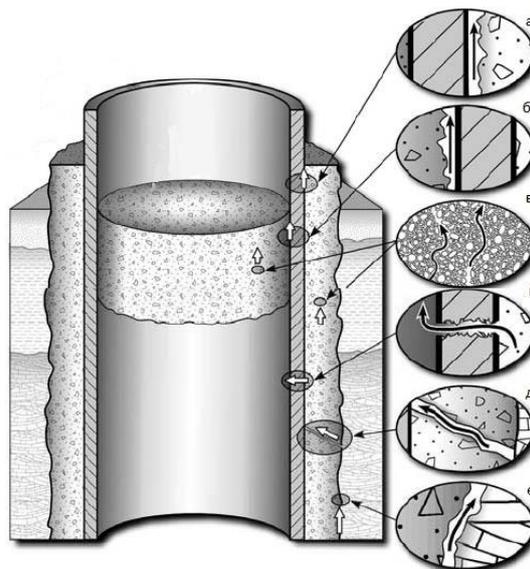


Рис. 1. Виды нарушений сплошности цементной крепи:

- a* – между цементом и обсадной колонной; *b* – между обсадной колонной и цементным стаканом; *c* – сквозь цементный стакан; *z* – через негерметичность обсадной колонны; *d* – через трещины цементного кольца; *e* – между цементной крепью и пластом

При помощи метода конечных элементов (МКЭ) в прикладной программе ANSYS была произведена оценка деформаций и напряжений в цементном камне из бездобавочного портландцемента с учетом гетерогенности структуры отсканированного на аппарате неразрушающего контроля CT Scanner имеющегося образца. Моделирование поперечной нагрузки на цементную крепь скважины показало, что механическая прочность цементного камня напрямую связана с нагрузкой, приложенной к участку цементного камня, при которой напряжение в зоне приложения динамической нагрузки растет линейно вместе с деформацией до тех пор, пока не начнется развитие микротрещин и разрывов, переходя от линейно-пропорциональной зависимости к нелинейному закону вблизи точки разрушения. В результате поглощения образцом энергии разрыва в месте наиболее разнородной структуры камня происходит инициация трещинообразования, заключающаяся в неконтролируемом расползании капиллярных дефектов. Так, наблюдается раскрытие и срастание трещин между собой, после чего, при превышении нагрузкой предела механической прочности образца, отмечается необратимость деформационных изменений, в результате чего трещины достигают критического размера, разряжаясь на внешнюю поверхность камня, при этом принимая различные геометрические формы. Значения деформации и геометрия полостей в цементном камне зависят от зоны, вида и объема прилагаемой динамической нагрузки, так наиболее выраженные деформационные изменения проявляются при вторичном вскрытии пласта, перфорациях, ГРП и освоении [4]. В результате длительного (до 3 часов) ударного и вибрационного воздействия (при давлении до 30 МПа) на цементное кольцо происходит неконтролируемое разрастание и последующее расползание капиллярных дефектов, приводящих к разрушению тонкой цементной рубашки.

Следует выделить некоторые виды полостей, возникающих в результате капиллярных дефектов, появляющихся в цементном камне при проведении технологических операций внутри обсадных колонн или коррозии цементного камня: это поры, имеющие сечение, близкое к окружности; трещины с параллельными стенками в виде щели; трещины с непараллельными стенками конического сечения; трещины, имеющие произвольную геометрию (рис. 2) [2]. Образование любого канала, характеризуемого длиной, шириной (раскрытие несплошности) и глубиной, обозначает трещину. При этом разли-

чают тупиковые (замкнутые) и сквозные трещины (рис. 3), одни имеют только один выход на поверхность (рис. 3а), а другие, соответственно, два выхода на поверхность (рис. 3б).

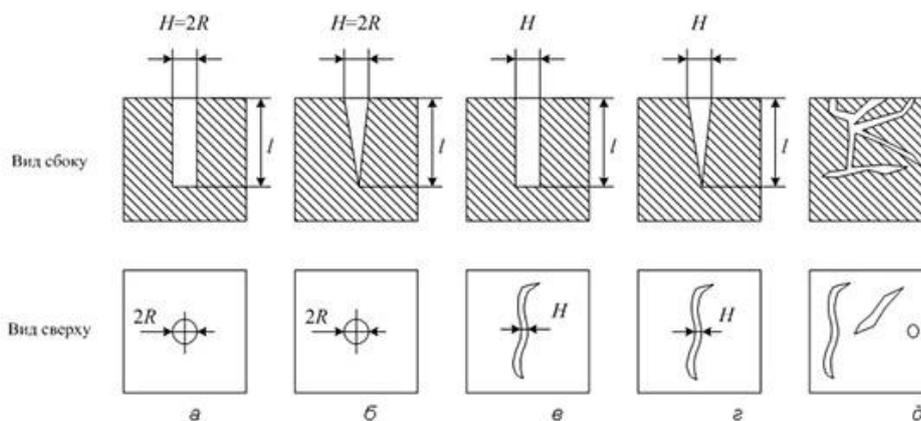


Рис. 2. Виды капиллярных дефектов в цементном камне:

а – цилиндрическая пора; *б* – коническая пора; *в* – трещина с параллельными стенками; *г* – трещина с непараллельными стенками; *д* – трещина произвольной геометрии

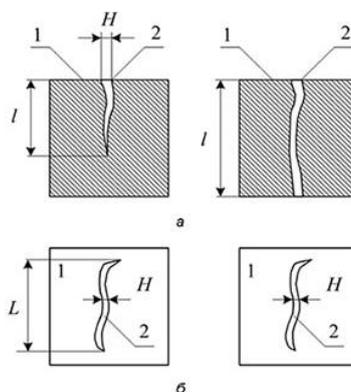


Рис. 3. Характеристика трещин:

а – тупиковая и сквозная трещины (вид сбоку); *б* – тупиковая и сквозная трещины (вид сверху)

Необходимо отметить, что трещины, образовавшиеся в результате усталостного разрушения цементного камня, перфорационных работ, избыточной водоотдачи или объемной усадки, представляют собой смешение различных моделируемых каналов, сообщающихся и не сообщающихся между собой. При этом наиболее опасными, с точки зрения герметичности крепи скважины, являются сквозные поры и капилляры, образовавшиеся в участках крепи скважины, вскрывшей нефтеносные пласты, подстилаемые водоносными горизонтами (нижние воды), либо имеющие в наличии промежуточные воды, либо водоносные горизонты, залегающие выше нефтеносного пласта (верхние воды). Следовательно, в результате длительной статической или превышающей пороговые значения механической прочности, динамической нагрузки, каналы, соединяясь между собой в систему, формируют транспортную сеть, по которой прорывается вода (нижняя, верхняя, подошвенная), приводящая к заколонным циркуляциям.

Для оценки размера порового канала, принимая во внимание фильтрацию пластовой воды с постоянным расходом через условный капилляр и поры межгранулярной пористости цементной матрицы, выстраиваются соотношения уравнений Дарси и Пуазейля:

$$Q = \frac{k \times F \times \Delta p}{\mu \times L}; \quad (1)$$

$$Q = \frac{R^2 \times F \times \Delta p}{8\mu \times L}, \quad (2)$$

откуда:

$$k = \frac{R^2}{8}, \quad (3)$$

где k – проницаемость породы, м^2 ; F – площадь фильтрации, м^2 ; Δp – перепад давления, Па; μ – вязкость, Па·с; L – длина, м; D – диаметр капилляра, м.

После преобразования коэффициента проницаемости и радиуса капилляра к одной размерности получим эмпирическое уравнение для оценки коэффициента проницаемости при фильтрации жидкости через капилляр:

$$k = 0,125 R^2; \quad (4)$$

$$F = \pi R^2. \quad (5)$$

Далее из уравнения Дарси выражаем радиус капилляра, предварительно переведя в систему [СИ] известные значения всех параметров. Вычислив диаметр капилляра, можно провести анализ величины порового канала и степень воздействия капиллярных сил на движение жидкости. Данные манипуляции позволят определить спектр водоизоляционных материалов и подобрать наиболее эффективную технологию ограничения водопритока.

В связи с тем что все вышеотмеченные виды негерметичностей требуют разных подходов, с целью профилактики их образования и восстановления целостности цементного кольца, приоритетным является определение механизма их возникновения.

Рассуждая о полостях, возникающих на границах контактов «колонна – цемент» и «цемент – пласт», выявлено, что процессы взаимодействия цемента с породой и металлом определяются физико-химическими свойствами цемента, природой металла и пород, адгезией, химическим сродством и условиями твердения цементного раствора [2].

Особенностью контакта цемента с обсадной колонной является то, что стенки последней имеют покрытие в виде пленки бурового раствора, дисперсионная основа которого определяет силу сцепления с цементным камнем, которая, к примеру, в случае обработки глинистым раствором может быть снижена до нуля [3]. Высокие температуры и давление также не способствуют возрастанию сцепления цементного раствора с колонной, покрытой буровым раствором.

Важным нюансом в работе цемента с обсадной колонной является неизбежность образования полостей, связанных с возникновением усадочных деформаций, вызванных нарушением контакта цементного камня с внешней границей обсадной колонны, что приводит к укорачиванию цементного кольца и нарушению сплошности контакта в 75 % случаев. Однако установлено, что в контактном слое цемента с железом происходят реакции, сопровождающиеся образованием полукальциевого феррита, благодаря уплотнению которого и старению с течением времени сцепление возрастает [5].

Сцепление породы с цементным камнем всегда успешнее и лучше, это связано с высокой шероховатостью среза пласта, следственно, лучшей адгезией, также химическим взаимодействием по причине сродства группы органических веществ. При этом причинами образования проводящих каналов внутри цементного кольца являются хрупкость камня либо его высокая проницаемость.

Следует отметить, что существует ряд превентивных мер, направленных на сохранение целостности цементной крепи. Так, имеется множество эффективных технологий минимизации последствий от ударных воздействий механических нагрузок, испытываемых обсадной колонной и цементным камнем. Минимизация трещинообразования может быть достигнута применением заполнителей в тампонажных растворах, использованием армированных цементов и материалов и т.д. Так, для повышения удароустойчивости цементного камня и с целью гашения напряжений применяют легкие алюмосиликатные полые микросферы, анизометрические наполнители слоистой или чешуйчатой (несферической) формы, высокодисперсные волокнистые наполнители, фибру. Однако

применение микросфер и дисперсного армирования не исключает разгерметизацию за колонного пространства и появление каналов, возникающих при превышении напряжений над механической прочностью цементного камня во время внутрискважинных работ, и, самое главное, данные технологии не направлены на восстановление герметичности уже поврежденной цементной крепи. Также существует множество современных водоизоляционных материалов и технологий, направленных на ограничение водопритоков в поврежденной цементной крепи, но все они имеют низкую продолжительность технологического эффекта, а также редко направлены на восстановление целостности крепи скважины [6].

В проведенной исследовательской работе [7] эффективным решением по герметизации водопроводящих каналов цементной крепи стала разработка тампонажного материала [10] для ликвидации заколонных циркуляций воды на основе сухого порошка тампонажного портландцемента и внедренных в него модифицирующих добавок в виде водонабухающих полимерных гранул, покрытых прочной водорастворимой оболочкой из полимерного комплекса, препятствующей преждевременной активации набухающих добавок при затворении цементной смеси и во время ее прокачивания в затрубное пространство скважины.

Анализируя вышесказанное, умозаключаем, что для обеспечения герметичности крепи скважины тампонажному раствору необходимо задать такие свойства, которые бы обеспечили минимальные фильтрационные показатели и максимальные механические характеристики при условии соблюдения безусадочности цементного камня на границе двух контактов, – с обсадной трубой и породой. Исходя из этого, актуальным является модернизация традиционной технологии цементирования скважин путем алгоритмизации процесса приготовления рецептур тампонажных составов относительно видов нарушений сплошности цементной крепи, типов флюидопроявлений и назначений, таких как профилактика и восстановление целостности цементного кольца [8].

Алгоритмизация подходов может строиться на базе решения проблематики межколонного флюидопроявления, в частности в борьбе с углеводородными проявлениями или с водопроявлениями и последующим применением «умных» тампонажных цементов с управляемым высвобождением инкапсулированного агента внутри цементной матрицы. Так, профилактика появления межколонного давления, грифонов в результате образования полости в связи с возникновением усадочных деформаций, вызывающих нарушения контакта цементного камня с внешней границей обсадной колонны и приводящих к укорачиванию цементного кольца, может быть решена применением тампонажного наноцемента [9], модифицированного углеводородонабухающей добавкой. Ликвидация заколонной циркуляции воды с последующим восстановлением герметичности цементного камня – применением тампонажного портландцемента, модифицированного водонабухающей добавкой.

В заключение, необходимо признать, что цементная крепь скважины является остовом всего технического сооружения, а нарушение ее барьерных функций влечет за собой неминуемые экологические проблемы и колоссальные экономические потери. Вместе с тем не опровергнуть тот факт, что профилактики нарушений сплошности цементной крепи как таковой не существует. Однако политика эко-ориентированности обязывает применять экологически безопасные материалы, а также обеспечивать технологические процессы, исключаяющие какое-либо негативное воздействие на окружающую среду. Одним из современных альтернативных направлений в области повышения качества крепления скважин является применение специального тампонажного материала, обладающего самозалечивающимися свойствами, принцип работы которого заключается в герметизации проводящих каналов предварительно интегрированными в тампонажный цементный порошок модифицирующими добавками, которые, активируясь при взаимодействии с пластовым флюидом, блокируют образованные в цементном камне

трещины, тем самым восстанавливая герметичность крепи скважины [10]. При этом элиминация тяжелой ремонтной техники из ремонтного процесса позволит предотвратить выбросы в атмосферу загрязняющих веществ – продуктов сгорания при сжигании горюче-смазочного топлива. Отсутствие рабочей бригады, исключение транспортировки оборудования и материалов не допустят риска спонтанного вредоносного воздействия на локальный ареал с характерными видами растений и животных. В том числе важно предупреждение шумового и вибрационного загрязнения во время проведения внутрискважинных операций, несущих опасность отрицательного воздействия на биоту.

В завершении отмечается, что цементирование обсадной колонны традиционным тампонажным материалом из бездобавочного портландцемента по всей длине будет всегда иметь ряд существенных недостатков, так как по мере увеличения прочности цементного камня растет и его хрупкость, портландцемент обладает низкой прочностью на растяжение, а также низкой ударной стойкостью и не может эффективно противостоять динамическим нагрузкам, возникающим при циклических ударно-вибрационных манипуляциях. Однако изучив механизм возникновения полостей, проведя анализ и подобрав из заданных критериев материал, пригодный для создания «самозалечивающегося» цемента для изоляции водопроводящего канала цементного камня посредством образования экрана, а также обеспечив бандажное размещение этого цемента в областях, потенциально опасных с точки зрения образования проводящих каналов, можно производить рациональную закладку специального тампонажного материала, готового при появлении пластового флюида приступить к автономному восстановлению герметичности крепи скважины.

Список литературы

1. Исмагилова Э.Р., Агзамов Ф.А., 2016. Разработка добавок в «самозалечивающиеся» цементы для восстановления герметичности цементного кольца нефтяных и газовых скважин. *НТЖ «Бурение и Нефть»*, т. 5, № 1, С. 36 – 41.
2. Исмагилова Э.Р., Агзамов Ф.А., Аббас А.Д., 2017. Оптимизация дисперсности добавок в самозалечивающихся цементах. *Георесурсы*, Т. 19, № 2, С. 129 – 134.
3. Беллабарба М., Бюльте-Лойе Э., Фрелиш Б., Ле Руа-Делаж С., Ван Кейк Р., Зиру С., 2008. Обеспечение эффективного разобщения пластов после окончания эксплуатации скважин. *Нефтегазовое обозрение*, Том 20, № 1 (Весна), С. 22 – 37.
4. Ишбаев Г.Г., Дильмиев М.Р., Ишбаев Р.Р., Латыпов Т.Р., 2015. Разработка тампонажных материалов повышенной ударной прочности. *НТЖ «Бурение и Нефть»*, № 9, С. 38 – 41.
5. Булатов А.И., 1990. *Формирование и работа цементного камня в скважине*. Москва: Недра, 408 с.
6. Юнг В.Н., Бутт Ю.М., Журавлев В.Ф. и др., 1952. *Технология вяжущих веществ*. Под ред. В.Н. Юнга. Москва: Промстройиздат, 600 с.
7. Исмагилова Э.Р., 2022. Разработка цементной технологии для самовосстановления герметичности крепи скважины. *НТЖ «Бурение и нефть»*, № 4, С. 16 – 21.
8. Agzamov F.A., Ismagilova E.R., Beshir M.A., 2022. Elaboration of mending additives for the cement sheath repair. *Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана*, Том 4, № 3. <https://doi.org/10.54859/kjogi108564>
9. Бикбау М.Я, Высоцкий Д.В., Тихомиров И.С., 2011. «Бетоны на наноцементных: свойства и перспективы». *Технологии бетонов*, № 11 – 12 (64 – 65), С. 31 – 35.
10. Пат. 2760860 Российская Федерация. Тампонажный материал / Э.Р. Исмагилова, Ф.А. Агзамов; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» – № 2021102649, заявл.04.02.2021, опубл. 01.12.2021, Бюл. № 34.

References

1. Ismagilova E.R., Agzamov F.A., 2016. Razrabotka dobavok v "samozalechivayushchiesya" tsementy dlya vosstanovleniya germetichnosti tsementnogo kol'tsa neftyanykh i gazovykh skvazhin [Elaboration of additives for self-healing cements to restore the cement stone integrity in oil and gas wells]. NTZh "Burenie i Neft", V. 5, № 1, P. 36 – 41.
2. Ismagilova E.R., Agzamov F.A., Abbas A.D., 2017. Optimizatsiya dispersnosti dobavok v samozalechivayushchikhsya tsementakh [Optimization of self-healing additives dispersity in cement]. Georesursy, V. 19, № 2, S. 129 – 134.
3. Bellabarba M., Byul'te-Loie E., Frelish B., Le Rua-Delazh S., Van Keik R., Ziru S., 2008. Obespechenie effektivnogo razobshcheniya plastov posle okonchaniya ekspluatatsii skvazhin [Ensuring effective isolation of layers after completion of well operation]. Neftegazovoe obozrenie, Vol. 20, № 1 (Vesna), P. 22 – 37.
4. Ishbaev G.G., Dil'miev M.R., Ishbaev R.R., Latypov T.R., 2015. Razrabotka tamponazhnykh materialov povyshennoy udarnoy prochnosti. [Development of grouting materials with increased impact strength]. Razrabotka tamponazhnykh materialov povyshennoi udarnoi prochnosti. NTZh "Burenie i Neft", № 9, P. 38 – 41.
5. Bulatov A.I., 1990. Formirovanie i rabota tsementnogo kamnya v skvazhine [Formation and work of cement stone in a well]. Moscow: Nedra, 408 p.
6. Yung V.N., Butt Yu.M., Zhuravlev V.F. i dr., 1952. Tekhnologiya vyazhushchikh veshchestv [Technology of binders]. Pod red. V.N. Yunga. Moscow: Promstroizdat, 600 p.
7. Ismagilova E.R., 2022. Razrabotka tsementnoi tekhnologii dlya samovosstanovleniya germetichnosti krepki skvazhiny [Elaboration of cementing technology for well's cement sheath self-restoration]. NTZh "Burenie i neft", № 4, P. 16 – 21.
8. Agzamov F.A., Ismagilova E.R., Beshir M.A., 2022. Elaboration of mending additives for the cement sheath repair. *Vestnik neftegazovoi otrasli Kazakhstana*, Vol. 4, № 3. <https://doi.org/10.54859/kjogi108564>
9. Bikbau M.Ya, Vysotskii D.V., Tikhomirov I.S., 2011. Betony na nanotsementakh: svoystva i perspektivy [Concretes based on nanocements: properties and prospects]. Tekhnologii betonov, № 11 – 12 (64 – 65), P. 31 – 35.
10. Pat. 2760860 Rossiiskaya Federatsiya. Tamponazhnyi material [Backfill material. Patent for invention] / E.R. Ismagilova, F.A. Agzamov; patentoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet" – № 2021102649, zayavl.04.02.2021, opubl. 01.12.2021, Byul. № 34.

УДК 622.02:550.3

Шевченко Максим Дмитриевич
младший научный сотрудник,
лаборатория технологии снижения риска
катастроф при недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

Мельник Виталий Вячеславович
кандидат технических наук,
заведующий отделом геомеханики,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: melnikvv74@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО
СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ
ПОРОД НА ТЕРРИТОРИИ
СТРОИТЕЛЬСТВА ШАХТНОГО
ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО
КОПРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ***

Аннотация:

Представлен опыт применения комплекса геофизических методов для изучения геолого-геофизического строения верхней части геологического разреза на территории строительства шахтного эксплуатационного копра. Используемые в исследовании геофизические методы позволяют определить причины развития деформации зданий и сооружений, что позволяет принять соответствующие меры и предотвратить риск возникновения природно-техногенных катастроф. Представлен краткий обзор примеров аварийного состояния зданий и сооружений, связанного с развитием геодинамических процессов на разных территориях РФ, что определяет актуальность выполнения исследований. Цель работы заключается в проведении исследования геомеханического состояния массива горных пород на территории строительства шахтного эксплуатационного копра с использованием геофизических методов. Основная решаемая задача в исследованиях состоит в снижении риска природно-техногенных катастроф, связанных с деформацией зданий и сооружений на территориях строительства и эксплуатации подземных горных выработок. Используются два геофизических метода – спектрального сейсмопрофилирования, являющегося оптимальным с точки зрения исследования структурных особенностей массива горных пород за счет хорошей информативности получаемых результатов и простой возможности проведения измерений и георадарного зондирования, используемого для изучения неоднородностей почвы, мощности пластов различного

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.051

Shevchenko Maxim D.
Junior Researcher,
Laboratory of technology for reducing the risk
of catastrophes in subsoil use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka,
e-mail: maksim_shevchenko97@inbox.ru

Melnik Vitaliy V.
Candidate of Technical Sciences,
Head of Department of Geomechanics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: melnikvv74@mail.ru

**STUDY OF THE GEOMECHANICAL
STATE OF THE ROCK MASS
ON THE CONSTRUCTION SITE OF
A MINE PRODUCTION HEADFRAME
USING GEOPHYSICAL METHODS**

Abstract:

This article presents the experience of using a set of geophysical methods to study the geological and geophysical structure of the upper part of the geological section on the territory of construction of a mine production headframe. The geophysical methods used in the study make it possible to determine the reasons for the development of deformation of buildings and structures, which makes it possible to take appropriate measures and prevent the risk of natural and man-made disasters. A brief overview of examples of emergency conditions of buildings and structures associated with the development of geodynamic processes in different territories of the Russian Federation is presented, which determines the relevance of the research. The purpose of the work is to conduct a study of the geomechanical state of the rock mass in the construction area of the mine production headframe using geophysical methods. The main problem to be solved in the research is to reduce the risk of natural and man-made disasters associated with the deformation of buildings and structures in the areas of construction and operation of underground mines. The complex of geophysical methods used consists of two methods: the spectral seismic profiling method, which is optimal from the point of view of studying the structural features of the rock mass, due to the good information content of the results obtained and the simple possibility of taking measurements, and the georadar sounding method used to study soil heterogeneities, power layers of various types, determination of groundwater levels and other factors affecting the integrity of buildings and structures. Results of research by this complex of geophysical studies have shown their effectiveness and made it possible to identify factors

* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР, тема 3 (2022-2024).

типа, определения уровня грунтовых вод и других факторов, влияющих на целостность зданий и сооружений. Результаты, полученные с помощью данного комплекса геофизических исследований, показали свою эффективность и дали возможность выявить факторы, влияющие на деформацию сооружения, что позволит устранить проблему деформации зданий и сооружений и обеспечить их безопасную эксплуатацию.

Ключевые слова: геомеханические исследования, геофизика, георадиолокация, спектральное сейсмопрофилирование, деформация зданий и сооружений, геодинамические процессы, природно-техногенные катастрофы, структурные неоднородности.

influencing the deformation of a structure, which will eliminate the problem of deformation of buildings and structures and ensure their safe operation.

Key words: geomechanical studies, geophysics, ground penetrating radar, spectral seismic profiling, deformation of buildings and structures, geodynamic processes, natural and man-made disasters, structural heterogeneities.

Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений при недропользовании является одной из актуальных задач на протяжении всей истории горного дела. Особую важность данная задача приобретает, когда речь идет о строительстве на территории подземной отработки месторождений полезных ископаемых. Неуклонный рост техногенного воздействия на геологическую среду вызывает возрастающее распространение различных эндогенных и экзогенных геодинамических процессов, что приводит к риску возникновения природно-техногенных катастроф, таких как, например, развитие трещин в стенах здания бассейна «Дельфин» в г. Соликамске; деформации зданий и сооружений от оползневых процессов на территории г. Ставрополя [1]. Развитие деформации земной поверхности за счет суффозионного выноса дисперсных грунтов, за счет изменения гидродинамического режима подземных вод приводит к образованию трещин и деформации построек [2].

Одним из способов решения проблемы развития инженерно-геологических процессов и прогноза их развития является проведение инженерно-геофизических исследований. Согласно СП 11-105-97 Часть VI. «Правила производства геофизических исследований», одним из целевых критериев проведения геофизических работ является выявление и изучение геологических процессов и их изменений во времени [3]. Однако для получения разносторонней информации о местоположении структурных элементов, их параметров, а также инженерно-геологических и гидрогеологических условиях целесообразно применять комплекс геофизических методов, что позволит дать оценку состоянию горного массива по разным геофизическим свойствам.

Цель работы заключается в проведении исследования геомеханического состояния массива горных пород на территории строительства шахтного эксплуатационного копра с использованием геофизических методов, что позволит определить состояние горного массива и дать его оценку.

Описание объекта исследования

Объектом исследования выступает массив вмещающих горных пород месторождения «Юбилейное», расположенный в пределах Баймак-Бурибайского рудного района на юге западного борта Магнитогорской мегазоны [4]. Месторождение осложнено складчатыми деформациями и крутопадающими структурно-тектоническими нарушениями [5].

Согласно проведенным инженерно-геологическим изысканиям, в 2017 г. в пределах участка исследований было выделено пять инженерно-геологических элементов

(ИГЭ). Основанием котлована, вырытого на глубину 12 – 13 м, является суглинок, засыпанный щебнем до глубины заложения фундаментов.

В 2023 г. коллективом отдела геомеханики ИГД УрО РАН было проведено рекогносцировочное исследование для получения информации о причинах возникновения неравномерного проседания грунта основания фундамента сооружений. При изучении структурных особенностей массива, подстилающего основание фундамента, было выполнено 9 профилей методом спектрального сейсмопрофилирования (ССП) и 9 профилей методом георадарного зондирования (ГРЗ), глубина исследований составила 80 и 15 м, соответственно.

Методы проведения исследования

Как показала практика [6 – 9], наиболее полную информацию об особенностях строения массива горных пород можно получить, используя комплекс геофизических методов, включающий метод ССП и ГРЗ.

Метод спектрального сейсмопрофилирования. Метод спектральной сейсморазведки был основан на использовании зависимости между спектральным составом собственного колебательного процесса, возникающего при ударном воздействии на дневную поверхность, и строением породного массива. Аппаратурно-методический комплекс ССП позволяет выявлять зоны тектонических нарушений (ЗТН), а также зоны повышенной трещиноватости. Сущность метода и методика проведения измерений описана по материалам изобретателя, более подробные сведения о методе представлены на сайте производителя оборудования [10].

Метод георадиолокационных исследований. Принцип работы метода георадиолокационного исследования основан на использовании излучения сверхширокополосных импульсов электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [11]. Распространение электромагнитных волн в различных средах характеризуется скоростью V , которая определяется соотношением:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}},$$

где c – скорость распространения волны в вакууме; ϵ – диэлектрическая проницаемость.

Зная скорость распространения волны и измерив время задержки сигналов – Δt , отраженных от границ среды, можно определить толщину слоя:

$$H = \frac{v \cdot \Delta t}{2}.$$

При проведении исследований использовался георадар «Око – 2» с антенным блоком АБ – 150 с центральной частотой 150 МГц. Обработка полученных данных проводилась в ПО Geoscan32.

Результаты исследования

По результатам исследования методом спектрального сейсмопрофилирования на ССП-разрезе, представленном на рис. 1, были выделены участки с высоким показателем сейсмической добротности (красная линия), расположенные на интервале от 0 до 45 м и простирающиеся на глубину от 40 до 80 м. Данная аномалия может указывать на наличие структурно-тектонических нарушений, которые могут повлиять на устойчивость опор копра ствола на участке исследования.

Методом георадарного зондирования были выявлены участки, на которых отчетливо видны карманы разуплотнения на глубину до 3 м и слабовыраженные аномалии, проявляющиеся на интервале 2 – 4 м, на глубине 3 – 7 м (рис. 2).

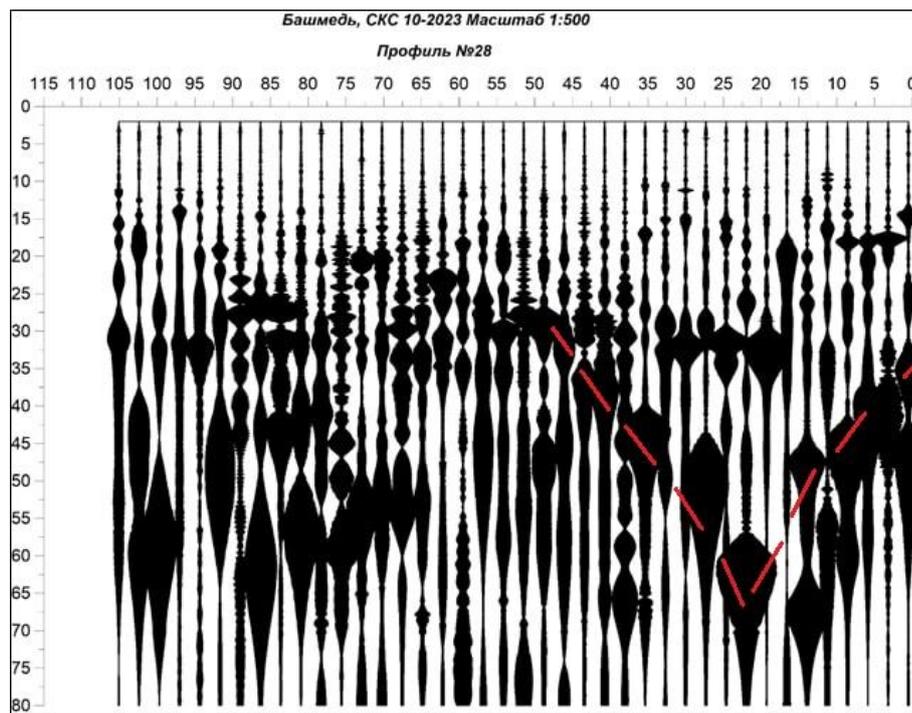


Рис.1. ССП – разрез участка исследований

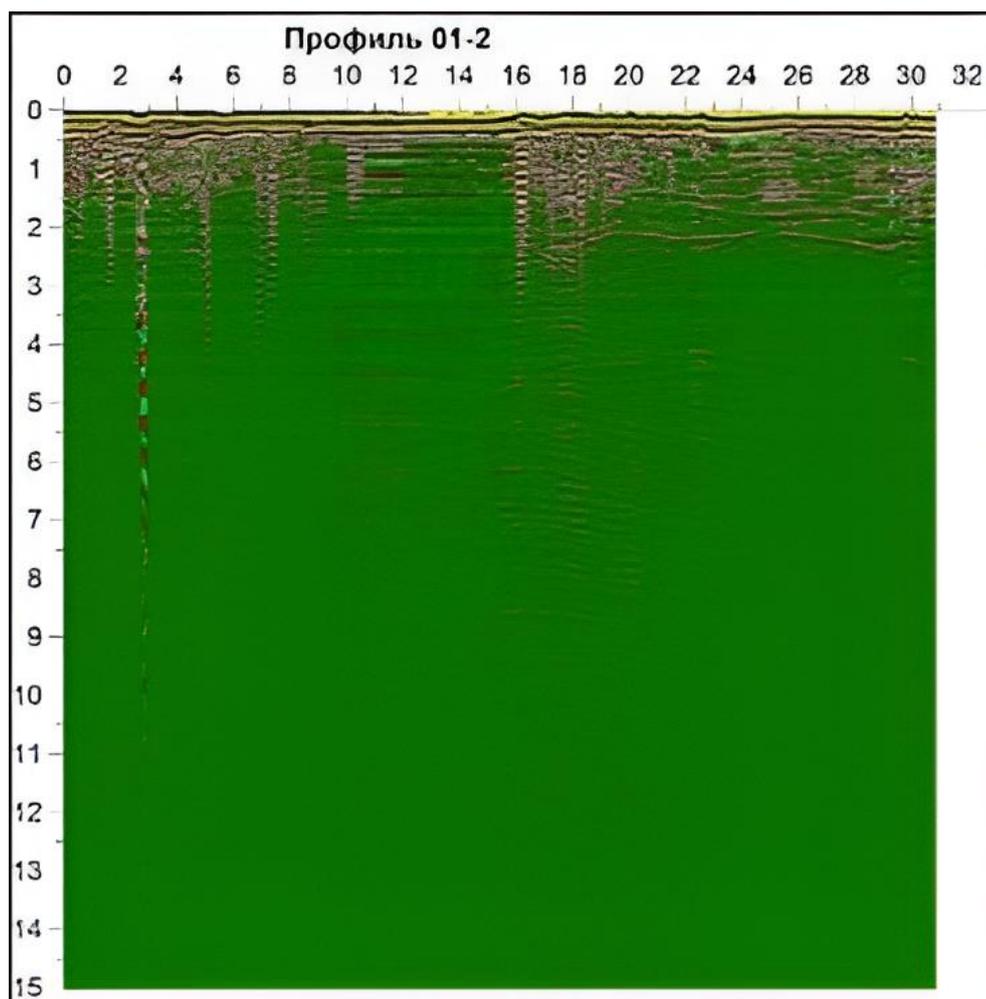


Рис. 2. Радиограмма участка исследований

По остальным профильным линиям как методом ССП, так и методом георадарного зондирования ярко выраженных аномалий не было определено.

Заключение

Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к изменению равновесия в геологической среде и развитию инженерно-геологических процессов и явлений, что в свою очередь напрямую влияет на целостность зданий и сооружений и их безопасную эксплуатацию.

Применение современных геофизических методов при решении задач обеспечения безопасной эксплуатации различных объектов недропользования позволяет получить разностороннюю информацию о геологическом строении массива горных пород, его изменчивости, наличии структурно-тектонических нарушений и гидрогеологических условий. Полученная информация позволяет определить ряд факторов, влияющих на строительство и эксплуатацию зданий и сооружений и, как следствие, дать им оценку и снизить риск возникновения природно-техногенных катастроф.

Список литературы

1. Сербин В.В., Гальченко И.В., Газарян З.Э. и др., 2023. Проблемы надежной эксплуатации объектов водоснабжения города Ставрополя в сложных геологических условиях и при развитии оползневых процессов. *Наукосфера*, № 1 – 2, С. 262 – 267.
2. Шевченко М.Д., Мельник В.В., Замятин А.Л., 2023. Геофизические исследования на участках строительства и эксплуатации подземных рудников. *Проблемы недропользования*, № 1(36), С. 105 – 112. DOI 10.25635/2313-1586.2023.01.105
3. СП 11-105-97 Часть VI «Правила производства геофизических исследований». URL: <https://pkb-titan.ru/upload/library/SP/SP%2011-105-97-6.pdf?ysclid=lq52xqhpha337139016> (дата обращения 14.12.2023)
4. Викентьев И.В., Саенко А.Г., Карелина Е.В., Ежов А.И., & Трубкин Н.В., 2011. Минералогические особенности руд медноколчеданного месторождения юбилейное (Ю. Урал). *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*, № 1, С. 84 – 90.
5. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2008 г.». Москва: Минерал, 2009.
6. Мельник В.В., 2021. Геомеханический мониторинг геофизическими методами при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. *Проблемы недропользования*, № 4(31), С. 36 – 43. DOI 10.25635/2313-1586.2021.04.036.
7. Мельник В.В., Далатказин Т.Ш., Замятин А.Л., 2022. Решение задач безопасности ведения подземных горных работ при отработке угольных лав с использованием современных методов геофизики. *Проблемы недропользования*, № 4(35), С. 122 – 131. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.122. – EDN GXCPZW.
8. Харисов Т.Ф., Мельник В.В., Харисова О.Д., Замятин А.Л., 2020. Геофизические исследования массива горных пород в условиях подземного рудника. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 255 – 263. DOI 10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263.
9. Харисов Т.Ф., Мельник В.В., Харисова О.Д., Замятин А.Л., 2020. Геофизические исследования массива горных пород в условиях подземного рудника. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 255 – 263. DOI 10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263.
10. Гликман А.Г., 2002. *Физика и практика спектральной сейсморазведки. НТФ "Геофизпрогноз"*. URL: <http://newgeophys.spb.ru/ru/book/>. (дата обращения: 03.12.2023)
11. Федоров М.П., 2022. Методика георадиолокационных исследований ледяного покрова (на примере р. Лена на участке Табагинский мыс - Кангаласский мыс). *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*, № 5, С. 18 – 32. DOI 10.35567/19994508_2022_5_2.

References

1. Serbin V.V., Gal'chenko I.V., Gazaryan Z.E. i dr., 2023. Problemy nadezhnoi ekspluatatsii ob"ektov vodosnabzheniya goroda Stavropolya v slozhnykh geologicheskikh usloviyakh i pri razvitiі opolznevykh protsessov [Problems of reliable operation of water supply facilities in Stavropol in difficult geological conditions and during the development of landslide processes]. *Naukosfera*, № 1 – 2, P. 262 – 267.
2. Shevchenko M.D., Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2023. Geofizicheskie issledovaniya na uchastkakh stroitel'stva i ekspluatatsii podzemnykh rudnikov [Geophysical studies at sites of construction and exploitation of underground ore mines]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1(36), P. 105 – 112. DOI 10.25635/2313-1586.2023.01.105
3. SP 11-105-97 Chast' VI "Pravila proizvodstva geofizicheskikh issledovaniĭ" [Part VI "Rules for the production of geophysical surveys"]. URL: https://pkb-titan.ru/upload/library/SP/SP_11-105-97-6.pdf?ysclid=lq52xqhpha337139016 (data obrashcheniya 14.12.2023)
4. Vikent'ev I.V., Saenko A.G., Karelina E.V., Ezhov A.I., Trubkin N.V., 2011. Mineralogicheskie osobennosti rud mednokolchedannogo mestorozhdeniya yubileinoe (Yu. Ural) [Mineralogical features of ores of the Yubileynoye copper-crusted deposit (Yu. The Urals)]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya*, № 1, P. 84 – 90.
5. Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'evykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2008 g." [State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2008"]. Moscow: Mineral, 2009.
6. Mel'nik V.V., 2021. Geomekhanicheskii monitoring geofizicheskimi metodami pri razrabotke mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh otkrytym sposobom [Geomechanical monitoring by geophysical methods in the development of mineral deposits by the open method]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(31), P. 36 – 43. DOI 10.25635/2313-1586.2021.04.036.
7. Mel'nik V.V., Dalatkazin T.Sh., Zamyatin A.L., 2022. Reshenie zadach bezopasnosti vedeniya podzemnykh gornykh rabot pri otrabotke ugol'nykh lav s ispol'zovaniem sovremennykh metodov geofiziki [Solving the safety problems of conducting underground mining operations during the working out the coal lavas with use of modern methods of geophysics]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(35), P. 122 – 131. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.122. – EDN GXCPZW.
8. Kharisov T.F., Mel'nik V.V., Kharisova O.D., Zamyatin A.L., 2020. Geofizicheskie issledovaniya massiva gornykh porod v usloviyakh podzemnogo rudnika [Geophysical studies of the rock mass in the conditions of an underground mine]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3 – 1, P. 255 – 263. DOI 10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263.
9. Kharisov T.F., Mel'nik V.V., Kharisova O.D., Zamyatin A.L., 2020. Geofizicheskie issledovaniya massiva gornykh porod v usloviyakh podzemnogo rudnika [Geophysical studies of rock mass in the conditions of an underground mine]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3 – 1, P. 255 – 263. DOI 10.25018/0236-1493-2020-31-0-255-263.
10. Glikman A.G., 2002. Fizika i praktika spektral'noi seismorazvedki [Physics and practice of spectral seismic exploration]. NTF "Geofizprognoz". URL: <http://newgeophys.spb.ru/ru/book/>. (data obrashcheniya: 03.12.2023)
11. Fedorov M.P., 2022. Metodika georadiolokatsionnykh issledovaniĭ ledyanogo pokrova (na primere r. Lena na uchastke Tabaginskii mys - Kangelasskii mys) [Technique of geo-radar studies of the ice cover (using the example of the Lena River in the Tabaginsky Cape - Kangelassky Cape section)]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, № 5, P. 18 – 32. DOI 10.355 67/19994508_2022_5_2.

УДК 622.831:528.5

Винальева Екатерина Алексеевна
младший научный сотрудник,
лаборатория сдвижения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: winalewa@gmail.com

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ*

Аннотация:

Процесс сдвижения горных пород развивается по причине нарушения естественного напряженно-деформированного состояния массива вследствие образования горных выработок. Действующие в горном массиве напряжения, собственный вес пород и суффозионные процессы вызывают разрушение и перемещение подработанных пород в выработанное пространство. Этот процесс, развиваясь, достигает поверхности, где образуются провалы, террасы и трещины. Захватывающие толщу горных пород, а также и земную поверхность сдвижения и деформации могут оказаться опасными для расположенных на поверхности сооружений, природных и хозяйственных объектов, в том числе и проведенных в толще пород горных выработок. Актуальность данной проблемы заключается в том, что в последние годы в мире наблюдается увеличение числа процессов сдвижения и деформаций, и это вызывает необходимость мониторинга деформационных процессов на местности. Для этих задач используются как классические, так и спутниковые геодезические приборы. Однако выбор подходящего оборудования – задача не из легких, и она усложняется, когда речь идет о разных условиях работы. В статье рассмотрено геодезическое оборудование, особенности его выбора для мониторинга деформаций земной поверхности, также проведен сравнительный анализ его преимуществ и недостатков в различных условиях работы.

Объектом обзора являются классические и спутниковые геодезические приборы.

Целью работы является сравнительный анализ классического и спутникового оборудования при мониторинге сдвижения горных пород на подработанных территориях, а также составление рекомендаций по выбору приборов.

Ключевые слова: мониторинг, тахеометр, геодезические приборы, нивелир, земная поверхность, измерения, деформации, сдвижение, анализ, подработанные территории.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.057

Vinalyeva Ekaterina A.
Junior Researcher,
Laboratory of rock displacement,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: winalewa@gmail.com

OVERVIEW OF MODERN GEODETIC INSTRUMENTS FOR MONITORING THE DEFORMATION PROCESSES OF THE EARTH'S SURFACE

Abstract:

The process of displacement of rocks develops due to the violation of the natural stress-strain state of the massif due to the formation of mine workings. The stresses acting in the rock mass, the own weight of the rocks and suffusion processes cause the destruction and movement of the undermined rocks into the goaf. This process, when developing, reaches the surface, where dips, terraces and cracks are formed. The displacements and deformations that capture the rock mass, as well as the earth's surface, can be dangerous for structures located on the surface, natural and economic objects, including mine workings carried out in the rock mass. The relevance of this problem lies in the fact that in recent years there has been an increase in the number of displacement and deformation processes in the world, which makes it necessary to monitor deformation processes on the ground. For these tasks, both classical and satellite geodetic instruments are used. However, choosing the right equipment is not an easy task, and it gets more complicated when it comes to different working conditions. This article deals with the geodetic equipment and the features of its choice for monitoring deformations of the earth's surface, it also contains a comparative analysis of its advantages and disadvantages given in various operating conditions.

Key words: monitoring, tacheometer, geodetic instruments, leveling, earth's surface, measurements, deformations, displacement, analysis, undermined territories.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПП, тема № (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1.

Введение

Выемка пластов угля и других залежей полезных ископаемых вызывает образование в недрах земли пустот значительных размеров. Породы, залегающие в кровле горных выработок, под действием силы тяжести и горного давления приходят в движение, обуславливая развитие процесса сдвижения всей толщи, включая земную поверхность. В результате данного процесса деформируется и нарушается целостность крепи горных выработок, попавших в зону сдвижения [1]. Объекты, расположенные на земной поверхности и также попавшие в зону сдвижения, деформируются, а при неблагоприятных условиях подработки даже разрушаются [2], в связи с чем возникает необходимость мониторинга земной поверхности. Для выполнения этой задачи используются различные геодезические приборы, которые позволяют получать данные о координатах и отметках высот точек на местности. Геодезические приборы – это инструменты, используемые для измерения различных параметров земной поверхности. Классические геодезические приборы, такие как нивелиры, теодолиты и тахеометры, имеют некоторые ограничения в использовании для мониторинга деформационных процессов, в то время как спутниковые геодезические приборы, такие как системы глобального позиционирования (GPS), ГЛОНАСС и Galileo, предоставляют более точные и удобные данные о координатах и отметках высот точек на местности при соблюдении определенных условий. В данной статье были рассмотрены особенности работы и применения классических и спутниковых геодезических приборов, а также проведен сравнительный анализ их преимуществ и недостатков в мониторинге деформационных процессов на местности.

Классические геодезические приборы

Классические геодезические приборы, такие как нивелиры, теодолиты и тахеометры, широко применяются для мониторинга деформационных процессов на местности. Рассмотрим их основные характеристики и применение в геодезии.

Нивелир – прибор, использующийся для определения разности высот между точками [3]. Он работает на основе принципа оптического выравнивания лучей, причем лучи света проходят через зрительную трубу нивелира, далее через призму и направляются на рефлектор. Рефлектор, который устанавливается на точке, на которую производится измерение, отражает лучи нивелира обратно в зрительную трубу, где они попадают на измерительную шкалу. После этого можно рассчитать высоту точки на основе нескольких измерений.

Теодолит – это оптический геодезический прибор, который используется для измерения углов между различными точками на местности. Теодолит также основан на принципе оптического выравнивания лучей. Он состоит из горизонтальной и вертикальной осей, которые позволяют измерять углы в данных плоскостях. Прибор также имеет измерительную шкалу и окуляр для наблюдения углов. С помощью теодолита можно измерять горизонтальные и вертикальные углы между точками на местности.

Тахеометр – это геодезический прибор, который используется для измерения расстояний, углов и высот на местности. Он обычно состоит из теодолита и дальномера, что позволяет получать информацию о расстоянии до измеряемых точек. Также он может быть оснащен устройством автоматической фокусировки, что позволяет быстро измерять расстояния и углы между точками на местности. Тахеометры по принципу действия делятся на оптические, электронные (цифровые) и роботизированные (автоматические) [3].

Ограничения использования классических геодезических приборов для мониторинга деформационных процессов

Классические геодезические приборы (рис. 1), такие как нивелиры, теодолиты и тахеометры, широко применяются для мониторинга деформационных процессов на ме-

стности. Несмотря на то что они имеют ряд преимуществ, таких как точность, надежность и возможность измерения больших расстояний, есть также и некоторые ограничения во время использования.



Рис. 1. Классические геодезические приборы

Одним из главных ограничений является то, что классические геодезические приборы не обеспечивают возможность непрерывного мониторинга. Измерения должны производиться в определенный момент времени и, как правило, требуют значительной подготовки и времени на само измерение.

Другим ограничением является сложность обработки данных. Поскольку измерения производятся в различные моменты времени, необходимо выполнить ряд сложных расчетов, чтобы получить точные данные о деформационных процессах.

Кроме того, классические геодезические приборы могут быть ограничены в использовании для некоторых типов деформаций, таких как тектонические деформации, которые могут происходить на довольно больших расстояниях и требуют более точных инструментов. Наконец, классические геодезические приборы могут быть ограничены в использовании в отдаленных или труднодоступных местах, где доставка и установка оборудования может быть затруднена.

В свете этих ограничений становится понятным, почему спутниковые геодезические приборы стали так популярны для мониторинга деформационных процессов.

Спутниковые геодезические приборы

В отличие от классических геодезических приборов, спутниковые (рис. 2) позволяют быстро и точно определять координаты точек на земной поверхности. Они могут быть использованы для мониторинга как вертикальных, так и горизонтальных перемещений, и не требуют установки множества приборов.



Рис. 2. Спутниковые геодезические приборы

Основной принцип спутникового геодезического прибора заключается в определении местоположения путем определения моментов времени приема синхронизированного навигационного сигнала от группировки космических спутников и координатных поправок измерений от наземных референцстанций антенной потребителя [4].

Спутниковая геодезия представляет собой новую технологию, использующуюся для определения координат и скоростей точек на земной поверхности. Она основана на использовании систем навигации. Далее рассмотрим основные принципы работы GPS и GLONASS.

GPS (Global Positioning System) – это система спутниковой навигации, разработанная США. GPS состоит из 24 спутников, которые кружат вокруг Земли на высоте 20 192 км [5]. Каждый спутник передает сигналы на земную поверхность, которые принимаются GPS-приемником. Он измеряет время, необходимое для прохождения сигнала от спутника до приемника, и использует эту информацию для определения расстояния между ними. GPS-приемник использует информацию от нескольких спутников, чтобы определить свое местоположение.

ГЛОНАСС – российская спутниковая система навигации, предназначенная для оперативного навигационно-временного обеспечения неограниченного числа пользователей наземного, морского, воздушного и космического базирования. Это единственная система в мире, которая предоставляет доступ к гражданскому сигналу глобального позиционирования в двухчастотных диапазонах L1 и L2 потребителям по всему миру на безвозмездной основе. Основой системы являются 24 космических аппарата, которые находятся на высоте 19 100 км и движутся в трех орбитальных плоскостях по 8 аппаратов в каждой [6]. Как и в случае с GPS, каждый спутник передает сигналы на земную поверхность, которые принимаются ГЛОНАСС-приемником, далее идет обработка информации от нескольких спутников и определяется местоположение.

Несмотря на свои преимущества, они также имеют свои ограничения. Например, они могут быть подвержены воздействию электромагнитных помех, которые могут привести к ошибкам в измерениях и быть неэффективны при работе в густонаселенных городских районах или в условиях, когда спутники находятся за пределами обзора.

Преимущества спутниковых геодезических приборов в мониторинге деформационных процессов

Спутниковые геодезические приборы имеют ряд преимуществ в сравнении с классическими приборами при мониторинге деформационных процессов:

1. Высокая точность измерений

Спутниковые геодезические приборы обеспечивают высокую точность измерений благодаря использованию большого количества спутников, которые передают сигналы на землю.

2. Высокая скорость работы

Возможность быстро измерять расстояния и получать данные. Это позволяет оперативно реагировать на изменения деформаций, что особенно важно в случае мониторинга объектов, находящихся в опасных зонах.

3. Возможность измерения удаленных точек

С помощью спутниковых геодезических приборов можно измерять удаленные точки, которые недоступны для классических приборов. Это позволяет охватывать большие территории и следить за деформационными процессами на больших объектах (таких как горы и дамбы).

4. Возможность работы в плохих условиях погоды

Они работают независимо от погодных условий, таких как дождь, снег или туман. Это делает их особенно полезными при мониторинге объектов в труднодоступных и экстремальных условиях.

5. Автоматизация

Спутниковые геодезические приборы имеют возможность автоматической записи данных и их передачи в центральную систему мониторинга. Это упрощает и автоматизирует процесс сбора данных, что позволяет сократить время и снизить вероятность ошибок.

6. Измерения деформаций на больших территориях

Спутниковые системы позволяют производить измерения на территориях до нескольких тысяч километров в диаметре.

7. Возможность работы в режиме реального времени

Оборудование может использоваться для непрерывного мониторинга деформаций в режиме реального времени. Это позволяет своевременно обнаруживать и отслеживать деформационные процессы, что особенно важно в случае опасных геологических явлений, таких как землетрясения или вулканические извержения.

В целом спутниковые геодезические приборы представляют собой эффективный и мощный инструмент для мониторинга деформационных процессов, который обладает многими преимуществами перед классическими геодезическими приборами.

Сравнительный анализ классических и спутниковых геодезических приборов

1. Точность измерений

Одним из важнейших параметров геодезических приборов является точность измерений, которая имеет решающее значение для достижения целей мониторинга деформационных процессов.

Классические геодезические приборы, такие как нивелиры, теодолиты и тахеометры, имеют высокую точность измерений, которая может быть достигнута благодаря использованию высококачественных оптических систем и механизмов. Однако они имеют свои ограничения, которые могут привести к снижению точности измерений. Например, наличие атмосферных условий, таких как туман, дождь, снег или сильный ветер, может негативно сказаться на точности измерений.

Спутниковые геодезические приборы, такие как GPS и ГЛОНАСС, обеспечивают более высокую точность измерений по сравнению с классическими геодезическими приборами. Это происходит благодаря тому, что спутниковые системы позволяют получать более точные данные о координатах из-за использования сигналов, передаваемых со спутников. Однако следует отметить, что точность может зависеть от различных факторов, например, от атмосферных условий или от наличия помех в сигналах. Также необходимо учитывать, что спутниковые геодезические приборы могут требовать дополнительных расходов на обслуживание и калибровку, что может повлиять на их экономическую эффективность.

2. Влияние погодных условий и тектонической активности

Влияние погодных условий и тектонической активности на измерения является значительным фактором при использовании как классических, так и спутниковых геодезических приборов в мониторинге деформационных процессов. Классические приборы могут быть более подвержены воздействию погодных условий, таких как ветер, дождь и туман, что может привести к ухудшению точности измерений. В то же время спутниковые приборы могут быть более устойчивы и тем самым обеспечивать более стабильные измерения. Однако тектоническая активность может существенно влиять на точность измерений как классических, так и спутниковых геодезических приборов. Деформации земной коры могут вызывать изменение расстояний между станциями, что может привести к ошибкам в измерениях. В таких случаях важно проводить регулярный мониторинг и учитывать возможное влияние тектонической активности при интерпретации полученных результатов.

3. Время выполнения измерений

Более продолжительного времени для выполнения измерений требуют классические геодезические приборы по сравнению со спутниковыми. Это связано с установ-

кой оборудования на каждой точке измерения и с необходимостью выполнения ряда предварительных операций, таких как установка опорных точек, настройка приборов и т.д. Кроме того, для выполнения точных измерений с помощью классических геодезических приборов часто требуется большое количество персонала, что может увеличить время выполнения работ. Спутниковые геодезические приборы могут произвести измерения на больших площадях за более короткий промежуток времени. Они не требуют установки на каждой точке, что ускоряет процесс. Кроме того, они могут осуществлять непрерывный мониторинг, что позволяет получать данные почти в режиме реального времени. Некоторые ограничения при использовании спутниковых геодезических приборов связаны с погодными условиями и облачностью, которые могут повлиять на качество сигнала. Однако с появлением новых систем спутников, таких как ГЛОНАСС и Galileo, которые работают в дополнение к GPS, возможности спутниковых геодезических приборов становятся все более широкими.

Обобщение результатов сравнительного анализа

Из проведенного сравнительного анализа классических и спутниковых геодезических приборов для мониторинга деформационных процессов можно сделать следующие выводы:

Спутниковые геодезические приборы имеют более высокую точность измерений в сравнении с классическими геодезическими приборами.

Спутниковые геодезические приборы позволяют осуществлять наблюдение за объектами, удаленными на большом расстоянии, и мониторинг в режиме реального времени.

Влияние погодных условий и тектонической активности на точность измерений классических геодезических приборов выше, чем на точность измерений спутниковых геодезических приборов.

Применение классических геодезических приборов оправдано в случаях, когда необходимо провести точные измерения вблизи объекта мониторинга [7].

Время выполнения измерений с использованием спутниковых геодезических приборов значительно меньше, чем время выполнения измерений с использованием классических геодезических приборов [7 – 8].

Более простыми в транспортировке являются спутниковые геодезические приборы; малогабаритная аппаратура, легко устанавливаемая на контролируемом объекте [9].

Вывод

Таким образом, можно сделать вывод, что спутниковые геодезические приборы являются более эффективным и удобным инструментом для мониторинга деформационных процессов, особенно в случаях, когда необходимо осуществлять дистанционное наблюдение за объектами на больших расстояниях и в режиме реального времени. Однако использование классических геодезических приборов также может быть оправдано в некоторых случаях, когда необходимы более точные измерения вблизи объекта мониторинга.

На основании проведенного сравнительного анализа можно дать следующие рекомендации по выбору приборов для мониторинга деформационных процессов:

1. В случаях, когда требуется быстрый и точный мониторинг деформаций на небольших участках, рекомендуется использовать классические геодезические приборы.
2. На больших участках или в отдаленных районах, где доступность территории является проблемой, рекомендуется использовать спутниковые геодезические приборы.
3. При выборе спутниковых геодезических приборов необходимо учитывать возможные ограничения, связанные с погодными условиями и наличием препятствий на территории [10 – 11].

4. Для повышения точности измерений и уменьшения влияния различных факторов рекомендуется использовать комбинацию классических и спутниковых геодезических приборов [10].

5. При выборе приборов для мониторинга деформационных процессов необходимо учитывать специфику и цели конкретного исследования, а также наличие доступных ресурсов и квалифицированных специалистов для работы с выбранными приборами.

6. GNSS-системы целесообразнее применять на довольно протяженных объектах с хорошо открытым небом: дорогах, сетях коммуникаций на незастроенной или малоэтажной территории. Кроме того, точность спутниковых измерений ниже, чем у классических оптических приборов, на относительно небольших расстояниях [12].

Таким образом, рекомендуется использовать классические геодезические приборы для мониторинга деформационных процессов, требующих высокой точности измерений, при условии, что это возможно в рамках временных и финансовых ограничений. В случаях, когда требуется быстрый мониторинг на больших территориях, рекомендуется использовать спутниковые геодезические приборы. При выборе оборудования необходимо учитывать конкретные условия эксплуатации и требования к точности измерений.

Список литературы

1. Ожиганов Е. Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием горных разработок. URL: <https://pandia.ru/text/80/163/59177.php> (дата обращения: 9.11.2023)
2. Бесимбаева О.Г., 2019. Мониторинг деформаций земной поверхности на подрабатываемых территориях. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 1, № 1, С. 82 – 91.
3. Пшидаток С.К., Забара В.В., 2020. Тенденции развития современного геодезического оборудования. *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам 75-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2019 год*. Отв. за выпуск А. Г. Коцаев. Краснодар, С. 410 – 412.
4. Добрянский И.А., 2022. Маркшейдерско-геодезические приборы, используемые на открытых горных работах в настоящее время. *Сборник материалов XIII международной научно-практической конференции*. С. 139 – 145.
5. Синенко А.А., 2019. Сравнение эффективности применения навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. *Аллея науки*, Т. 1, № 11(38), С. 900 – 906.
6. Алексеев В.Е., 2012. Сравнение эффективности применения многоантенных навигационных систем GPS и совмещенной ГЛОНАСС/GPS. *Известия высших учебных заведений. Электроника*, № 2 (94), С. 71 – 76.
7. Mohammad Idris, 2019. Evaluation of GPS-RTK and Total Station for Topographic Survey and Strategic Decision in Private Companies. *KnE Engineering*, P. 323 – 332.
8. M. Nandhini Chella Kavitha, R. Viswanath, P. Kavibharathi, K. Aakash, M. Balajimanikandan, 2018. A Comparative Study of Conventional Surveying Techniques with Total Station and GPS. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, V. 9(1), P. 440 – 446.
9. Васильева И.Е., 2019. Использование спутникового метода наблюдений для целей деформационного мониторинга. *Мировая наука*, № 1(22), С. 351 – 354.
10. Hussein S.K., & Abdulla, K.Y., 2021. Surveying with GNSS and Total Station- A Comparative Study. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, V. 7(1), P. 59 – 73.
11. Зубков А.В., Сентябов С.В., Селин К.В., 2022. Относительная деформация материи на микро- и макроуровне в условиях изменяющейся космической погоды. *Литосфера*, Т. 22, № 2, С. 228 – 238.
12. Клабуков И.В., Корецкая Г.А., 2017. Проблема выбора между ГНСС и тахеометром. *Сборник материалов IX Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием "Россия молодая". Секция «Маркшейдер-*

ское дело и геодезия», С. 11005. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/sections.htm> (дата обращения 9.11.2023)

References

1. Ozhiganov E. Sdvizhenie gornyykh porod i zemnoi poverkhnosti pod vliyaniem gornyykh razrabotok [Displacement of rocks and the earth's surface under the influence of mining]. URL: <https://pandia.ru/text/80/163/59177.php> (data obrashcheniya: 9.11.2023).
2. Besimbaeva O.G., 2019. Monitoring deformatsii zemnoi poverkhnosti na podrabatyvaemykh territoriyakh [Monitoring of deformations of the earth's surface in undermined territories]. *Interespo Geo-Sibir'*, V. 1, № 1, P. 82 – 91.
3. Pshidatok S.K., Zabara V.V., 2020. Tendentsii razvitiya sovremennogo geodezicheskogo oborudovaniya [Trends in the development of modern geodetic equipment]. *Nauchnoe obespechenie agropromyshlennogo kompleksa: Sbornik statei po materialam 75-i nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov po itogam NIR za 2019 god. Otv. za vypusk A. G. Koshchayev. Krasnodar*, P. 410 – 412.
4. Dobryanskii I.A., 2022. Marksheidersko-geodezicheskie pribory, ispol'zuemye na otkrytykh gornyykh rabotakh v nastoyashchee vremya [Mine surveying and geodetic instruments currently used in open pit mining]. *Sbornik materialov XII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. P. 139 – 145.
5. Sinenko A.A., 2019. Sravnenie effektivnosti primeneniya navigatsionnykh sistem GPS i GLONASS [Comparison of the use effectiveness use of GPS and GLONASS navigation systems]. *Alleya nauki*, V. 1, № 11(38), P. 900 – 906.
6. Alekseev V.E., 2012. Sravnenie effektivnosti primeneniya mnogoantennykh navigatsionnykh sistem GPS i sovmeshchennoi GLONASS/GPS [Comparison of the use effectiveness of multi-antenna navigation systems GPS and combined GLONASS/GPS]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektronika*, № 2 (94), P. 71 – 76.
7. Mohammad Idris, 2019. Evaluation of GPS-RTK and Total Station for Topographic Survey and Strategic Decision in Private Companies. *KnE Engineering*, P. 323 – 332.
8. M. Nandhini Chella Kavitha, R. Viswanath, P. Kavibharathi, K. Aakash, M. Balajimanikandan, 2018. A Comparative Study of Conventional Surveying Techniques with Total Station and GPS. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, V. 9(1), P. 440 – 446.
9. Vasil'eva I.E., 2019. Ispol'zovanie sputnikovogo metoda nablyudenii dlya tselei deformatsionnogo monitoring [Use of the satellite observation method for the purposes of deformation monitoring]. *Mirovaya nauka*, № 1(22), P. 351 – 354.
10. Hussein S.K., & Abdulla, K.Y., 2021. Surveying with GNSS and Total Station- A Comparative Study. *Eurasian Journal of Science & Engineering*, V. 7(1), P. 59 – 73.
11. Zubkov A.V., Sentyabov S.V., Selin K.V., 2022. Otnositel'naya deformatsiya materii na mikro- i makrourovne v usloviyakh izmenyayushcheisya kosmicheskoi pogody [Relative deformation of matter at the micro and macro level under conditions of changing space weather]. *Litosfera*, V. 22, № 2, S. 228 – 238.
12. Klabukov I.V., Koretskaya G.A., 2017. Problema vybora mezhdru GNSS i takheometrom [On the problem of choosing between GNSS and tacheometer]. *Sbornik materialov IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem "Rossiya molodaya". Sektsiya "Marksheiderskoe delo i geodeziya'*, P. 11005. URL: <https://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/RM/2017/RM17/pages/sections.htm> (data obrashcheniya 9.11.2023).

УДК 622.882

Антонинова Наталья Юрьевна
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией экологии
горного производства,
Институт горного дела Уро РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58;
доцент, ФГБОУ «УГГУ»,
г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30
e-mail: natal78@list.ru

Шубина Любовь Андреевна
научный сотрудник,
лаборатория экологии горного производства,
Институт горного дела Уро РАН,
e-mail: las714@mail.ru

Кузнецова Ярослава Артемовна
младший научный сотрудник,
лаборатория экологии горного производства,
Институт горного дела Уро РАН
e-mail: yaroslava.brusnitsyna@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ РЕКУЛЬТИВАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИРОДНО-ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА*

Аннотация:

Открытые горные работы кардинальным образом изменяют ландшафт территории, нарушают поверхностный и подземный гидрологический режим, выносят на поверхность материнские породы. Плодородный почвенный слой при снятии, транспортировании и организации его запасов смешивается с фрагментированными материнскими породами, его пригодность со временем снижается. Цель статьи – оптимизация технических решений при проведении рекультивации.

В статье представлены методы экспресс-исследования молодой геоекосистемы, сформированной на техногенной территории угольного месторождения в СибФО, скорости ее воспроизводства, на основе чего можно сделать выводы о способности к природной мелиорации. Результаты позволили зафиксировать наличие интенсивных сукцессионных процессов на территории горного отвода без проведения специализированных мероприятий по землеванию и дальнейшей реабилитации.

На основе анализа сукцессий техногенно нарушенных территорий предложен подход к максимальному использованию собственного потенциала экологической системы к самовосстановлению. Время начала и течения восстановительных процессов природно-техногенного комплекса сокращается при использовании приемов инициации и стимуляции вторичных сукцессий.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.065

Antoninova Natalia Yu.
Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of industrial mining ecology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58
Mamina-Sibiryaka Str.,
e-mail: natal78@list.ru

Shubina Lyubov A.
Researcher,
Laboratory of industrial mining ecology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
e-mail: las714@mail.ru

Kuznetsova Yaroslava A.
Junior Researcher,
Laboratory of industrial mining ecology,
of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: yaroslavl.brusnitsyna@mail.ru

JUSTIFICATION OF THE DIRECTIONS OF RECLAMATION USING THE ECOLOGICAL POTENTIAL OF THE NATURAL-TERRITORIAL COMPLEX

Abstract:

Open-pit mining radically changes the landscape of the territory, violates the surface and underground hydrological regime, brings parent rocks to the surface. The fertile soil layer is mixed with fragmented parent rocks during removal, transportation and organization of its reserves, its suitability decreases over time. The paper concerns the issue of optimization of technical solutions during reclamation.

The article presents the methods of express research of a young geoecosystem formed on the technogenic territory of a coal deposit in SibFO and the rate of its reproduction, on the basis of which it is possible to draw conclusions about its potential for natural reclamation. The results made it possible to record the presence of intensive succession processes in the territory of the mining allotment without carrying out specialized measures for land use and further rehabilitation.

Based on the analysis of the successions of technogenically disturbed territories, an approach to the maximum use of the ecological system's own potential for self-healing is proposed. The time of the beginning and course of the restoration processes of the natural and man-made complex is reduced when using the techniques of initiation and stimulation of secondary successions.

The use of the environment-forming potential of plant groupings ("growth points") allows to significantly reduce the intensity of the processes of erosion of tech-

* Статья подготовлена в рамках госзадания № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024) «Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процессов в недропользовании» (FUWE-2022-0002), пер. № 1021062010532-7-1.5.1.

Использование средообразующего потенциала растительных группировок («точек роста») позволяет значительно снизить интенсивность процессов эрозии техногенных субстратов, иницировать в них почвообразовательные процессы, запустить и ускорить сукцессию нарушенных ценозов с минимальными экономическими затратами.

Ключевые слова: природно-техногенный комплекс, нарушенные земли, техногенный субстрат, рекультивация, сукцессия, потенциал экосистемы, природная мелиорация.

nogenic substrates, initiate soil-forming processes in them, launch and accelerate the succession of disturbed cenoses with minimal economic costs.

Key words: natural-technogenic complex, disturbed lands, technogenic substrate, reclamation, succession, ecosystem potential, natural reclamation.

Введение

Исследование сукцессионных процессов на нарушенных территориях стимулировало развитие теории функционирования экосистем [1, 2], взаимного влияния динамики состава растительности в зависимости от окружающих ценозов [3, 5] и дало толчок развитию промышленной ботаники [6] в ее прикладных контекстах (рекультивация, ремедиация) на территории России. Научные школы Урала ведут многолетние наблюдения за процессами естественных сукцессий [7 – 9].

Процессы самовосстановления техногенно-нарушенных территорий, согласно известной геоботанической теории [4], прямо коррелируются со следующими природными факторами: наличием доступных (близкорасположенных) ресурсов для восстановления биоты, наличием/отсутствием и стабильностью техногенной нагрузки на экосистему. При этом одним из решающих факторов при оценке потенциала запуска самостоятельных сукцессионных процессов остается оценка физических свойств грунтов, их химический состав и климатические характеристики территории.

Оценка территории и характеристика объекта

Для оценки потенциала восстановления нарушенных территорий их почвенный покров следует разделить на три категории по степени нарушения, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Категории для оценки потенциала восстановления

Категория	Объем нарушения, %	Характеристика / расположение	Поступление загрязнителей / среда-проводник
Незначительная	менее 30	Органогенные горизонты смяты, уплотнены, частично перемешаны с глеевыми / периферические территории под воздействием транспортных потоков	Постепенное, нерегулярное/воздушная
Средняя	30 – 60	Органогенные горизонты уничтожены или глубоко перемешаны с глеевыми / спланированные поверхности при строительных работах, транспортная инфраструктура	Залповое, периодическое/воздушная, водная
Значительная	60 – 100	На поверхности находятся почвообразующие породы, загрязненные (замененные) техногенными материалами / отвалы, карьерные выемки, промплощадки	Постоянное/воздушная, водная

Первоначальная историческая информация об исследуемом объекте была получена из материалов горнодобывающей компании. Лаборатория экологии горного производства ИГД УрО РАН провела экологическое обследование территории угольного разреза, добыча на котором была исторически остановлена по техническим причинам на 8-летний период.

В результате угледобычи сформирован ландшафт антропогенного типа с образованием аккумулятивных форм рельефа. После расчистки территории площадок вертикальной и горизонтальной планировки произошло изменение структуры, морфологических признаков и функционирования почв и грунтов. Сильноизмененный ландшафт располагается под карьерной выработкой, под отвальным хозяйством, линейными объектами и другими объектами промышленного комплекса предприятия. К внешним границам горного отвода и разновременных отвалов примыкают в основном сельскохозяйственные земли, значительные лесные массивы отсутствуют.

Материал суглинков, распространенных на территории разработки участков горных работ в основном относится к средним и тяжелым суглинкам. Такой гранулометрический состав является наиболее благоприятным для развития почвообразования в лесостепной зоне.

Как известно, тепловой режим почв определяется в первую очередь такими общеклиматическими факторами, как атмосферная циркуляция, радиационный режим, глубина залегания грунтовых вод; кроме этого, значительную роль играют форма рельефа, высота над уровнем моря. В летний период на температуру верхних слоев почвы большое влияние оказывает механический состав, микрорельеф и степень увлажненности почвы; в зимнее время – толщина снежного покрова, тип почвогрунтов и состояние поверхности почвы. В результате сложного сочетания всех факторов, обуславливающих тепловой режим почв, распределение температуры почвы даже на пограничных территориях может отличаться.

Среднегодовая температура воздуха района положительная и составляет 0,8 °С. Характерная особенность термического режима – большие годовые амплитуды, достигающие 80 – 85 °С. Самый холодный месяц – январь, средняя минимальная температура – минус 23,4 °С; самый теплый месяц – июль, средняя максимальная температура которого равна 26 °С. Продолжительность периода со средней суточной температурой воздуха < 0 °С составляет 160 суток. Влажность воздуха имеет ярко выраженный годовой и суточный ход. Средняя месячная относительная влажность воздуха января составляет 80 %, июля – 72 %; средняя годовая относительная влажность воздуха – 74 %. Среднее годовое количество осадков равно 448 мм, из них 128 мм выпадает за ноябрь – март и 320 мм – за апрель – октябрь. За последние пять лет среднегодовое количество атмосферных осадков изменялось в пределах от 430 до 495 мм. Глубокое залегание грунтовых вод исключает их влияние на процессы почвообразования.

Таким образом, климатические условия района с умеренно влажным и теплым летним периодом являются благоприятными для укрепления первичной растительности на техногенных субстратах.

Методы исследования территории

Физико-химические свойства вскрышных пород зависят от геологических свойств района, отвалы, сформированные при разработке антрацита представляют собой смесь пород палеогенового, неогенового и четвертичного возрастов и весьма неоднородны по гранулометрическому составу и химическим свойствам. Отвалы, сложенные насыпными грунтами, платообразные, террасированные высокие, с откосом яруса – 35°, откосом борта – 20 – 25°. Значительных деформационных процессов в ходе обследования не обнаружено, на основании чего можно сделать вывод о стабилизации поверхности. Ориентировочное время самоуплотнения грунтов составляет 1 – 3 года, принимая во внимание, что отвальные работы практически завершены за 15 лет до начала обследова-

дования, можно считать насыпные грунты самоуплотнившимися и стабилизированными.

Элювиальные грунты слагают древнюю кору выветривания известняков, аргиллитов, алевролитов и песчаников, представляющую собой зону бесструктурного элювия площадной хомогенной коры выветривания. Насыпные крупнообломочные грунты представлены щебенистыми и глыбовыми грунтами средней степени водонасыщения.

Техногенные ландшафты в пределах участка месторождения сформированы на отвалах вскрышных пород и бортах карьерной выемки. Естественный почвенный покров на этих территориях уничтожен, на поверхности почвообразование фактически началось с нуля. При разработке карьера вскрышные и вмещающие породы (смесь песчаников, алевролитов, аргеллитов) были экспонированы на поверхность, где они подвергаются трансформации вследствие воздействия гидротермического и ботанического факторов (табл. 2 – 4).

Таблица 2

Агрофизическая характеристика отвальных грунтов

Глубина, см	Плотность, г/см ³	Плотность сложения, г/см ³	Порозность, %	Содержание частиц < 0,01 мм, %	Содержание частиц < 1 мм, %
0 – 10	2,59	1,34	48,3	14,2	10,5
20 – 30	2,68	1,47	45,1	8,8	9,4
30 – 40	2,61	1,80	31,0	11,3	8,9

Таблица 3

Агрохимическая характеристика серой лесной почвы фоновых участков

Горизонт	рН	Гумус %	Н _{гид}	S=Ca ²⁺ +Mg ²⁺	Е _п	Азот общий	P ₂ O ₅₅	K ₂ O
А	6,8	8,8	1,13	49,5	50,6	0,6	96	100
А1 А2	6,7	4,5	0,75	45,5	46,3	0,25	86	105
В	6,4	1,7	0,70	34,5	35,2	ОД 1	96	90

Таблица 4

Содержание органического вещества (гумус), фосфора и калия в почвах месторождения

Номер пробы, место отбора	Органич. вещество (гумус), %	рН солевой, ед. рН	Обменный калий (K ₂ O)	Подвижный фосфор (P ₂ O ₂), мг/кг
1. Луговая почва	3,4	7,6	134	70
2. Лесная почва (березовый колок)	3,8	7,6	144	70

При анализе почвогрунтов на участке месторождения, выполненном в ИПА СО РАН, использовалась известная систематика техногенных поверхностных образований [Шугалей Л.С].

Ландшафт прилегающей местности представляет собой типичную лесостепь. Растительность представлена обильными березовыми колками, кустарниковыми зарослями, частично хвойными перелесками.

Почвы фоновых ценозов представлены черноземами выщелоченными, темно-серыми лесными (колковый березняк злаково-травяной) и черноземно-луговыми (луг разнотравно-злаковый). По показателям гумусного состояния, содержание гумуса в слое фоновых почв характеризуется как среднее (до 3,8 %).

Для организации вторичных фитоценозов определяющую роль играют агрохимические свойства грунтов, в том числе текстуры субстрата, климатические характеристики (скорость и период увлажнения, прогреваемость), развитие экзогенных процессов.

Для изучения динамики сукцессий (лесных и луговых ценозов) на отвалах и бортах карьера, выработки рекомендаций по направлению и технологии рекультивации проведено маршрутное обследование, аэрофотосъемка и анализ данных дистанционного зондирования (космоснимков) (рис. 1, 2).



а)



б)

Рис. 1. Древесная растительность северо-восточного (а) и восточного (б) бортов карьерной выемки, 2016 г.



Рис. 2. Юго-восточный склон и плато отвала «Нагорный», 2016 г.

Непосредственно на территории участка месторождения произрастают полыни, мать-и-мачеха, одуванчик, клевера, мятлик, подмаренники, горец птичий, ежа сборная и другие виды. Частично – молодые деревья (береза, сосна) и кустарники (ивы, шипов-

ник и ракитник), являющиеся родоначальниками организации лесного сообщества на исследованной территории.

Наибольшим видовым разнообразием отличаются травы, участвующие в образовании луговых сообществ, в основном многолетние травянистые растения, характерные для умеренных флор северного полушария. Богаче других в видовом отношении представлены семейства сложноцветные – *Asteraceae*, злаки – *Poaceae*, крестоцветные – *Brassicaceae*, гвоздичные – *Caryophyllaceae*, зонтичные – *Apiaceae* и розоцветные – *Rosaceae*.

На исследуемых плато отвала преобладают сорные виды растений, значительные сомкнутые сообщества образуют полынь обыкновенная и серебристая (*Artemisia*), тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium*), желтушник ястребинколистый (*Erysimum L.*), бедренец камнеломковый (*Pimpinella saxifraga L.*), мятлик (*Poa pratensis*) и др. В то же время на участках, длительное время не подвергавшихся техногенной нагрузке, происходит вытеснение сорных форм луговыми (до 15 %) и лесными (до 10 %) видами.

Восстановление растительного и почвенного покровов, а также естественное лесовосстановление на грубо выровненных поверхностях происходят быстрее, поскольку образующееся органическое вещество не смывается с поверхности. На выровненной поверхности литострата отвала с естественно сформировавшимися древесно-кустарниковыми формами зафиксировано присутствие слаборазложившейся подстилки из листового опада.

Лесовосстановление (укоренение и прораствание семян) на карьерных уступах и на склонах старогодних отвалов, имеющих более неровную поверхность, происходит значительно быстрее, чем на плато. Так, высота выросших на нижних ярусах и откосах отвалов за период 2004 – 2014 гг. берез и осин достигает до 25 м при расстоянии между деревьями до 3,0 м. На Среднем Урале соответствующий пример можно наблюдать на отвалах Асбестовского рудника (г. Асбест), на склонах которых естественным путем, особенно в его верхней части, сформировалось смешанное хвойно-лиственное насаждение, явно предохраняющее отвал от эрозии [11]. Следует отметить, что на рассматриваемой территории, в отличие от Среднего Урала, богатого лесными массивами, незначительные естественные лесные ценозы находятся северо-восточнее территории горного отвала, их площади крайне малы по сравнению с землями, занятыми под сельское хозяйство.

При помощи дистанционного зондирования по визуальной градации [13] была установлена динамика площади общего проективного покрытия территории Горловского участка (табл. 5).

Таблица 5

Площади проективного покрытия участков Горловский, Ургунский

Дата	Общее проективное покрытие, %			
	Карьерная выемка (Горловский)	отвал Нагорный	отвал Западный	отвал Восточный
2015	18,1	18,1	26,0	-
2016	24,9	55,7	28,2	-
2017	36,5	75,3	48,7	23,9

На момент 2017 г. около 75 % площади отвала Нагорный было покрыто растительностью, из них около 80 % занято древесными и кустарниковыми формами растений. Отвал Западный на 48 % покрыт растительностью, из которой 77 % составляют

древесно-кустарниковые формы растительности, являющиеся источником семенного материала.

При исследовании Ургунского участка месторождения зафиксированы значительные площади ненарушенных земель с сохранившейся луговой и лесной растительностью, испытывающей угнетающую полевую нагрузку от выемочных, погрузочно-разгрузочных и буровых работ на карьерном поле и при формировании отвала. Доля луговых почв составляет около 40 га (29 % общей площади горного отвала), серых лесных – 3,4 га (2,4 %), лугово-болотных – 4,2 га (3 %). В настоящее время ненарушенные фитоценозы на этих почвах являются источником семенного материала для развития растительности на техногенных субстратах, благодаря чему площадь проективного покрытия действующего отвала уже составляет почти 24 % (табл. 6).

Внешний отвал Ургунского участка находится в зоне продолжающихся горных работ, на периферийной части отвала расположен склад плодородных пород, организованный при вскрытии карьерного поля.

Таблица 6

Агрофизические свойства ППП Ургунского участка

№ образца	Плотность, г/см ³	Плотность сложения, г/см ³	Пористость, %	Содержание частиц > 0,01 мм, %	Содержание частиц > 1 мм, %
В естественном сложении	2,69	1,50	44,2	47,2	100,0
Низ уступа 8 – 10 м	2,72	1,83	32,7	44,3	99,2
В отвале после планировки	2,62	1,91	27,1	18,5	20,3

Агрохимические показатели субстрата отвала в зависимости от глубин (от 5 до 40 см): рН_{водн.} – от 7,6 до 7,8 ед.; углерод – от 3 до 7 %; валовое содержание азота – от 0,01 до 0,1 %; фосфора – от 0,01 до 0,1 %; калия – от 2 до 2,6 %. Самостоятельно на грунтах с такими показателями, как правило, способно развиваться довольно ограниченное количество растительных видов, достижение полного задернения поверхности без дополнительных агромероприятий растягивается на несколько десятилетий. Для проведения рекультивации законодательством предусмотрено обязательное снятие и складирование плодородного и потенциально плодородного субстрата до начала горных работ, что и было осуществлено на участке разработки. Объем складированного плодородного грунта на момент исследования составлял 449 000 м³, период его хранения – около 10 лет.

Вопросы изменения качества (деградация) свойств плодородных грунтов при организации склада и хранении более 10 лет достаточно изучены [12], поэтому целесообразность их использования на конец отработки месторождения (более чем 30-летний период) вызывает сомнения. При этом сомкнутый, разнообразный травяной покров этого участка к моменту исследования уже являлся интенсификатором первичной сукцессии нижних ярусов отвала вскрышных пород, что подтверждается высоким процентом зафиксированного проективного покрытия на бедных с точки зрения агрохимического состава грунтах.

Для расчета интегрального показателя пригодности территории Ургунского участка для рекультивации путем самовосстановления (Σi) использовались показатели плотности техногенного элювия и его влажность и результаты проведенного экологического обследования. Согласно [14] общий коэффициент для нижних ярусов отвала Восточный и верхних бортов карьера составляет от 26 до 33, для откосов отвалов (исключая подножие) – 16. Это, соответственно, III и IV классы восстановленности экосистемы, где III класс означает «Экосистема самовосстанавливающаяся, требуется час-

тичная рекультивация на отдельных участках». Поскольку период разработки Ургунского участка составит более 20 лет, сукцессионные процессы за этот период достигнут максимальной стадии, на нарушенных площадях будет достигнуто некоторое разнообразие ландшафтно-фациальных зон и биоценозов.

Заключение

1. Спустя 7 – 10 лет после формирования при отсутствии восстановительных мероприятий отвалы подверглись природной мелиорации на площади от 48 до 77 %, причем максимально сомкнутое, отличающееся большим биологическим разнообразием покрытие присутствовало на отвале, формирование которого не завершено, но на периферии которого расположены склады плодородного слоя.

2. Образовавшаяся за счет преемственности ландшафтов в период 2008 - 2016 гг. на бортах и уступах карьерной выемки лесная растительность активно способствует (за счет комбинации видов с вертикальной и горизонтальной корневыми системами) закреплению субстратов и резкому замедлению экзогенных процессов.

3. Объекты складирования плодородного слоя, расположенные в непосредственной близости к отвалам вскрышной породы (примыкающие к ним), являются «точкой роста» (интенсификатором) старта и более быстрого развития вторичной сукцессии на территории, подвергшейся значительным техногенным нарушениям.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о возможности комплексного использования естественных способностей экосистемы к самовосстановлению непосредственно в процессе производства горно-добычных работ при

– грамотной организации первичных растительных группировок – «точек роста» (самовосстановления), склады снятого плодородного слоя которых расположены по периметру / в центре нарушенных участков с непосредственным прилеганием к отвалам вскрышных и обедненных пород, изъятых при разработке сырья;

– проведении первых этапов горно-технической рекультивации одновременно с формированием отвалов вскрышных пород для создания благоприятного рельефа техногенного субстрата, который в комплексе с естественным развитием средообразующих участков снижает вероятность эрозии поверхностей и инициирует почвообразовательные процессы;

– предварительном исследовании состава фоновых растительных сообществ, в том числе для определения видов, участвующих в сукцессии техногенных поверхностей, в целях оптимального подбора материала при необходимости биологической рекультивации (видов для повторной вегетации).

Список литературы

1. Drury W.H., Nisbet I., 1973. Succession. *Journal of the Arnold arboretum*, Т. 54, № 3, С. 331 – 368.

2. Borcard D., Legendre P., 1994. Environmental control and spatial structure in ecological communities: an example using oribatid mites (Acari, Oribatei). *Environmental and Ecological Statistics*, Т. 1, №. 1, С. 37 – 61.

3. Wiegand G., Felinks B., 2001. Primary succession in post-mining landscapes of Lower Lusatia—chance or necessity. *Ecological Engineering*, Т. 17, № 2 – 3, С. 199 – 217.

4. Walker L. R. et al., 2003. Primary succession and ecosystem rehabilitation. Cambridge University Press. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Physiological-Ecology-of-Plant-Succession-Bazzaz/b87953cb631467c8e1a7400a5d6abb803ae0f9b0> (дата обращения: 17.11.2023)

5. Bazzaz F.A., 1979. The physiological ecology of plant succession. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol.10, 351 –371.

6. Махонина Г.И., Чибрик Т.С., 1975. Естественное восстановление и вопросы рекультивации отвалов месторождений огнеупорных глин Южного Урала. *Рекультивация*

ция земель, нарушенных при добыче полезных ископаемых: тез. докл. координац совещ. Тарту: ВАСХНИЛ, Зап. отд-ние, С. 158 – 163.

7. Чибрик Т.С., Елькин Ю.А., 1991. *Формирование фитоценозов на нарушенных промышленностью землях: (биологическая рекультивация)*. Свердловск: Издательство Уральского университета, 220 с.

8. Тарчевский В.В., Чибрик Т.С., 1970. Естественная растительность отвалов при открытой добыче каменного угля в Кузбассе. *Растения и промышленная среда*. Вып. 2. Свердловск: УрГУ, С. 65 – 77.

9. Моторина Л.В., 1973. Основные направления научных исследований по рекультивации земель в Подмосковном бурoughольном бассейне. *Научные основы охраны природы*. Москва: Наука, С. 86 – 103.

10. Шугалей Л.С. Яшихин Г.И., Дмитриенко В.К., 1996. *Биологическая рекультивация нарушенных земель КАТЭКа*. Красноярск: Изд-во Красноярского университета, 186 с.

11. Хохряков А. В. и др., 2013. Применение интегрального показателя при оценке экологической безопасности породного отвала, подвергнувшегося процессам самозарастания. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 8, С. 88 – 92.

12. Андроханов В.А., Овсянникова С.В., Курачев В.М., 2000. *Техноземы: свойства, режимы, функционирование*. Новосибирск: Наука, 198 с.

13. Воронов А.Г., 1973. *Геоботаника*. Москва: Высшая школа, 384 с.

14. Манаков Ю.А., Куприянов А.Н., Стрельникова Т.О., Куприянов О.А., Казьмина С.С., 2017. *Методические рекомендации по использованию интегрального показателя пригодности нарушенных земель для рекультивации отвалов угольной промышленности Кузбасса*. Федерал. исследовательский центр угля и углехимии СО РАН [под общ. ред. Ю.А. Манакова]. Кемерово: КРЭОО «Ирбис», 24 с.

References

1. Drury W.H., Nisbet I., 1973. Succession. *Journal of the Arnold arboretum*, T. 54, № 3, С. 331 – 368.

2. Borcard D., Legendre P., 1994. Environmental control and spatial structure in ecological communities: an example using oribatid mites (Acari, Oribatei). *Environmental and Ecological Statistics*, T. 1, № 1, С. 37 – 61.

3. Wiegleb G., Felinks B., 2001. Primary succession in post-mining landscapes of Lower Lusatia—chance or necessity. *Ecological Engineering*, T. 17, № 2 – 3, С. 199 – 217.

4. Walker L. R. et al., 2003. Primary succession and ecosystem rehabilitation. Cambridge University Press. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Physiological-Ecology-of-Plant-Succession-Bazzaz/b87953cb631467c8e1a7400a5d6abb803ae0f9b0> (дата обращения: 17.11.2023)

5. Bazzaz F.A., 1979. The physiological ecology of plant succession. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol.10, 351 –371.

6. Makhonina G.I., Chibrik T.S., 1975. Estestvennoe vosstanovlenie i voprosy rekul'tivatsii otvalov mestorozhdenii ogneupornykh glin Yuzhnogo Urala [Natural restoration and issues of recultivation of dumps of deposits of refractory clays of the Southern Urals]. *Rekul'tivatsiya zemel', narushennykh pri dobyche poleznykh iskopaemykh: tez. dokl. koordinats soveshch. Tartu: VASKhNIL, Zap. otd-nie, P. 158 – 163.*

7. Chibrik T.S., El'kin Yu.A., 1991. Formirovanie fitotsenozov na narushennykh promyshlennost'yu zemlyakh: (biologicheskaya rekul'tivatsiya) [Formation of phytocenoses on lands disturbed by industry: (biological recultivation)]. *Sverdlovsk: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta*, 220 p.

8. Tarchevskii V.V., Chibrik T.S., 1970. Estestvennaya rastitel'nost' otvalov pri otkrytoi dobyche kamennogo uglya v Kuzbasse [Natural vegetation of dumps during open-pit

coal mining in Kuzbass]. *Rasteniya i promyshlennaya sreda*. Vyp. 2. Sverdlovsk: UrGU, P. 65 – 77.

9. Motorina L.V., 1973. *Osnovnye napravleniya nauchnykh issledovaniy po rekul'tivatsii zemel' v Podmoskovnom burougol'nom basseine* [The main directions of scientific research on land reclamation in the brown coal basin near Moscow]. *Nauchnye osnovy okhrany prirody*. Moscow: Nauka, P. 86 – 103.

10. Shugalei L.S. Yashikhin G.I., Dmitrienko V.K., 1996. *Biologicheskaya rekul'tivatsiya narushennykh zemel' KATEKa* [Biological recultivation of disturbed KATEK lands]. Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyarskogo universiteta, 186 p.

11. Khokhryakov A. V. i dr., 2013. *Primenenie integral'nogo pokazatelya pri otsenke ekologicheskoi bezopasnosti porodnogo otvala, podvergshegosya protsessam samozarastaniya* [The use of an integral indicator in assessing the environmental safety of a rock dump subjected to self-healing processes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 8, S. 88 – 92.

12. Androkhanov V.A., Ovsiannikova S.V., Kurachev V.M., 2000. *Tekhnozemy: svoistva, rezhimy, funktsirovanie* [Technogrounds: properties, modes, functioning]. Novosibirsk: Nauka, 198 p.

13. Voronov A.G., 1973. *Geobotanika* [Geobotanics]. Moscow: Vysshaya shkola, 384 p.

14. Manakov Yu.A., Kupriyanov A.N., Strel'nikova T.O., Kupriyanov O.A., Kaz'mina S.S., 2017. *Metodicheskie rekomendatsii po ispol'zovaniyu integral'nogo pokazatelya prigodnosti narushennykh zemel' dlya rekul'tivatsii otvalov ugol'noi promyshlennosti Kuzbassa* [Methodological recommendations for the use of an integral indicator of the suitability of disturbed lands for the reclamation of dumps of the Kuzbass coal industry]. *Federal. issledovatel'skii tsentr uglya i uglekhemii SO RAN* [pod obshch. red. Yu.A. Manakova]. Kemerovo: KREOO "Irbis", 24 p.



**ГЕОТЕХНИКА ДЛЯ ОТКРЫТОЙ, ПОДЗЕМНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ
ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

УДК 622.271:621.879

Журавлев Артем Геннадиевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
транспортных систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, д. 58,
e-mail: juravlev@igduran.ru

Глебов Игорь Андреевич

научный сотрудник,
лаборатория транспортных
систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: i.glebov@igduran.ru

Черепанов Владимир Александрович

научный сотрудник,
лаборатория транспортных
систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: transport@igduran.ru

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ГОТОВНОСТИ МОЩНЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭКСКАВАТОРОВ*

Аннотация:

В условиях роста интенсивности разработки месторождений полезных ископаемых и увеличения глубины карьеров вопрос высокопроизводительной и экономичной работы выемочно-погрузочного и транспортного оборудования приобретает важное значение. В статье приведены показатели реальной фактической производительности экскаваторов, эксплуатируемых в России в сопоставлении с возможной технической производительностью. Отражен опыт применения современных отечественных экскаваторов, в том числе с ковшом 35 м³. Отмечены перспективные направления развития отечественного экскаваторостроения для горнодобывающих предприятий.

Ключевые слова: экскаваторно-автомобильный комплекс, экскаватор, автосамосвал, производительность экскаваторов, коэффициент технической готовности.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.076

Zhuravlev Artem G.,

Candidate of Technical Sciences,
Head of Laboratory of transport systems
and geomechanics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: juravlev@igduran.ru

Glebov Igor A.

Scientific Researcher,
Laboratory of transport systems
and geomechanics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: i.glebov@igduran.ru

Cherepanov Vladimir A.

Scientific Researcher,
Laboratory of transport systems
and geomechanics,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: transport@igduran.ru

ON THE ISSUE OF DEVELOPMENT OF PRODUCTIVITY AND TECHNICAL READINESS OF POWERFUL DOMESTIC EXCAVATORS

Abstract:

In conditions of growing intensity of development of mineral deposits and increasing the depth of quarries, the issue of highly productive and economical operation of excavation, loading and transport equipment is becoming especially important. The article presents indicators of the actual productivity of excavators operated in Russia in comparison with the possible technical productivity. The experience of using modern domestic excavators, including those with a 35 m³ bucket, is shown. Promising directions for the development of domestic excavator construction for mining enterprises are noted.

Key words: excavator-automobile complex, excavator, dump truck, excavator capacity, technical readiness coefficient.

Введение

В условиях роста интенсивности разработки месторождений полезных ископаемых и увеличения глубины карьеров вопрос высокопроизводительной и экономичной работы выемочно-погрузочного и транспортного оборудования, формирующего до 60 % себестоимости добычи, приобретает первостепенное значение. Поэтому многие горнодобывающие предприятия все больше используют карьерные экскаваторы с вместимостью ковша более 15 м³ и автосамосвалы грузоподъемностью свыше 130 т.

* Статья подготовлена в рамках выполнения Госзадания №075-00412-22 ПР. Тема 1 (2022-2024). Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (код темы FUWE-2022-0005, пер. ПТНИ №1021062010531-8-1.5.1, пер. №123012300005-3)

В период 70 – 80-х гг. наблюдался стремительный рост производительности экскаваторов горнодобывающих предприятий страны, который сопровождался увеличением единичной мощности (вместимости ковша) машин (рис. 1). В период с 1990 по 2000 г. наблюдалось снижение производительности и количества экскаваторов по целому ряду причин, обусловленных кризисом 1990-х гг. Однако затем эти показатели начинают расти, в том числе за счет развития закупки импортного горнодобывающего оборудования. В горно-технологическом плане это объясняется развитием технологий и постоянным усовершенствованием оборудования, которое становится более мощным и эффективным. Увеличение вместимости ковша экскаватора позволяет быстрее выполнять погрузочные и транспортные работы, что в свою очередь снижает трудозатраты и повышает общую эффективность работы горнодобывающего предприятия.

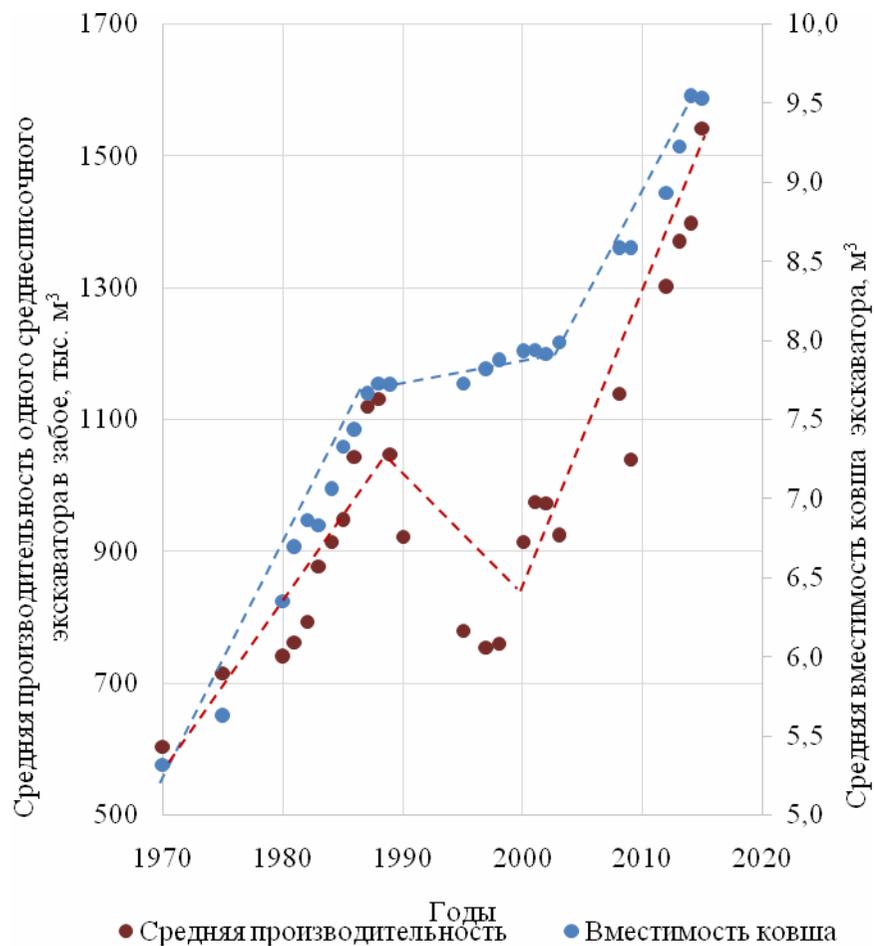
С 1990-х гг. до настоящего времени по различным причинам объемы и расстояние перевозок горной массы автомобильным транспортом на большинстве крупных карьеров непрерывно увеличиваются в процентном отношении в сравнении с другими видами транспорта [1], соответственно, меняется соотношение между средней грузоподъемностью карьерного автосамосвала и вместимостью ковша экскаватора [2, 3]. С 1970 по 2015 г. вместимость ковша среднесписочного экскаватора на крупнейших ГОКах России увеличилась с 5,3 до 9,5 м³, т.е. на 44,2 %, но в последнее время увеличение объема среднесписочного ковша наблюдается более сдержанно. Грузоподъемность среднесписочного автосамосвала возросла с 87,6 до 136,8 т, т.е. почти на 56,2 % [1 – 3]. Вышеуказанная тенденция по росту единичной мощности экскаваторов подтверждается фактическими данными (см. рис. 1).

Основные высокопроизводительные экскаваторы с ковшом 15 м³ и более, эксплуатируемые на карьерах в России на сегодняшний день, приведены в табл. 1. Соотношение экскаваторов различных типов в общем парке выемочного оборудования на горнодобывающих предприятиях находится в достаточно широком диапазоне [3 – 8]. На предприятиях эксплуатируют как гидравлические, так и электромеханические экскаваторы, каждый из этих типов машин имеет свою область применения, в которой реализует наибольшую производительность и эффективность [9 – 15].

Многолетняя практика работы гидравлических экскаваторов на рудных карьерах со скальными породами (Мурунтау, Карельский окатыш, предприятия КМА) и угольных разрезах показала, что суммарные затраты на владение гидравлическими экскаваторами (затраты на приобретение, эксплуатацию, технический сервис, а также капитальные затраты на создание инфраструктуры для их технического сервиса с целью достижения сравнимых с канатными экскаваторами показателей надежности [16]) в 1,5 – 2,5 раза больше [17], чем с электромеханическими. Тем не менее гидравлические экскаваторы рациональнее применять при селективной выемке или на участках с крутопадающими залежами, в местах, где имеются проблемы с подводом электричества, а также в обводненных условиях. В работе [18] показано, что современные гидравлические экскаваторы за счет возможности позиционирования ковша на рукояти имеют значения фактических усилий копания по ряду направлений в 2 – 2,5 раза больше по сравнению с механическими лопатами, что предопределяет их преимущество при разработке крепких пород либо при безвзрывной выемке. Возможность надежной эксплуатации гидравлических машин прослеживается на примерах железорудного карьера в АО «Карельский окатыш» (коэффициент готовности экскаватора РС-5500Е достигал 0,84 - 0,98), Черниговского разреза в Кузбассе, разреза «Восточно-Бейский» (в январе 2015 г. на экскаваторах РС-3000Е достигнута производительность 752 и 844 тыс. м³, что является мировым рекордом в этом классе машин) [19].

При этом свои области применения имеются и для различных по емкости ковшей экскаваторов (как гидравлических, так и электромеханических), а сверхмощное оборудование нерационально применять повсеместно.

а) Карьерные экскаваторы



б) Карьерные автосамосвалы

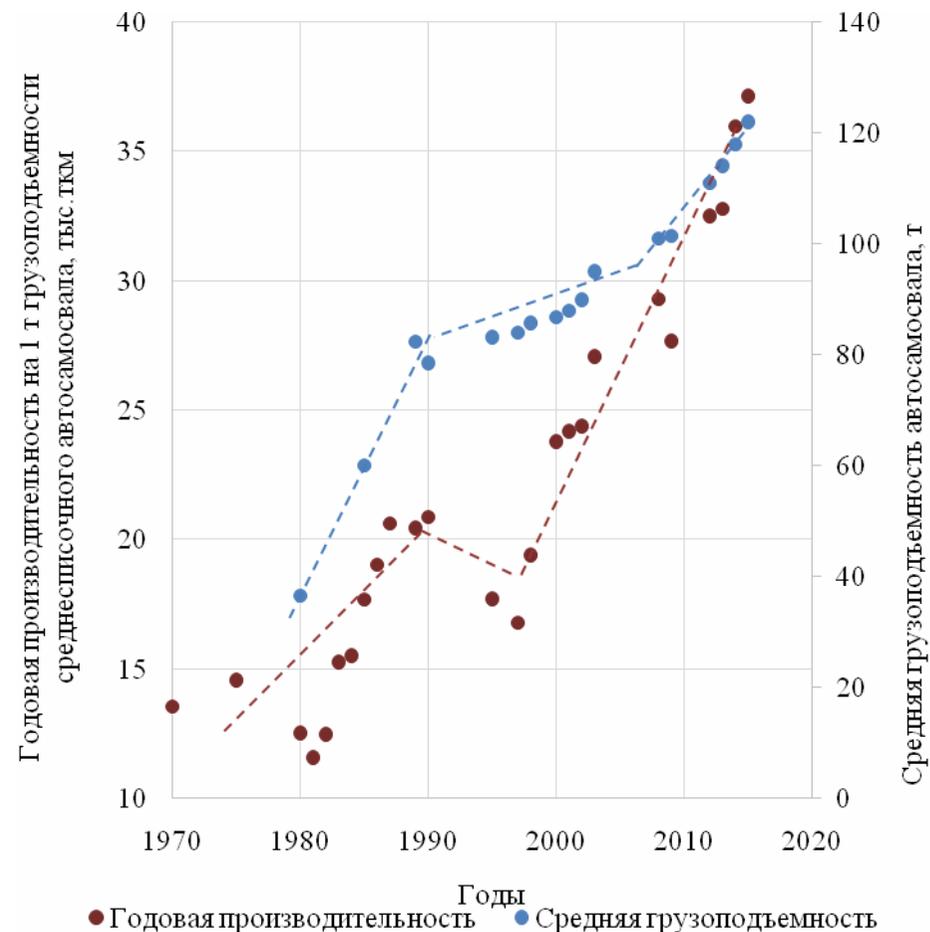


Рис. 1. Динамика изменения типоразмера и производительности экскаваторов и автосамосвалов на крупнейших железорудных карьерах России (Михайловский ГОК, Стойленский ГОК, Лебединский ГОК, Качканарский ГОК, предприятия ММК, Костомукшский ГОК, Оленегорский ГОК и Ковдорский ГОК)

Таблица 1

Наиболее распространенные мощные экскаваторы с ковшом 15 м³ и более, эксплуатируемые на карьерах в России³

Емкость ковша экскаватора, м ³	Рациональная грузоподъемность самосвалов, т	Эксплуатационная масса экскаватора ¹ , т	Канатные ²				Гидравлические ²				
			УЗТМ-КАРТЕКС	P&H	Cat (Bucyrus)	WK (TZ)	Cat (Terex, Bucyrus)		Komatsu	Liebherr	Hitachi
15 – 17	130 – 220	$\frac{725}{250 - 300}$	ЭКГ-15 V=15 м ³ m=725 т	PH 2100 V=13–15 м ³ m=485–495 т	–	WK-12 V=8–16 м ³ m=490 т	Terex RH120 V=15–17 м ³ m=285 т	Cat 6030 V=16,5–17 м ³ m=294 т	PC 3000 V=12 – 16,5 м ³ m=250–261 т	R 9250 V=15 м ³ m=249–253 т	EX2600 V=15–17 м ³ m=256 т
16 – 25	180 – 240	$\frac{740 - 800}{300 - 400}$	ЭКГ-18 (М) / ЭКГ-20 (К)(КМ) V=16 – 25 м ³ m=740 – 800 т	–	–	WK-20 V=16–34 м ³ m=792 т	Terex RH170 V=21 м ³ m=395 т	Cat 6040 V=22 м ³ m=405 т	PC 4000 V=19–25 м ³ m=380–399 т	R 9350/9400 V=18/22 м ³ m=302–345 т	EX3600 V=21–23 м ³ m=359–366 т
25 – 30	180 – 290	$\frac{775 - 980}{450 - 540}$	–	PH 2300 V=22–28 м ³ m=775–790 т	Cat 7295 V=18,4-39 м ³ m=789 т	WK-27 V=27 м ³ m=980 т	Terex RH200 V=26–28 м ³ m=525–537 т	Cat 6050 V=26–28 м ³ m=537 т	PC 5500 V=28–29 м ³ m=527–533 т	R995 V=26,5 м ³ m=450 т	EX 5500 V=27 м ³ m=518 т
34 – 36	200 – 320	$\frac{1080 - 1250}{540 - 690}$	ЭКГ-32Р / ЭКГ-35 V=32 – 35 м ³ m=1085 –1250 т	PH 2800 V=35–39 м ³ m=1079 т	Cat 7395 V=19,1-49,7 m=1179 т	WK-35 V=35 м ³ m=1080 т	–	Cat 6060 V=34 м ³ m=547–570 т	PC 7000 V=34–36 м ³ m=677-681 т	R996 V=29–34 м ³ m=668 т	EX5600 V=34 м ³ m=537 т
42 – 52	240 – 400	$\frac{1200 - 1560}{750 - 1000}$	–	PH 4100 V=53–61 м ³ m=1459 т	495HD/HR V=31-61,2 м ³ m=1200/1300 т	WK-45/55 V=45/55 м ³ m=1380/1560 т	–	Cat 6090 V=52 м ³ m=1000 т	PC 8000 V=38–42 м ³ m=752–777 т	R9800 V=42–47,5 м ³ m=800–810 т	EX8000 V=43 м ³ m=837 т

Примечания:

¹ – в числителе – средние значения для канатных экскаваторов; в знаменателе – для гидравлических

² – в колонках: ЭКГ-15 – модель экскаватора;

V=15 м³ – номинальная вместимость ковша экскаватора;

m=725 т – эксплуатационная масса экскаватора.

³ – Мощные гидравлические экскаваторы с емкостью ковша в диапазоне 34 – 36 м³ и 42 – 52 м³ (кроме EX5600), а также экскаватор WK-45/55 приведены справочно.

Изложение рассматриваемых вопросов

Исходя из представленных на рис. 2 данных, отражающих фактические показатели на некоторых горнодобывающих предприятиях за период с 2015 по 2023 г., можно сделать вывод, что среднемесячная выработка экскаваторов по отгруженной горной массе кардинально ограничивается условиями эксплуатации. Так, для экскаваторов с ковшом 18 – 20 м³ производительность составляла от 430 до 510 тыс. м³, что в среднем на 50 – 55 % меньше их технической производительности. При этом рекордные показатели достигали от 700 до 1020 тыс. м³/мес.

Для экскаваторов с большой емкостью ковша (32 – 35 м³) производительность была, соответственно, выше: среднемесячный показатель составлял от 600 до 900 тыс. м³/мес, что на 43 – 47 % меньше их технической производительности.

Важно отметить, что даже при интенсивном использовании экскаваторов и установлении рекордных показателей за счет непрерывной двухсторонней погрузки их фактическая производительность остается ниже расчетной (например, анализ, приведенный в [20]). Это связано с техническими ограничениями, организационными проблемами, погодными условиями и другими факторами, которые влияют на процесс выемочно-погрузочных работ.

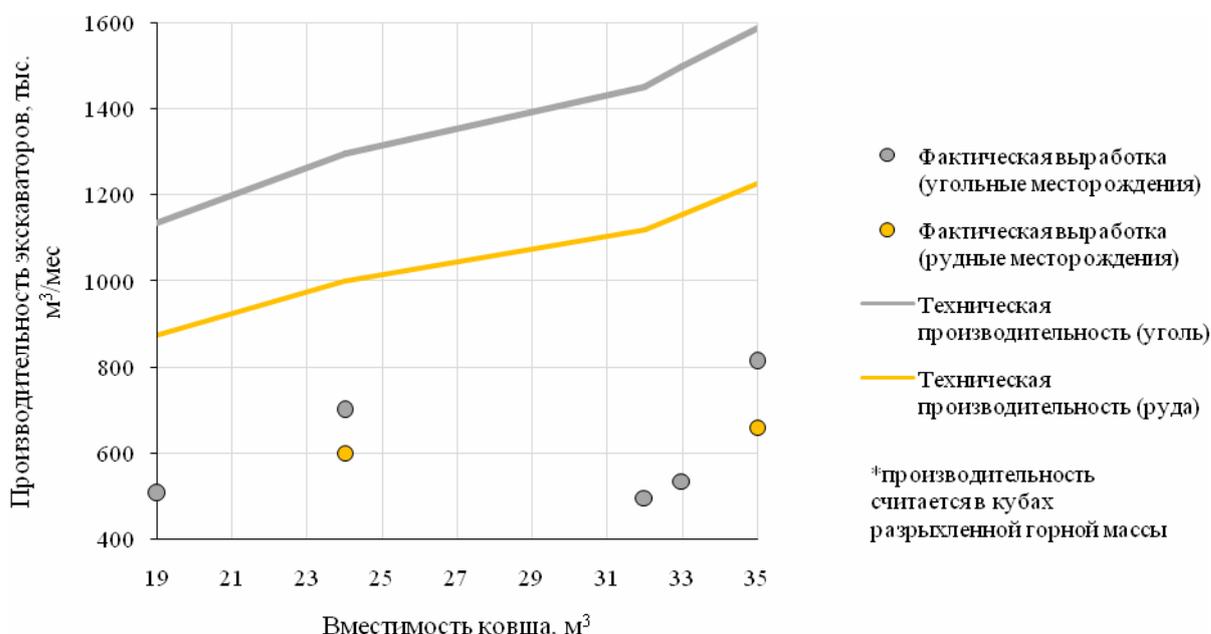


Рис. 2. Зависимость производительности от единичной мощности экскаватора (емкости ковша)

С 1990-х гг. развитие российского экскаваторостроения было стагнировано как в части проектирования и экспериментального производства в сфере машиностроения, так и в части неготовности горнодобывающих предприятий принимать на себя организационно-финансовую нагрузку по опытно-промышленной эксплуатации новых машин, которая неизбежно связана с необходимостью их доводки и устранения недостатков. В последнее десятилетие темпы развития возросли, ускорившись в последние годы, в том числе ввиду геополитической обстановки. УЗТМ-КАРТЕКС разработаны и эксплуатируются российские экскаваторы с вместимостью ковша до 35 м³. Насыщена линейка экскаваторов с ковшами 15 – 20 м³ с различной конструкцией рабочего оборудования (реечный однобалочный и двухбалочный напор, канатный напор). Ведутся работы по созданию линейки отечественных гидравлических карьерных экскаваторов. Стоит задача создания экскаваторов с большей вместимостью ковша для условий угольных месторождений [17, 21, 22].

С горно-технологической точки зрения экскаватор выбирается по двум основным группам факторов:

– соответствие экскаватора технологии добычи полезных ископаемых, определяемой горно-геологическими условиями, выражающееся в высоте рабочих уступов (подуступов) и, соответственно, высоте черпания и единичной производительности экскаватора (определяемой вместимостью ковша), которые также должны учитывать селективность выемки руды;

– соответствие типоразмеру карьерного транспорта как по рациональной продолжительности погрузки транспортных единиц, так и по соответствию геометрических параметров рабочего оборудования.

С учетом современного развития вычислительных мощностей выбор рациональной структуры экскаваторно-автомобильного комплекса должен осуществляться с учетом обоих вышеуказанных направлений путем оптимизации под конкретные горно-геологические условия с учетом всего жизненного цикла карьера.

Для определения рациональной типоразмерной линейки экскаваторов в общем случае можно ориентироваться на соответствие типоразмерному ряду карьерных автосамосвалов как превалирующему виду сборочного транспорта (по вместимости ковша и геометрическим параметрам разгрузки), исходя из соотношения вместимостей грузовой платформы автосамосвала и ковша экскаватора (табл. 2).

Из представленного укрупненного анализа видно, что особого внимания требуют следующие группы экскаваторов:

– с вместимостью ковша 15 – 25 м³ – для этой группы необходим максимальный диапазон конструктивных вариантов и вместимости ковшей под широкий диапазон горно-геологических условий;

– с вместимостью ковша 30 – 35 м³ – требуется развитие конструкций для повышения ремонтпригодности, повышения ресурса изнашиваемых частей, повышения коэффициента технической готовности, комплексная проработка конструктивных и организационно-эксплуатационных мероприятий, обеспечивающих сокращение продолжительности внутригодовых поддерживающих текущих ремонтов.

В перспективе необходима также разработка особо мощных экскаваторов с ковшами 45 – 60 м³ для обеспечения развития наиболее мощных экскаваторно-автомобильных комплексов при обеспечении импортонезависимости. Также актуальной проблемой является отсутствие отечественной линейки мощных карьерных гидравлических экскаваторов с ковшами 10 – 18 м³, применение которых востребовано в сложных горно-геологических условиях и для отработки приконтурных зон.

Новые экскаваторы производства УЗТМ-КАРТЕКС регулярно дорабатываются и выходят на хорошие рабочие показатели (рис. 3). Так, например, экскаваторы первой опытной партии ЭКГ-35 производства «Уралмашзавода» в результате планомерной работы по их «доводке» вышли с показателей 600 – 700 тыс. м³/мес на стабильные 750 – 830 тыс. м³/мес (отметим, что такая среднемесячная выработка заметно ниже технической производительности машины из-за ограничений по горно-геологическим и организационно-технологическим факторам). Коэффициент технической готовности повысился за указанный период с 0,77 до 0,85 – 0,88. Это стало результатом как конструктивных доработок изготовителем, так и адаптации системы эксплуатации с учетом особенностей данных экскаваторов силами эксплуатирующих организаций (угольных разрезов).

Модернизированный ЭКГ-35М, в конструкции которого учтены выявленные недостатки и применен ряд усовершенствований, в реальных условиях эксплуатации обеспечивает 900 – 1000 тыс. м³/мес и выше.

Таблица 2

Линейка типоразмеров мощных экскаваторов, построенная по соответствию линейке карьерных автосамосвалов

Типоразмер автосамосвалов		Типоразмер экскаваторов производства УЗТМ-КАРТЕКС										
		Имеющиеся модели экскаваторов							Перспективные модели			
		УГЭ-300 (гидравл.)	ЭКГ-15М	ЭКГ-18Р	ЭКГ-20	ЭКГ-20К	ЭКГ-20КМ	ЭКГ-32Р	ЭКГ-35	ЭКГ-25, ЭКГ-30Р	(45)****	(55)****
Грузоподъемность, т Вместимость, м ³ *	Рекоменд. ковш экскаватора, м ³ **	вместимость основного ковша экскаватора, м ³ *** / диапазон вместимости сменных ковшей, м ³										
		16 / 11 – 16	15-16,5 / 8 – 18	20 / 16 – 26	20 / 16 – 22	20 / 18 – 28	25 / 20 – 32	35 / 20 – 45	35 / 20 – 40	25 / 20 – 32	45 / 40 – 50	55 / 50 – 60
<u>110 – 140</u> (136) 67 – 135 (70)	12 – 20	6,1	–	4,2	4,2	3,7	–	–	–	–	–	–
		5,0	5,3	4,0	4,0	4,0	–					
		–	–	5,2	6,1	4,8	4,2					
<u>160</u> 65 – 96 (90)	20 – 30	–	–	6,0	6,0	5,4	4,8	4,8	4,8	4,8	–	–
		6,0	–	4,8	4,8	4,8	3,9	–	–	3,9	–	–
		6,0	5,4	3,7	4,4	3,4	–	–	–	–	–	–
<u>180</u> 72 – 108 (90)	20 – 30	–	–	–	–	6,0	5,4	5,4	5,4	5,4	–	–
		–	–	5,4	5,4	5,4	4,3	–	–	4,3	–	–
		–	6,0	4,2	4,9	3,9	3,4	–	–	3,4	–	–
<u>220</u> 90 – 147 (110)	30 – 45	–	–	–	–	–	5,6	5,6	5,6	5,6	–	–
		–	–	–	–	–	5,1	3,7	3,7	5,1	–	–
		–	–	5,7	–	5,3	4,6	3,3	3,3	4,6	–	–
<u>240</u> 96 – 141 (120)	30 – 45	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3,5	–
		–	–	–	–	–	5,6	4,0	4,0	5,6	–	–
		–	–	5,4	–	5,0	4,4	3,1	3,1	4,4	–	–
<u>290</u> 116 – 172 (150)	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	4,3	3,5
		–	–	–	–	–	–	4,9	4,9	–	3,8	–
		–	–	–	–	–	5,4	3,8	3,8	5,4	3,5	–
<u>360</u> 150 – 205 (180)	45 – 60	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5,0	4,0
		–	–	–	–	–	–	5,9	5,9	–	4,6	3,7
		–	–	–	–	–	–	4,8	4,8	–	4,4	3,6
<u>450</u> 200 – 268	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5,4
		–	–	–	–	–	–	–	–	–	6,0	4,9
		–	–	–	–	–	–	6,0	6,0	–	5,4	4,5

Примечание: * Указана вместимость грузовой платформы автосамосвала с учетом «шапки», м³ (в скобках дан параметр для базовой модификации).

**Объем ковша, рекомендуемый заводом-изготовителем карьерных самосвалов БелАЗ (<https://belaz.by/products/products-belaz/dumpers/>).

*** Указан диапазон емкости ковша с сайта завода-изготовителя экскаваторов УЗТМ-КАРТЕКС (<https://uralmash-kartex.ru/eksavatory/>).

В ячейках указано соотношение вместимости кузова автосамосвала и ковша экскаватора (чем темнее заливка ячейки, тем рациональнее вариант) для ковшей: уменьшенный / основной / максимальный.

**** Приведены возможные для изготовления экскаваторы (исходя из зарубежных аналогов экскаваторов и применяющихся автосамосвалов).

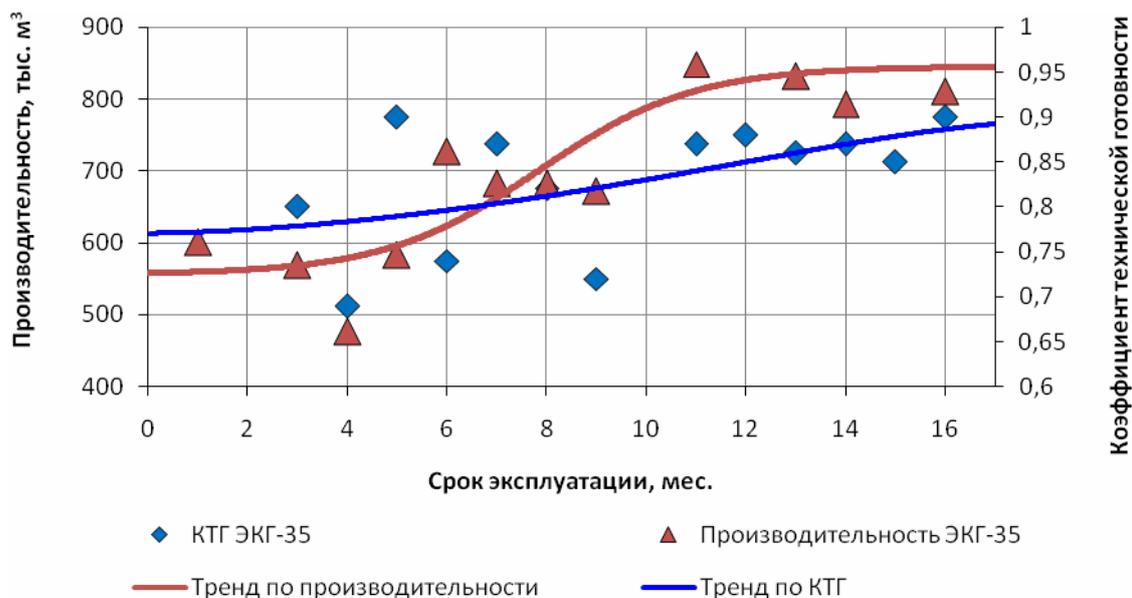


Рис. 3. Динамика улучшения показателей работы экскаватора ЭКГ-35 на угольном разрезе в период его конструктивной доводки

Сравнение показателей работы экскаваторов ЭКГ-35 и зарубежных серийных аналогов для условий угольного разреза показывает (рис. 4), что относительно новые модели мощных отечественных экскаваторов конкурентоспособны. В то же время есть необходимость совершенствования рассматриваемых отечественных машин (рис. 5) для достижения и превышения показателей лучших образцов мировых производителей: среднеэксплуатационную производительность ЭКГ-35 необходимо увеличить на 7 – 12% от текущего показателя, а коэффициент технической готовности должен обеспечиваться на уровне 0,85 – 0,90.

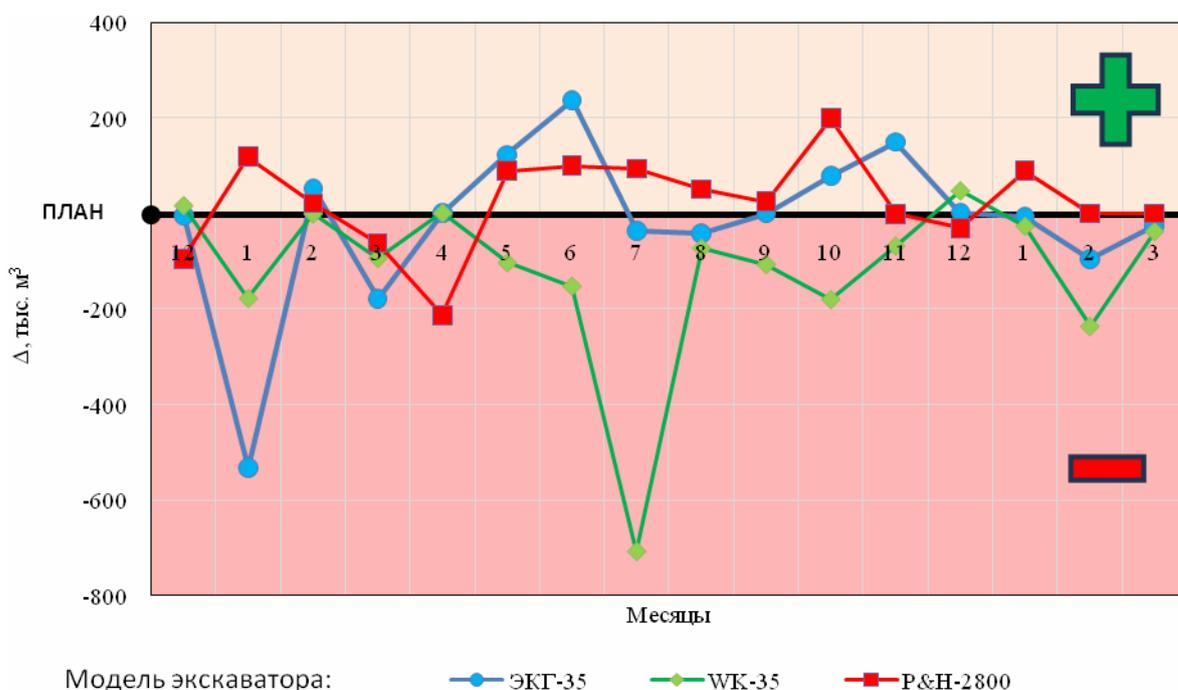
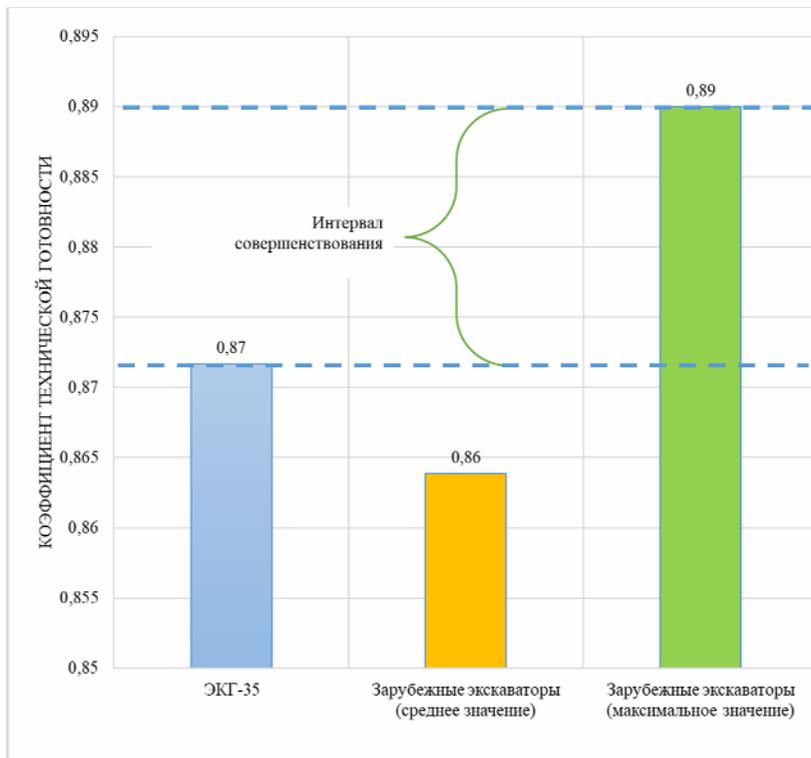


Рис. 4. Разница плановой и фактической производительности отечественного и зарубежных экскаваторов с емкостью ковша 35 м³ на одном из угольных разрезов

а) Коэффициент технической готовности



б) Производительность

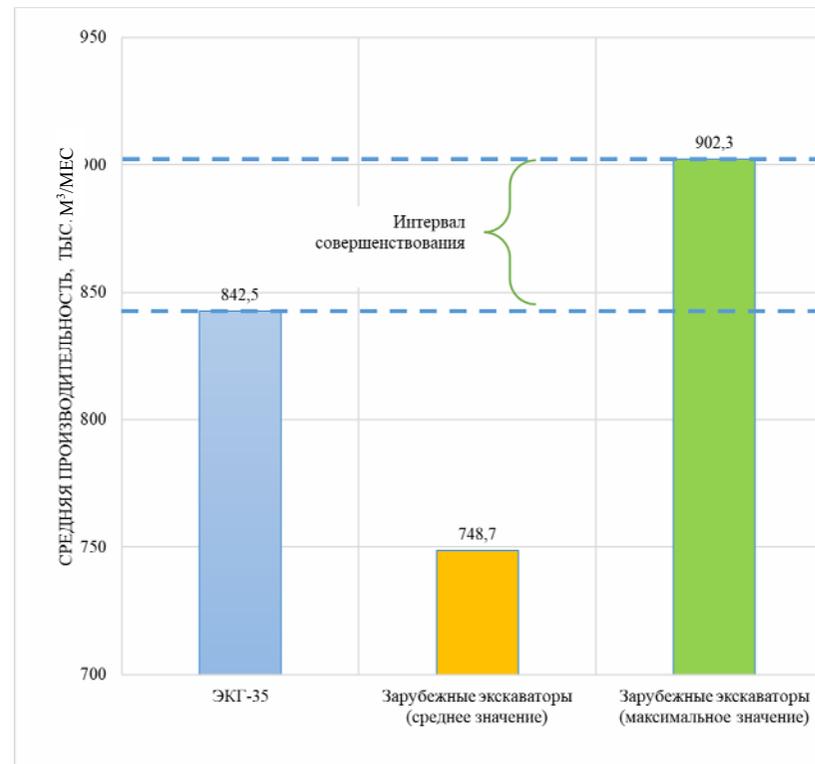


Рис. 5. Сравнение показателей работы отечественного экскаватора ЭКГ-35 (после первичной опытно-промышленной доводки конструкции) и зарубежных аналогов на угольном разрезе (фактическая выработка всех рассмотренных экскаваторов существенно ниже их технической производительности с учетом ограничений по горно-геологическим и организационно-технологическим факторам)

В настоящее время актуальным является вопрос доработки конструкций уже выпускаемых российских экскаваторов с вместимостью ковшей 20 – 35 м³ с целью обеспечения высоких эксплуатационных показателей. Анализ на действующих российских горнодобывающих предприятиях, где они эксплуатируются, показал следующее:

1. Геометрические параметры экскаваторов обеспечивают эффективную экскавацию и погрузку горной массы в карьерный транспорт.

2. Базовая конструкция экскаваторов обеспечивает их адаптацию к фактическим условиям эксплуатации путем конструктивной «доводки» с учетом данных, полученных в ходе опытно-промышленных испытаний; перепроектирование машин не требуется.

3. Требуют совершенствования конструкции экскаваторов:

– развитие конструктивно-силовых схем рабочего оборудования с целью повышения их ресурса, снижения объема работ по «поддерживающему» их ресурсу ремонту;

– усиление износостойкости зон повышенного износа на ковше, выявленных в ходе опытно-промышленной эксплуатации; оптимизация формы зубьев для повышения их ресурса;

– развитие конструкции гусеничного хода для повышения ресурса в условиях недостаточно качественно подготовленных оснований забоев при их динамичном подвигании;

– комплексная оптимизация по факторам «качество материалов – ресурс деталей», которые обеспечили бы рациональное распределение количества изнашиваемых деталей во времени по видам ремонтов с целью снижения «нагрузки» на внутригодовые поддерживающие (текущие) ремонты.

4. Для сложных горно-геологических условий необходима модификация экскаваторов с речным напором, снабженным механическим ограничителем усилия напора, чтобы предотвращать чрезмерные нагрузки на металлоконструкции и их преждевременный выход из строя.

Выводы

1. Анализ показателей функционирования основных высокопроизводительных экскаваторов, применяющихся на ведущих угольных разрезах и железорудных ГОКах России показал, что коэффициент технической готовности отечественных и зарубежных экскаваторов находится на близком уровне. Расчетная техническая производительность экскаваторов выше реальной фактической производительности, достигаемой на ГОКах на 30 % и более. Для ее увеличения необходима минимизация негативно влияющих факторов, что достигается при установлении рекордных показателей на ГОКах и разрезах.

2. За последнее десятилетие российскими производителями карьерных экскаваторов сформирована линейка экскаваторов с ковшами 15 – 35 м³. Экскаваторы прошли этап опытно-промышленного освоения и усовершенствования. В настоящее время продолжается развитие их конструкций. Опыт показал, что конструктивная «доводка» обеспечивает приближение их производительности и технической готовности к показателям аналогичных серийных зарубежных машин.

3. Группой экскаваторов, требующих наиболее пристального внимания и скорейшей доводки конструкций до высоких показателей производительности и надежности, являются канатные экскаваторы-мехлопаты с вместимостью ковша 20 - 35 м³.

4. Перспективной областью освоения для отечественного экскаваторостроения в области добычи полезных ископаемых являются:

– электромеханические канатные экскаваторы с вместимостью ковша 40 - 60 м³;

– гидравлические экскаваторы с вместимостью ковша 10 – 18 м³ (а в перспективе и более).

Список литературы

1. Яковлев В.Л., Яковлев В.А., 2017. Актуальные проблемы карьерного транспорта и перспективы его развития. *Проблемы недропользования*, № 4(15), С. 5 – 9. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.005
2. Яковлев В.Л., 2012. Транспорт глубоких карьеров: состояние, проблемы, перспективы развития. *Глубокие карьеры: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Апатиты, 18–22 июня 2012 года.* – Апатиты: ООО "Реноме", С. 67 – 80.
3. *Технико-экономические показатели горных предприятий за 1990 – 2015 гг.* Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2015, 255 с.
4. Хорешок А.А., Дубинкин Д.М., Марков С.О., Тюленев М.А., 2021. Оценка степени взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, № 3(145), С. 104 – 112.
5. Сытенков В.Н., Ганин А.Р., Донченко Т.В., Шибанов Д.А., 2014. Анализ областей применения канатных и гидравлических экскаваторов при открытой разработке месторождений. *Рациональное освоение недр*, № 3, С. 30 – 37.
6. Гавришев С.Е., Кольга А.Д., Пыталев И.А., Попова Т.М., 2019. Повышение эффективности использования автосамосвалов в условиях карьеров на открытых горных работах. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 3, С. 161 – 170.
7. Подэрни Р.Ю., 2015. Мировой рынок поставок современного выемочно-погрузочного оборудования для открытых горных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 2, С. 148 – 167.
8. Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. и др., 2019. *Открытые горные работы – XXI век. Справочник.* Том 1. Под ред. Анистратова К.Ю. Москва: ООО «Система максимум», 640 с.
9. Колесников В.Ф., Цехлар М., Тюленева Е.А., 2018. Обзор ведения выемочно-погрузочных работ при отработке угленасыщенных зон разрезов Кузбасса. *Техника и технология горного дела*, № 2 (2), С. 36 – 50.
10. Подэрни Р.Ю., Булес П., 2015. Сравнительный анализ гидравлических и механических экскаваторов с прямой лопатой. *Горный журнал*, № 1, С. 55 – 61.
11. Страбыкин Н.Н., Горячкин В.М., 2012. Основные направления технической политики в области развития экскаваторостроения для карьеров. *Горное оборудование и электромеханика*, № 3, С. 36 – 44.
12. Litvin O., Makarov V., Strelnikov A., Tyuleneva E., 2019. Study of the backhoe's digging modes at rock face working-out. *E3S Web of Conferences*, Vol. 105, Article no. 01024.
13. Кантович Л.И. Литвин О.И., Хорешок А.А., Тюленева Е.А., 2019. Опыт и перспективы применения гидравлических экскаваторов при отработке угленасыщенных зон на разрезах Кузбасса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 152 – 160.
14. Тюленев М.А., Марков С.О., Дубинкин Д.М., Аксенов В.В., 2021. Об интенсивности изменения производительности автономной тяжелой платформы. *Вестник КузГТУ*, № 1, С. 97 – 108.
15. Дубинкин Д.М., Аксенов В.В., Тюленев М.А., Марков С.О., 2020. Влияние горнотехнических факторов на производительность беспилотных карьерных автосамосвалов. *Техника и технология горного дела*, № 4 (11), С. 42 – 69.
16. Анистратов К.Ю., 2012. Анализ рынка карьерных экскаваторов и самосвалов в РФ и странах СНГ. *Горная промышленность*, № 2(102), С. 16 – 19.
17. Анистратов К.Ю., 2016. Технико-экономическое обоснование эффективности применения карьерных экскаваторов ЭКГ-18 с речным напором ПАО "Уралмашзавод" на угольных разрезах. *Горная промышленность*, № 5(129), С. 18 – 24.

18. Фирсов А.Л., Бобровский Д.А., Синяков А.А., 2009. Техническое перевооружение филиала ОАО ХК «Якутуголь» разрез «Нерюнгринский». *Горный информационно-аналитический бюллетень*. № 1, С. 361 – 369.

19. Бураков А.М., Панишев С.В., Алькова Е.Л., Хосоев Д.В., 2022. Опыт применения гидравлических экскаваторов в сложных горно-геологических и климатических условиях. *Горная промышленность*, № 2, С. 90 – 96. DOI 10.30686/1609-9192-2022-2-90-96.

20. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Черепанов В.А., 2023. Поиск резервов повышения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов с применением компьютерного моделирования. *Горная промышленность*, № 6, С. 72 – 78.

21. Анистратов К.Ю., 2019. Анализ эффективности применения экскаваторов УЗТМ-КАРТЭКС на карьерах. *Горная промышленность*, № 5(147), С. 20.

22. Уралмашзавод и Газпромбанк: комплексные решения для горной промышленности. *Горная промышленность*, 2017, № 1(131), С. 59.

References

1. Yakovlev V.L., Yakovlev V.A., 2017. Aktual'nye problemy kar'ernogo transporta i perspektivy ego razvitiya [Current problems of career transport and prospects for its development]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(15), P. 5 – 9. DOI: 10.18454/ 2313-1586.2017.04.005

2. Yakovlev V.L., 2012. Transport glubokikh kar'erov: sostoyanie, problemy, perspektivy razvitiya [Deep quarry transport: status, problems, development prospects]. *Glubokie kar'ery: sbornik dokladov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Apatity, 18–22 iyunya 2012 goda.* – Apatity: ООО "Renome", P. 67 – 80.

3. Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli gornyykh predpriyatii za 1990 – 2015 gg. [Technical and economic indicators of mining enterprises for 1990 – 2015]. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 2015, 255 p.

4. Khoreshok A.A., Dubinkin D.M., Markov S.O., Tyulenev M.A., 2021. Otsenka stepeni vzaimovliyaniya vmestimosti kovsha ekskavatora i kuzova avtosamosvala [Assessment of the degree of mutual influence of the bucket capacity of the excavator and the dump truck body]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, № 3(145), P. 104 – 112.

5. Sytenkov V.N., Ganin A.R., Donchenko T.V., Shibanov D.A., 2014. Analiz oblastei primeneniya kanatnykh i gidravlicheskikh ekskavatorov pri otkrytoi razrabotke mestorozhdenii [Analysis of the application of rope and hydraulic excavators in the open-pit mining of deposits]. *Ratsional'noe osvoenie nedr*, № 3, P. 30 – 37.

6. Gavishev S.E., Kol'ga A.D., Pytalev I.A., Popova T.M., 2019. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya avtosamosvalov v usloviyakh kar'erov na otkrytykh gornyykh rabotakh [Improving the efficiency of using dump trucks in open pit mining operations]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 3, P. 161 – 170.

7. Poderni R.Yu., 2015. Mirovoi rynek postavok sovremennogo vyemochno-pogruzochnogo oborudovaniya dlya otkrytykh gornyykh rabot [The global market for the supply of modern dredging and loading equipment for open-pit mining]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 2, P. 148 – 167.

8. Anistratov Yu.I., Anistratov K.Yu. i dr., 2019. Otkrytye gornye raboty – XXI vek. Spravochnik [Open-pit mining – the XXI century. Guide]. Vol. 1. Pod red. Anistratova K.Yu. Moscow: ООО "Sistema maksimum", 640 p.

9. Kolesnikov V.F., Tsekhlar M., Tyuleneva E.A., 2018. Obzor vedeniya vyemochno-pogruzochnykh rabot pri otrabotke uglenasyschennykh zon razrezov Kuzbassa [Overview of the conduct of excavation and loading operations during the development of coal-rich zones of Kuzbass sections]. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela*, № 2 (2), P. 36 – 50.

10. Poderni R.Yu., Bules P., 2015. Sravnitel'nyi analiz gidravlicheskiikh i mekhanicheskikh ekskavatorov s pryamoj lopatoi [Comparative analysis of hydraulic and mechanical excavators with a straight shovel]. *Gornyi zhurnal*, № 1, P. 55 – 61.
11. Strabykin N.N., Goryachkin V.M., 2012. Osnovnye napravleniya tekhnicheskoi politiki v oblasti razvitiya ekskavatorostroeniya dlya kar'erov [Main directions of technical policy in the field of quarries excavator construction development of quarries excavators]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, № 3, P. 36 – 44.
12. Litvin O., Makarov V., Strelnikov A., Tyuleneva E., 2019. Study of the backhoe's digging modes at rock face working-out. *E3S Web of Conferences*, Vol. 105, Article no. 01024.
13. Kantovich L.I. Litvin O.I., Khoreshok A.A., Tyuleneva E.A., 2019. Opyt i perspektivy primeneniya gidravlicheskiikh ekskavatorov pri otrabotke uglenasyshchennykh zon na razrezakh Kuzbassa [Main directions of technical policy in the field of quarries excavator construction development of quarries excavators]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 4, P. 152 – 160.
14. Tyulenev M.A., Markov S.O., Dubinkin D.M., Aksenov V.V., 2021. Ob intensivnosti izmeneniya proizvoditel'nosti avtonomnoi tyazheloi platform [On the intensity of changing the performance of an autonomous heavy platform]. *Vestnik KuzGTU*, № 1, P. 97 – 108.
15. Dubinkin D.M., Aksenov V.V., Tyulenev M.A., Markov S.O., 2020. Vliyanie gornotekhnicheskikh faktorov na proizvoditel'nost' bespilotnykh kar'ernykh avtosamosvalov [Influence of mining engineering factors on the productivity of unmanned mining dump trucks]. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela*, № 4 (11), P. 42 – 69.
16. Anistratov K.Yu., 2012. Analiz rynka kar'ernykh ekskavatorov i samosvalov v RF i stranakh SNG [Market analysis of mining excavators and dump trucks in Russia and CIS countries]. *Gornaya promyshlennost'*, № 2(102), P. 16 – 19.
17. Anistratov K.Yu., 2016. Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie effektivnosti primeneniya kar'ernykh ekskavatorov EKG-18 s reechnym naporom PAO "Uralmashzavod" na ugol'nykh razrezakh [Feasibility study of the effectiveness of using EKG-18 rack-and-pinion excavators of PJSC Uralmashzavod at coal mines]. *Gornaya promyshlennost'*, № 5(129), P. 18 – 24.
18. Firsov A.L., Bobrovskii D.A., Sinyakov A.A., 2009. Tekhnicheskoe perevooruzhenie filiala OAO KhK "Yakutugol" razrez "Neryungrinskii" [Technical re-equipment of the branch of JSC HC "Yakutugol" section "Neryungrinsky"]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. № 1, P. 361 – 369.
19. Burakov A.M., Panishev S.V., Al'kova E.L., Khosoev D.V., 2022. Opyt primeneniya gidravlicheskiikh ekskavatorov v slozhnykh gorno-geologicheskikh i klimaticheskikh usloviyakh [Experience in the use of hydraulic excavators in difficult mining, geological and climatic conditions]. *Gornaya promyshlennost'*, № 2, P. 90 – 96. DOI 10.30686/1609-9192-2022-2-90-96.
20. Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Cherepanov V.A., 2023. Poisk rezervov povysheniya proizvoditel'nosti ekskavatorno-avtomobil'nykh kompleksov s primeneniem komp'yuternogo modelirovaniya [Search for reserves to increase the productivity of excavator-automotive complexes using computer modeling]. *Gornaya promyshlennost'*, № 6, P. 72 – 78.
21. Anistratov K.Yu., 2019. Analiz effektivnosti primeneniya ekskavatorov UZTM-KARTEKS na kar'erakh [Analysis of the effectiveness of UZTM-KARTEX excavators in quarries]. *Gornaya promyshlennost'*, № 5(147), P. 20.
22. Uralmashzavod i Gazprombank: kompleksnye resheniya dlya gornoj promyshlennosti [Uralmash-plant and Gazprom-bank: integrated solutions for the mining industry]. *Gornaya promyshlennost'*, 2017, № 1(131), P. 59.

УДК 622.233.235

Реготунов Андрей Сергеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: pochta8400@inbox.ru

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ И ВЫБОРУ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ АДАПТАЦИИ БУРОВЫХ РАБОТ К ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ УСЛОВИЯМ НА КАРЬЕРАХ*

Аннотация:

Представлена систематизированная информация о применяемых технических решениях для адаптации производимых на карьерах России буровых работ к изменяющимся условиям, повышающим их энергоэффективность и безопасность. В результате анализа методом экспертных оценок установлено, что эффективность и безопасность реализации технологических изменений в буровых работах определяется техническими решениями, связанными с получением информации о состоянии горных пород в естественном залегании, изменением способа бурения, конструкции бурового станка и инструмента. Эти направления исследования имеют значительные резервы для развития буровых работ и заслуживают внимания в первую очередь. Также установлены наиболее значимые параметры, учитываемые при выборе технических решений для адаптации параметров разрушения массивов горных пород при бурении взрывных скважин. Приведен порядок оценки эффективности инноваций в процессе совершенствования буровзрывных работ (БВР), основанный на поэтапном изучении влияющих факторов, управляющих процессами выбора адаптационных решений к меняющимся условиям, выявлении рациональных переходных процессов в результате применения статического подхода к технико-экономической оценке целесообразности применения с учетом возможностей горного предприятия. Определены перспективные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: разрушение горных пород, буровые работы, карьер, адаптация, технические решения, факторы.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.089

Regotunov Andrey S.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.;
e-mail: pochta8400@inbox.ru

A METHODOICAL APPROACH TO EVALUATING AND SELECTING TECHNICAL SOLUTIONS FOR ADAPTING DRILLING OPERATIONS TO CHANGING CONDITIONS IN QUARRIES

Abstract:

The article presents systematized information on the applied technical solutions for adapting drilling operations performed in Russian quarries to changing conditions that increase their energy efficiency and safety. As a result of the analysis by the method of expert assessments, it was found that the effectiveness and safety of the implementation of technological changes in drilling operations is determined by technical solutions related to obtaining information about the state of rocks in their natural occurrence, changing the drilling method, the design of the drilling machine and tools. These areas of research have significant reserves for the development of drilling operations and deserve attention first of all. The most significant parameters have also been determined, which are taken into account when choosing technical solutions for adapting the parameters of destruction of rock masses during drilling of blast wells. The procedure for evaluating the effectiveness of innovations in the process of improving the drilling and blasting operations is given, based on a step-by-step study of the influencing factors governing the selection of adaptive solutions to changing conditions, identifying rational transients as a result of applying a static approach to the feasibility assessment of the feasibility of application, taking into account the capabilities of a mining enterprise. Promising areas for further research have been identified.

Key words: rock destruction, drilling, quarry, adaptation, technical solutions, factors.

* Обобщение ранее проведенных исследований, финансируемых в рамках Госзадания №075-00581-19-00, темы № 0405-2019-0005(2019-2021): «Методы учета переходных процессов технологического развития при освоении глубокозалегающих сложноструктурных месторождений полезных ископаемых», с дополнительным привлечением хозяйственных средств, выполнено для целей Государственного задания №075-00412-22 ПР, темы 1 (2022-2024): «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем» (FUWE-2022-0005), пер. №1021062010531-8-1.5.1.

Введение

При освоении открытым способом месторождений твердых полезных ископаемых широко применяется бурение взрывных скважин шарошечными буровыми станками. В России и СНГ объем шарошечного бурения составляет более 90 %, и в перспективе указанный способ бурения сохранит свои позиции на открытых горных работах. На карьерах РФ и СНГ широкое применение получили отечественные станки среднего типа (по массе) – СБШ -250МН и его модификации.

Основным видом породоразрушающего инструмента, применяемого на современных буровых станках, являются шарошечные долота режуще-скалывающего действия. Наибольшее применение на карьерах России и СНГ получили трехшарошечные долота.

В себестоимости бурения 1 м скважины в зависимости от крепости разрабатываемых руд и пород затраты на буровой инструмент составляют от 15 до 75 % [1], а суммарные затраты на буровой инструмент за весь период работы бурового станка превышают в несколько раз номинальную стоимость буровой техники.

Нарастание по мере увеличения глубины извлекаемых запасов геологической информации и изменение горнотехнических условий, постепенное замещение на предприятиях устаревшей горной техники новыми прогрессивными моделями, изменение экономических условий и других внешних факторов вызывают необходимость решения вопросов устойчивого технологического развития буровых работ.

Таким образом, цель работы – разработка методического подхода для оценки и выбора технических решений при адаптации буровых работ на карьерах.

Систематизация технических решений для адаптации параметров буровых работ

Факторы, вызывающие необходимость совершенствовать параметры буровой техники, можно разделить на несколько основных групп [2]:

- горнотехнические;
- горно-геологические (свойства и структура массива горных пород);
- конструктивные параметры бурового инструмента;
- технические параметры бурового станка;
- система технического обслуживания и ремонта;
- требования промышленной безопасности;
- экономические.

Влияние совокупности факторов в период эксплуатации в карьере вызывает необходимость адаптации параметров буровой техники и инструмента к новым условиям. Адаптация подразумевает поддержание основных параметров технологического процесса на приемлемом уровне с точки зрения энергоэффективности и промышленной безопасности при изменении условий внешней и внутренней среды за счет переходных процессов. Под переходными процессами понимаются заранее предусмотренные действия, направленные на своевременное выявление и учет недостающей информации о взаимосвязях между параметрами принимаемых нововведений и изменяющимися условиями ведения горных работ в динамике развития карьера [3]. Результатом заранее организованных и своевременно произведенных действий в производственной системе является [4] внедрение ранее апробированных или инновационных технических решений; модернизация действующей технологии с целью компенсации негативного воздействия внутренней среды; приспособление технологического процесса к условиям сокращения объемов производства при затухании горных работ или устойчивом снижении спроса на продукцию предприятия.

Рассмотрим основные виды современных технических решений для адаптации буровых работ к меняющимся условиям, внедренные в течение последних 20 лет на горных предприятиях с открытым способом разработки месторождений (табл. 1).

Таблица 1

**Технические решения для адаптации параметров буровых работ
к меняющимся условиям**

Группа	Техническое решение	Результат внедрения на предприятиях	Горное предприятие
1	2	3	4
I	Изменение конструкции долота под конкретные породы	В результате создания рационального механизма разрушения повысились производительность бурового станка, износостойчивость шарошечных долот и снизились затраты на буровой инструмент на 35 – 40 %. Обеспечено высокое качество дробления горной массы.	ПАО «Ураласбест», Качканарский ГОК, Костомукшский ГОК [5 – 7]. В условиях карьеров Красноярско-го края и Хакасии - Горевский ГОК, Полнос [9 - 10]
II	Изменение способа бурения	Переход с ударно-канатного способа на шарошечный позволил значительно повысить производительность, а по себестоимости бурения 1 м скважины произошло существенное снижение затрат.	ПАО «Ураласбест», Качканарский ГОК, Костомукшский ГОК, Михайловский ГОК, Лебединский ГОК, Оленегорский ГОК, Стойленский ГОК и др.
	Изменение способа бурения	Переход на некоторых блоках от шарошечного к термическому способу бурения повысил производительность бурения скважин.	Михайловский ГОК. Выборочно на отдельных блоках, так как термический способ бурения имеет ограниченную область применения, связанную с избирательностью термического разрушения, эффективность которого в большой степени зависит от содержания SiO ₂ в составе массива (не менее 68 – 72 %).
III	Изменение режима бурения	Позволяет снизить параметры вибрации пола машинного отделения и рабочего места машиниста (амплитуду колебаний, а также частично частоту колебаний), повышает сменную производительность не менее чем на 15 %.	На карьерах: ПАО Алроса, ПАО «Полнос», Мазульского известнякового рудника ОАО «Русал-Ачинск», Нефелинового рудника ОАО «Русал», угольные разрезы СУЭКа [10 - 11].
		Обеспечивает повышение скорости бурения на 30 – 40 % без снижения стойкости шарошечного долота.	
IV	Совершенствование конструкции бурового станка	В результате модернизации буровых станков СБШ-250МНА-32, проведенной заводом-изготовителем ОАО «Рудгормаш» за последние 15 лет, производительность бурения ими выросла на 15 - 20 %.	На карьерах России: Качканарский ГОК, Лебединский ГОК, Михайловский ГОК, Олимпиадинский ГОК и др. [12 – 15].

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
		На предприятиях в последнее время эксплуатируются новые высокопроизводительные каркасно-платформенные буровые станки СБШ 250/270-60 КП. Улучшилась организация их ремонта и увеличилась надежность эксплуатации.	
V	Контроль процесса бурения и уточнение физико-механических свойств горных пород	Повышение контроля за расходом бурового инструмента.	ОАО «Карельский Окамыш», ОАО «Разрез Тугнуйский», ОАО «Полиметалл», ОАО «СУЭК-Кузбасс», Айхальский ГОК ПАО «Полюс», Оленегорский ГОК (Олкон) [16 – 17].
		Повышение безопасности буровых работ (создание дистанционно управляемых станков для работы на карьерах АК «АЛРОСА» на узких площадках, опасность их обрушения велика).	
		Сокращение расходов на ВВ и бурение скважин до 10 %, повышение производительности горнотранспортного оборудования до 8 %, улучшение качества дробления горной массы. Экономический эффект составил 510 млн руб. на разрезе «Тугнуйский», АО «СУЭК» – составил 510 млн руб.	
VI	Система технического обслуживания и ремонтов	Несвоевременное списание устаревших станков ведет к снижению производительности и повышению опасности применения.	ОАО «Ураласбест» [18], Качканарский ГОК, другие железорудные карьеры.

Из шести основных групп технических решений (табл. 1) для адаптации параметров буровых работ к изменяющимся условиям влияние на смежные процессы оказывают две группы:

– изменение конструкции долота под конкретные породы при условии, что меняется и диаметр;

– контроль процесса бурения взрывных скважин с одновременным уточнением свойств горных пород, так как обеспечивается техническая возможность повышения качества дробления за счет корректировки конструкции скважинного заряда взрывчатого вещества в соответствии с уточненным распределением горных пород в массиве по трудности бурения.

Влияние отображается на организационно-технических факторах и параметрах:

– взрывного разрушения – удельный расход ВВ, гранулометрический состав взорванной горной массы;

– экскавации – емкость ковша экскаватора, длительность цикла погрузки, производительность экскаватора, удельные затраты на экскавацию;

– транспортирования – объем кузова транспортного средства, грузоподъемность транспортного средства, удельные затраты на транспортирование, производительность транспорта;

– крупного дробления на дробильно-обоганительной фабрике – угол захвата, производительность, мощность электродвигателя.

Для оценки влияния указанных технических решений на смежные технологические решения в будущих исследованиях процесса адаптации буровых работ на карьерах предстоит выбрать специальный критерий.

Оценка технических решений по значимости влияния на адаптацию параметров буровых работ на карьерах России

Для оценки относительной важности технических решений применен метод экспертных оценок мнений специалистов, выявленных по их публикациям [19]. Мнения специалистов переведены в количественную форму – единицей указано изменение показателя, ноль показывает отсутствие изменения показателя при данном техническом решении. В табл. 2 приведены параметры, учитываемые при оценке технических решений при осуществлении технологических изменений на карьерах России при адаптации параметров буровых работ к меняющимся условиям.

Таблица 2

Результаты оценки относительной важности технических решений для адаптации параметров буровых работ

Техническое решение	Оцениваемый показатель										B_i	Нормированная относительная важность B_{in}
	Производительность			Эффективность		Безопасность				Качество		
	Мощность бурового станка	Квалификация персонала	Организация процесса	Затраты материальные	Время процесса	Персонал	Окружающая среда	Оборудование	Инфраструктура			
Контроль процесса бурения и уточнение физико-механических и структурных характеристик массива горных пород	1	1	1	1	1	1	Техническое решение	Оцениваемый показатель	B_i	1	0,8	0,200
Изменение способа бурения	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0,8	0,200
Изменение режима бурения	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0,6	0,150
Изменение конструкции бурового инструмента (диаметр, параметры вооружения)	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0,5	0,125
Изменение конструкции бурового станка без изменения способа бурения	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0,7	0,175
Совершенствование системы технического обслуживания и ремонтов	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0,6	0,150
											Суммарное значение отн. важности	Сумма нормированной отн. важности
Относительная важность показателя W_i	1	0,67	0,67	1	1	1	0	0,67	0	0,67	Относительная важность в баллах $\Sigma=6,68$	
Нормированное значение относительной важности показателя W_{in}	0,150	0,100	0,100	0,150	0,150	0,150	0	0,100	0	0,100	Сумма значений нормированной относительной важности $\Sigma=1$	

Для каждого технического решения определялся показатель относительного влияния на выбранные параметры B_i :

$$B_i = (\sum_{i=1}^k T) / N. \quad (1)$$

Далее рассчитывался нормированный показатель влияния B_{in} :

$$B_{in} = B_i / \sum_{i=1}^k B_i, \quad (2)$$

где $\sum_{i=1}^k T$ – количество показателей, изменяющихся в лучшую сторону при данном техническом решении; N – общее количество оцениваемых параметров.

Для оценки относительной важности каждого параметра W_i из всей совокупности оцениваемых при выборе того или иного технического решения производилось суммирование баллов («по вертикали»), присвоенных по каждому конкретному техническому решению для определенного наименования параметра.

Далее сумма баллов, полученная по каждому параметру, делилась на общее количество рассматриваемых технических решений. Полученные значения W_i по каждому параметру суммировались («по горизонтали») с целью определения нормированной относительной важности W_{in} согласно выражению:

$$W_{in} = W_i / \sum_{i=1}^{n=k} W_i, \quad (3)$$

где W_i – значение относительной важности параметра, то есть отношение суммы технических решений, в каждом из которых учитывается рассматриваемый параметр, отнесенный к общему количеству технических решений; $\sum_{i=1}^{n=k} W_i$ – суммарное значение относительной важности в баллах по каждому параметру. По нормированной относительной важности определялась значимость каждого оцениваемого параметра при выборе технического решения.

В результате анализа методом экспертных оценок относительной важности технических решений для приведения производственной системы буровых работ к улучшенному состоянию установлено, что эффективная и безопасная адаптация параметров буровых работ (рис. 1), в первую очередь, основывается на технических решениях, связанных с получением информации о состоянии горных пород в естественном залегании, изменением способа бурения, конструкции бурового станка.



Рис. 1. Относительная важность технических решений для адаптации параметров буровых работ

В результате экспертной оценки относительной важности показателей, которые учитываются при выборе технических решений (рис. 2), установлено, что, в первую очередь, специалисты обращают внимание на влияние вносимых технических изменений на величину потребляемой буровым станком мощности, величину материальных ресурсов и времени, затрачиваемых на процесс бурения, а также на изменение промышленной безопасности для персонала. В средней степени оценивают при выборе технических решений их влияние на необходимость изменения требований к квалификации персонала, на уровень промышленной безопасности буровых станков, организацию процесса и качество пробуренных скважин. Предполагаемые изменения безопасности инфраструктуры и в целом окружающей среды при выборе технических решений не учитываются.



Рис. 2. Относительная важность показателей, учитываемых при выборе технических решений

Следует отметить, что компенсация негативного влияния факторов начинается на горных предприятиях, как правило, за счет внутренних резервов и в тот момент, когда становится ясно, что без осуществления перехода на новые параметры процесса бурения скважин дальнейшая производственная деятельность неэффективна и небезопасна.

Важно также отметить, что адаптация параметров буровых работ ведется с учетом одной какой-то определенной группы факторов, выбранных интуитивно специалистами. В результате такого субъективного подхода предприятия закладывают предпосылки увеличения затрат и повышения рисков аварийных ситуаций в перспективе. А далее для решения той же задачи вновь потребуются отвлечение сил предприятия. Такой подход является дополнительным источником психологической напряженности у работников предприятий. От того, какой подход применяется, зависит качество и надежность решения задачи.

Структура оценки и выбора технических решений

Оценка целесообразности выбора технических решений производится на основании порядка, указанного на рис.3.



Рис.3. Порядок обоснования выбора технических решений для адаптации буровых работ с учетом изменения горнотехнических условий

Согласно рис. 3 вначале выполняется анализ исходной геолого-маркшейдерской документации, в том числе планов и разрезов карьера; плана развития и текущего положения горных работ; текущего проекта разработки месторождения (технологической части).

Проводится изучение документации, регламентирующей БВР – типового проекта буровзрывных работ, проектов БВР выемочных блоков.

Изучается техническая документация на применяемые буровые станки и инструмент. Устанавливается среднесписочное количество буровых станков, сроки службы, модели, паспортные характеристики, режимы бурения.

Проводится ретроспективный анализ достигнутых технико-экономических показателей эксплуатации буровых станков и инструмента за несколько лет в различных по крепости и трещиноватости горных породах.

В результате выполненных действий устанавливаются исходные горнотехнические условия ведения буровых работ, влияющие организационные факторы и перечень горно-геологических и технических факторов, требующих экспериментального изучения на отдельных выемочных блоках.

Далее в объеме исследуемых блоков проводится инструментальное измерение параметров работы двигателей бурового станка [20] в различных по крепости и трещиноватости горных породах, увязанное с исследованием изменения состояния шарошечных долот. Выполняется изучение условий очистки скважин от продуктов разрушения.

В результате обработки полученных данных определяется информация об изменении во времени бурения скважин показателей процесса – осевого усилия, момента и

частоты вращения, мощности компрессора, длительности вспомогательных операций, скорости и энергоемкости бурения, трудности бурения.

Фактические данные об изменении показателей процесса бурения проходят многофакторный дисперсионный анализ.

В результате многофакторного дисперсионного анализа статистических характеристик определяются факторы, в наибольшей степени влияющие на снижение скорости и увеличение энергоемкости бурения в различных по крепости и трещиноватости горных породах. Учитывая установленную информацию о влиянии значимых факторов, определяется рациональный спектр адаптационных технических решений, компенсирующих факторы, в наибольшей степени снижающих эффективность буровых работ.

Для выбранных технических решений производится статическая (на данный момент) технико-экономическая оценка эффективности их применения. Подход основан на применении критерия, представляющего неравенство:

$$\Delta \mathcal{E} > 0$$

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{D} + \Delta \mathcal{Z}_3 + \Delta \mathcal{Z}_{\text{пб}} + \Delta \mathcal{Z}_{\text{вр}}, \quad (4)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – экономия затрат, руб/м; $\Delta \mathcal{D}$ – изменение дохода, получаемого от внедрения предлагаемого технического решения, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_3$ – изменение эксплуатационных затрат, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{пб}}$ – изменение затрат, связанных с повышением уровня промышленной безопасности, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{вр}}$ – изменение затрат, связанных с влиянием на качество дробления в смежном технологическом процессе, руб/м.

Для оценки внедрения технического решения – контроль процесса бурения и уточнение физико-механических и структурных характеристик массива горных пород принято неравенство, полученное на основе выражения [21]:

$$\Delta \mathcal{E} > 0$$

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{D} + \Delta \mathcal{Z}_{\text{ав}} + \Delta \mathcal{Z}_{\text{вр}}, \quad (5)$$

где $\Delta \mathcal{D}$ – изменение дохода, получаемого от эксплуатации бурового станка, оснащенного устройствами контроля, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_3$ – изменение эксплуатационных затрат, руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{ав}}$ – изменение затрат, связанных с возможными авариями либо затратами по предотвращению аварий (по результатам технического диагностирования), руб/м; $\Delta \mathcal{Z}_{\text{вр}}$ – изменение затрат, связанных с повышением точности соблюдения параметров бурения и их влиянием на качество дробления в последующем процессе, руб/м.

Изменение дохода, получаемого от эксплуатации бурового станка $\Delta \mathcal{D}$, определяется согласно выражению:

$$\Delta \mathcal{D} = \Delta C_6 Q, \quad (6)$$

где ΔC_6 – изменение себестоимости бурения, руб/м; Q – объем бурения скважин, м.

Для оценки внедрения технического решения – изменение способа бурения для конкретных условий ведения буровых работ, модифицируя выражение, приведенное в [22], получили критерий:

$$\Delta \mathcal{E} > 0$$

$$\Delta \mathcal{E} = \left[\left(\frac{603_{\text{п}}}{\vartheta_1 t_{\text{см}}} + \frac{S_{\text{д1}}}{L_{\text{д1}}} \right) - \left(\frac{603_{\text{п}}}{\vartheta_2 t_{\text{см}}} + \frac{S_{\text{д2}}}{L_{\text{д2}}} \right) + B_+ \right] Q, \quad (7)$$

где $3_{\text{п}}$ – условно-постоянные расходы на бурение скважин, руб; $t_{\text{см}}$ – продолжительность чистого бурения станками в смену, зависящая от организации работ, мин; ϑ_1 – фактическая скорость бурения до внедрения нового способа, м/ч; $S_{\text{д1}}$ – стоимость применяемых шарошечных долот, руб; $L_{\text{д1}}$ – стойкость применяемых шарошечных долот при рациональном режиме прежнего способа бурения, м; ϑ_2 – фактическая скорость бурения предлагаемым способом, м/ч; $S_{\text{д2}}$ – стоимость бурового инструмента для нового способа, руб; $L_{\text{д2}}$ – стойкость бурового инструмента при рациональном режиме нового способа бурения, м; B_+ – экономия затрат, связанная с повышением уровня безопасности бурения скважин, руб/м; Q – объем бурения скважин, м.

Для оценки внедрения технического решения – изменения конструкции бурового станка – предложен критерий:

$$\Delta \mathcal{E} > 0$$

$$\Delta \mathcal{E} = [(C_6 - C_H) + E(K_H - K_6) + \Delta B_+ + \Delta \mathcal{E}_{\text{серв}} \pm \mathcal{E}_{\text{доп}}] Q_{\text{годн}}, \quad (8)$$

где C_6 – себестоимость бурения базовой (применяемой) техникой, руб/м; C_H – себестоимость бурения станком новой модели, руб/м; K_H – удельные капитальные затраты для базовой (применяемой) буровой техники, руб/м; K_6 – удельные капитальные затраты для буровой техники новой модели, руб/м; E – нормативный коэффициент экономической эффективности; ΔB_+ – экономия затрат, связанная с повышением уровня безопасности бурения скважин, руб/м; $\Delta \mathcal{E}_{\text{серв}}$ – экономия затрат, связанная с улучшением сервисного обслуживания, руб/м; $\mathcal{E}_{\text{доп}}$ – дополнительная годовая экономия (или убытки), возникающие при изменении технологии буровзрывных работ при эксплуатации буровых станков новой модели, руб/м; зависит от полноты учета влияющих на экономику бурения факторов; $Q_{\text{годн}}$ – годовой объем буровых работ с применением буровых станков новой модели, м.

Себестоимость бурения базовой (применяемой) техникой C_6 определяется согласно [23]:

$$C_6 = \frac{C_{\text{мсб}}}{\Pi_{\text{сб}}} + \frac{C_{\text{д}}}{L_6}, \quad (9)$$

где $C_{\text{мсб}}$ – себестоимость машино-смены для применяемого бурового станка, руб; $\Pi_{\text{сб}}$ – сменная производительность применяемого бурового (базового) станка; $C_{\text{д}}$ – стоимость шарошечного долота, руб; L_6 – стойкость шарошечного долота при бурении взрывных скважин базовым (применяемым) буровым станком, м.

$$C_{\text{мсб}} = C_{\text{зпб}} + C_{\text{аб}} + C_{\text{эб}} + C_{\text{мб}} + C_{\text{вб}} + C_{\text{тб}}, \quad (10)$$

где $C_{\text{зпб}}$ – сменные затраты на заработную плату машинисту применяемого бурового станка, руб; $C_{\text{аб}}$ – сменные затраты на амортизационные отчисления, руб; $C_{\text{эб}}$ – сменные затраты на потребляемую энергию, руб; $C_{\text{мб}}$ – сменные затраты на вспомогательные материалы, используемые при бурении; $C_{\text{вб}}$ – сменные затраты на расход воды, используемый при бурении, руб; $C_{\text{тб}}$ – сменные затраты на текущие и капитальные ремонты применяемого (базового) бурового станка, руб.

$$C_H = \frac{C_{\text{мсн}}}{\Pi_{\text{сн}}} + \frac{C_{\text{д}}}{L_H}, \quad (11)$$

где $C_{\text{мсн}}$ – себестоимость машино-смены для бурового станка новой модели, руб; $\Pi_{\text{сн}}$ – сменная производительность бурового станка новой модели; $C_{\text{д}}$ – стоимость шарошечного долота, руб; L_H – стойкость шарошечного долота при бурении взрывных скважин буровым станком новой модели, м.

$$C_{\text{мсн}} = C_{\text{зпн}} + C_{\text{ан}} + C_{\text{эн}} + C_{\text{мн}} + C_{\text{вн}} + C_{\text{тн}}, \quad (12)$$

где $C_{\text{зпн}}$ – сменные затраты на заработную плату машинисту бурового станка новой модели, руб; $C_{\text{ан}}$ – сменные затраты на амортизационные отчисления, руб; $C_{\text{эн}}$ – сменные затраты на потребляемую энергию, руб; $C_{\text{мн}}$ – сменные затраты на вспомогательные материалы, используемые при бурении станком новой модели; $C_{\text{вн}}$ – сменные затраты на расход воды, используемый при бурении, руб; $C_{\text{тн}}$ – затраты на текущие и капитальные ремонты бурового станка новой модели, руб.

$$K_H = \frac{1,3K_{\text{балн}}}{Q_{\text{годн}}}, \quad (13)$$

где $K_{\text{балн}}$ – балансовая стоимость бурового станка новой модели, руб.:

$$K_{\text{балн}} = (1,12 \div 1,15) \Pi_{\text{н}}, \quad (14)$$

где $\Pi_{\text{н}}$ – цена бурового станка новой модели, руб,

$$K_6 = \frac{1,3K_{\text{балб}}}{Q_{\text{годн}}}, \quad (15)$$

где $K_{\text{балб}}$ – балансовая стоимость применяемого бурового станка, руб.

$$K_{\text{балб}} = (1,12 \div 1,15)C_6, \quad (16)$$

где C_6 – цена применяемого бурового станка, руб.

В последующем выбранные технические решения доводятся до полного соответствия условиям конкретного горного предприятия при условии соблюдения рациональных режимов и правил промышленной безопасности.

О перспективе дальнейших исследований

К настоящему времени в области шарошечного бурения взрывных скважин выполнен значительный объем исследований. Большинство из них проведено в годы интенсивного развития открытых горных работ – в 60 – 70-е годы XX века. Для различных условий отдельных горных предприятий установлены взаимосвязи и критерии эффективности бурения, зависящие от основных факторов процесса. До сих пор не создано единой теории бурения скважин. Отсутствие надежных методик учета прочих факторов, закономерностей изменения их во времени часто приводит к ошибкам при планировании буровых работ, повышая риски невыполнения на горном предприятии производственной программы. Адаптация технологии бурения решается опытным путем, интуитивно. В результате такого подхода создаются предпосылки увеличения затрат и повышения рисков возникновения аварийных ситуаций при ведении горных работ.

Учитывая современное развитие цифровых технологий, для обоснования оптимальных способов и средств адаптации параметров буровых работ к имеющимся и перспективным горно-геологическим и горнотехническим условиям становится возможным выполнять предпроектную проверку буровой техники и инструмента, производить на горных предприятиях всесторонний учет факторов бурения, влияющих на действующую буровую технику, а также устанавливать закономерности изменения факторов во времени и в зависимости от свойств массива горных пород. Поэтому основное перспективное направление развития исследований по Государственному заданию в 2024 году и последующих периодах – это создание методик и программ для оценки эффективности и безопасности применения буровой техники в изменяющихся условиях горного предприятия на основе многокритериальной оценки планируемых технических решений для совершенствования технологии и техники буровых работ, прогноза эффективности и безопасности проектируемой буровой техники и инструмента в перспективных условиях разработки месторождения полезных ископаемых. Целесообразно продолжить исследования закономерностей изменения технического состояния буровых станков в различных условиях применения и создания цифровых моделей для прогнозирования уровня изменения показателей и параметров состояния буровой техники и рисков аварийных ситуаций с учетом многочисленных факторов в условиях открытой добычи месторождений твердых полезных ископаемых.

Выводы

1. В результате исследования систематизированы современные технические решения для адаптации параметров производства буровых работ на карьерах к сложившимся новым горно-геологическим и другим условиям ведения работ. Дальнейшее совершенствование процессов бурения взрывных скважин представляется в уточнении прочностных и структурных свойств массива горных пород и выработке на этой основе технических решений, позволяющих оптимизировать материальные затраты при производстве технологических взрывов. Эффективность и безопасность реализации изменений в буровых работах определяется техническими решениями, связанными с получением информации о состоянии горных пород в естественном залегании, изменением способа бурения, конструкции бурового станка и инструмента. Эти направления исследования имеют значительные резервы для развития буровых работ и заслуживают внимания в первую очередь.

2. Разработан методический подход к оценке и выбору эффективных технических решений в процессе совершенствования буровых работ, отличающийся поэтапным изучением факторов, управляющих процессами выбора адаптационных решений. Согласно установленной информации о влиянии значимых факторов, выявляются рациональные действия с последующей оценкой их экономической целесообразности применения с учетом возможностей горного предприятия. Дальнейшее развитие исследований необходимо вести по пути создания методик, обеспечивающих повышение уровня интерпретации информации, получаемой в процессе бурения взрывных скважин, для установления более точных регрессионных зависимостей технических показателей процесса бурения взрывных скважин от значимых горнотехнических и горно-геологических факторов. Это позволит точнее определять технические решения для совершенствования технологии и техники буровых работ.

Список литературы

1. Анистратов К.Ю., Донченко Т.В., Опанасенко П.И., Строгий И.Б., 2018. Анализ рынка буровых станков для открытых горных работ горнодобывающих предприятий России. *Горная промышленность*, № 2, С. 84 – 89. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-2-138-84-89>
2. Реготунов А.С., Кутуев В.А., Жариков С.Н., 2021. Систематизация факторов, предопределяющих переходные процессы в буровзрывных работах. *Проблемы недропользования*, №4, С. 62 – 72. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.04.062>
3. Реготунов А.С., Жариков С.Н., Сухов Р.И., Кутуев В.А., 2021. Оценка современного состояния буровзрывных работ и необходимость осуществления переходных процессов на некоторых крупных горных предприятиях Урала и Сибири. *Проблемы недропользования*, № 2, С. 52 – 62. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.052>
4. Яковлев В.Л., 2019. *Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов*. Екатеринбург: УрО РАН, 284 с.
5. Сухов Р.И., Шахматов Д.С., Паньков И.В. и др., 1991. Об удельной энергоемкости разрушения горных пород при бурении взрывных скважин. *Горный журнал*, № 3, С. 26 – 28.
6. Лубенец Ю.Ю., 2004. Опыт эксплуатации буровых долот на Костомукшском ГОКе. *Горный журнал*, № 5, С. 42 – 43.
7. Сухов Р.И., 1996. Результаты испытаний отечественных и зарубежных шарошечных долот, и перспективы создания высокостойкого бурового инструмента. *Международная конф. по открытым горным работам*, II (М., 19 -22.05.96): сб. докл. Москва, С. 196 – 197.
8. Сухов Р.И., 1995. Перспективы оснащения открытых горных работ буровыми станками большого диаметра. *Горный журнал*, № С. 25 – 27.
9. Бовин К.А., 2019. Анализ эксплуатации техники бурения взрывных скважин на карьерах Красноярского края и Хакасии. URL: http://www.gornoe-delo.ru/jgd/2018/2018_1.pdf (дата обращения 22.09.2023).
10. Шигин А.О., 2014. Повышение ресурса шарошечного бурового инструмента за счет оптимизации режимных параметров при бурении сложноструктурных массивов горных пород. *Вестник ИрГТУ*, №10 (93), С. 59 – 67.
11. Загривный Э.А., 1996. *Динамические модели и устойчивость подсистемы «исполнительный орган – забой» горной машины*: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный институт, 39 с.
12. Буткин В.Д., Гилев А.В. и др., 2010. *Выбор и рациональная эксплуатация буровых инструментов и станков на карьерах*. Красноярск: СФУ, 236 с.

13. Токаренко А.В., Гуленков Э.В., 2013. Оценка эффективности работы буровых станков на карьерах Олимпиадинского ГОКа. *Горный журнал*, № 3, С. 76 – 77.
14. Зенин В. В., 2007. Опыт эксплуатации буровых станков производства ОАО «Рудгормаш», *Уголь*, №10 (978), С. 50 – 54.
15. Лель Ю.И., 2011. Эффективность эксплуатации новых моделей буровых станков на карьерах Урала. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 199 – 206.
16. Коваленко В.А., 2017. Автоматизированная подготовка производства на карьерах. Программно-технический комплекс «Blast Maker». *Добывающая промышленность*, № 3, С. 50 – 53.
17. Шигин А.О., Гилев А.В., Шигина А.А., 2017. Автоматизация шарошечного бурения взрывных скважин на карьерах. *Горный журнал*, № 2, С. 79 – 82.
18. Контеев О.Ю., Худяков А.Г., Болкисева Ю.В., Болкисев В.С., 2009. Безопасность эксплуатации шарошечных карьерных буровых станков с истекшим сроком службы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 10, С. 165 – 169.
19. Реготунов А.С., Меньшиков П.В., Жариков С.Н., Кутуев В.А., 2022. Современные технические решения для адаптации параметров взрывного разрушения горных пород на карьерах. *Проблемы недропользования*, № 3, С. 114 – 127. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.114>
20. Сухов Р.И., Реготунов А.С., Гращенко Д.А., 2019. Развитие метода получения информации о состоянии массива горных пород в процессе бурения технологических скважин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S37, С. 446 – 454. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-446-454>
21. Анистратов К.Ю., Градусов М.С., Стремилев В.Я., Тетерин М.В., 2007. Экономико-математическая модель функционирования предприятия технологического карьерного транспорта. *Горная промышленность*, № 1, С. 20 – 26.
22. Хмызников К.П., Лыков Ю.В., 2000. *Механическое оборудование карьеров. Буровые станки*. Учеб. пособие. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 63 с.
23. Крюков Г.М., 2004. *Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Часть II. Разрушение горных пород при бурении*. Москва: Изд-во МГГУ, 106 с.

References

1. Anistratov K.Yu., Donchenko T.V., Opanasenko P.I., Strogii I.B., 2018. Analiz rynka burovyykh stankov dlya otkrytykh gornyykh rabot gornodobyvayushchikh predpriyatii Rossii [Market analysis of drilling rigs for open-pit mining operations of mining enterprises in Russia]. *Gornaya promyshlennost'*, № 2, P. 84 – 89. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2018-2-138-84-89>
2. Regotunov A.S., Kutuev V.A., Zharikov S.N., 2021. Sistematizatsiya faktorov, predopredelyayushchikh perekhodnye protsessy v burovzryvnykh rabotakh [Systematization of factors determining transients in drilling and blasting operations]. *Problemy nedropol'zovaniya*, №4, P. 62 – 72. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.04.062>
3. Regotunov A.S., Zharikov S.N., Sukhov R.I., Kutuev V.A., 2021. Otsenka sovremennogo sostoyaniya burovzryvnykh rabot i neobkhodimost' osushchestvleniya perekhodnykh protsessov na nekotorykh krupnykh gornyykh predpriyatiyakh Urala i Sibiri [Assessment of the current state of drilling and blasting operations and the need for transition processes at some large mining enterprises of the Urals and Siberia]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 2, P. 52 – 62. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2021.02.052>
4. Yakovlev V.L., 2019. Issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov [Study of transients as a new direction in the development of the methodology of integrated development of georesources]. Ekaterinburg: UrO RAN, 284 p.

5. Sukhov R.I., Shakhmatov D.S., Pan'kov I.V. i dr., 1991. Ob udel'noi energoemkosti razrusheniya gornyx porod pri burenii vzryvnykh skvazhin [On the specific energy intensity of rock destruction during drilling of blast wells]. Gornyi zhurnal, № 3, P. 26 – 28.
6. Lubenets Yu.Yu., 2004. Opyt ekspluatatsii burovnykh dolot na Kostomukshskom GOKe [Experience in the operation of drilling bits at the Kostomuksha GOK]. Gornyi zhurnal, № 5, P. 42 – 43.
7. Sukhov R.I., 1996. Rezul'taty ispytaniy otechestvennykh i zarubezhnykh sharoshechnykh dolot, i perspektivy sozdaniya vysokostoikogo burovogo instrumenta [Test results of domestic and foreign roller bits, and the prospects for creating a highly resistant drilling tool]. Mezhdunarodnaya konf. po otkrytym gornym rabotam, II (M., 19 -22.05.96): sb. dokl. Moscow, P. 196 – 197.
8. Sukhov R.I., 1995. Perspektivy osnashcheniya otkrytykh gornyx rabot burovymi stankami bol'shogo diametra [Prospects for equipping open-pit mining operations with large-diameter drilling rigs]. Gornyi zhurnal, № P. 25 – 27.
9. Bovin K.A., 2019. Analiz ekspluatatsii tekhniki bureniya vzryvnykh skvazhin na kar'erakh Krasnoyarskogo kraya i Khakasii [Analysis of the operation of explosive well drilling techniques in the quarries of the Krasnoyarsk Territory and Khakassia [Electronic resource]: an article in a scientific and technical electronic journal]. URL: http://www.gornoe-delo.ru/jgd/2018/2018_1.pdf (data obrashcheniya 22.09.2023).
10. Shigin A.O., 2014. Povyshenie resursa sharoshechnogo burovogo instrumenta za schet optimizatsii rezhimnykh parametrov pri burenii slozhnostrukturnykh massivov gornyx porod [Increasing the life of a spherical drilling tool by optimizing the operating parameters when drilling complex-structured rock massifs]. Vestnik IrGTU, №10 (93), P. 59 – 67.
11. Zagrivnyi E.A., 1996. Dinamicheskie modeli i ustoichivost' podsistemy "ispolnitel'nyi organ – zaboii" gornoj mashiny: Avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Dynamic models and stability of the subsystem "executive body – face" of a mining machine: Abstract of the dissertation of the Doctor of Technical Sciences]. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskii gornyi institut, 39 p.
12. Butkin V.D., Gilev A.V. i dr., 2010. Vybor i ratsional'naya ekspluatatsiya burovnykh instrumentov i stankov na kar'erakh [Selection and rational operation of drilling tools and machines in quarries]. Krasnoyarsk: SFU, 236 p.
13. Tokarenko A.V., Gulenkov E.V., 2013. Otsenka effektivnosti raboty burovnykh stankov na kar'erakh Olimpiadinskogo GOKa [Evaluation of the efficiency of drilling rigs in the quarries of the Olympiadinsky GOK]. Gornyi zhurnal, № 3, P. 76 – 77.
14. Zenin V. V., 2007. Opyt ekspluatatsii burovnykh stankov proizvodstva OAO "Rudgormash" [Experience in the operation of drilling rigs manufactured by JSC «Rudgormash»], Ugol', №10 (978), P. 50 – 54.
15. Lel' Yu.I., 2011. Effektivnost' ekspluatatsii novykh modelei burovnykh stankov na kar'erakh Urala [Efficiency of operation of new models of drilling rigs in the quarries of the Urals]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 6, P. 199 – 206.
16. Kovalenko V.A., 2017. Avtomatizirovannaya podgotovka proizvodstva na kar'erakh. Programmno-tekhnicheskii kompleks "Blast Maker"[Automated production preparation at quarries. Software and hardware complex "Blast Maker"]. Dobyvayushchaya promyshlennost', № 3, S. 50 – 53.
17. Shigin A.O., Gilev A.V., Shigina A.A., 2017. Avtomatizatsiya sharoshechnogo bureniya vzryvnykh skvazhin na kar'erakh [Automation of ball drilling of blast wells in quarries]. Gornyi zhurnal, № 2, P. 79 – 82.
18. Konteev O.Yu., Khudyakov A.G., Bolkiseva Yu.V., Bolkisev V.S., 2009. Bezopasnost' ekspluatatsii sharoshechnykh kar'ernykh burovnykh stankov s istekshim srokom sluzhby [Safety of operation of long-life roller pit drilling rigs]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 10, P. 165 – 169.

19. Regotunov A.S., Men'shikov P.V., Zharikov S.N., Kutuev V.A., 2022. Sovremennye tekhnicheskie resheniya dlya adaptatsii parametrov vzryvnogo razrusheniya gornykh porod na kar'erakh [Modern technical solutions for adapting the parameters of explosive rock destruction in quarries]. Problemy nedropol'zovaniya, № 3, P. 114 – 127. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2022.03.114>
20. Sukhov R.I., Regotunov A.S., Grashchenko D.A., 2019. Razvitie metoda polucheniya informatsii o sostoyanii massiva gornykh porod v protsesse bureniya tekhnologicheskikh skvazhin [Development of a method for obtaining information about the state of a rock mass in the process of drilling technological wells]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № S37, P. 446 – 454. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-11-37-446-454>
21. Anistratov K.Yu., Gradusov M.S., Stremilov V.Ya., Teterin M.V., 2007. Ekonomiko-matematicheskaya model' funktsionirovaniya predpriyatiya tekhnologicheskogo kar'ernogo transporta [An economic and mathematical model of the functioning of a technological quarry transport enterprise]. Gornaya promyshlennost', № 1, P. 20 – 26.
22. Khmyznikov K.P., Lykov Yu.V., 2000. Mekhanicheskoe oborudovanie kar'erov. Burovye stanki [Mechanical equipment of quarries. Drilling rigs]. Ucheb. posobie. Sankt-Peterburg: Izd-vo SPBGU, 63 p.
23. Kryukov G.M., 2004. Fizika razrusheniya gornykh porod pri burenii i vzryvanii. Chast' II. Razrushenie gornykh porod pri burenii [Physics of rock destruction during drilling and blasting. Part II. Destruction of rocks during drilling]. Moscow: Izd-vo MGGU, 106 p.



В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

УДК 550.82:551:583

Зубков Альберт Васильевич

доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

КЛИМАТИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ НА ЗЕМЛЕ, ВЫЗВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ*

Аннотация**:

Изучение климатических и геомеханических проблем на Земле, происходящих в литосфере, даёт возможность исследовать изменения космической погоды, т.е. физического состояния космоса. У человечества есть возможность сделать это не только путём созерцания с помощью средств наблюдения, но и «потрогать руками», проводя многочисленные эксперименты на земле и под землёй, принимая во внимание то, что изменение физического состояния космоса тесно связано с деформацией Земли, т.е. деформацией массива горных пород в литосфере, которую научились фиксировать, отфильтровывая многочисленные погрешности средств измерения. Это обосновано в цикле работ, проведённых и опубликованных в 21 веке, где показано, что циклически деформируется не только массив горных пород, но и всё на макро- и микроуровне от элементарных частиц, материалов, металлов, жидкостей и в целом планет и звёзд.

Объединение знаний астрофизиков, физиков земли, геомехаников, планетологов, климатологов и специалистов других наук позволило построить гипотезу о жизни Земли и Вселенной, проследив изменение климатической и геомеханической обстановки за 700 млн лет, которое сопровождается полным или частичным вымиранием фауны: 2 периода по 240 – 250 млн лет со средней температурой $t=+(1\div 12)^{\circ}\text{C}$ и 3 периода по 75 млн лет при $t=-(1\div 8)^{\circ}\text{C}$, последний из которых начался 2 млн лет назад, идёт сейчас, но в нём каждые 100 – 150 тыс. лет просматриваются периоды по 10 – 20 тыс. лет $t=\pm(1\div 2)^{\circ}\text{C}$. Это происходило последние 14 тыс. лет, но последствием наблюдаемых в этот период отклонений температуры, являются малые ледниковые периоды, вулканическая деятельность с засухами, которые привели к гибели миллионов людей. Создающаяся геомеханическая опасность в эти периоды вызывает гибель тысяч человек. Восстанавливают фауну на Земле наши высокоразвитые братья по разуму из других областей космоса.

Ключевые слова: климат, геомеханика, массив горных пород, литосфера, глобальные катастрофы и жизнь на Земле, климатические и геомеханические прогнозы на десятки миллионов лет.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.105

Zubkov Albert V.

Doctor of Engineering Sciences,
Chief Researcher,
Laboratory of geodynamics and mining pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.,
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

CLIMATE AND GEOMECHANICAL PROBLEMS ON EARTH CAUSED BY SPACE WEATHER CHANGES

Abstract:

The study of climatic and geomechanical problems on Earth, occurring in the lithosphere, makes it possible to study changes in the cosmic nature, i.e. the physical state of space. Humanity has the opportunity to do this not only through contemplation with the help of observation tools, but also “to touch it with hands”, conducting numerous experiments on earth and in the subsoil, taking into account the fact that the change in the physical state of space is closely related to the deformation of the Earth, i.e. deformation of a rock mass in the lithosphere, which we learned to fix by filtering out numerous errors at measuring instruments. This is justified in the cycle of works conducted and published in the 21st century, in them it is shown that not only an array of rocks is cyclically deformed, but everything is deformed at the macro and micro levels: elementary particles, materials, metals, liquids and, in general, planets and stars.

Combining the knowledge of astrophysicists, earth physicists, geomechanics, planetary scientists, climatologists and specialists in other sciences made it possible to construct a hypothesis about the life of the Earth and the Universe, tracing the change in the climatic and geomechanical situation over 700 million years, which is accompanied by complete or partial extinction of the fauna: 2 periods of 240-250 million years with an average temperature $t=+(1\div 12)^{\circ}\text{C}$ and 3 periods of 75 million years at $t=-(1\div 8)^{\circ}\text{C}$, the last of which began 2 million years ago, it continues now, but every 100-150 thousand years there are periods of 10-20 thousand years $t=\pm(1\div 2)^{\circ}\text{C}$. This has been happening for the last 14 thousand years, but the consequence of the temperature deviations observed during this period is the Little Ice Ages, volcanic activity with droughts, which led to the death of millions of people. The emerging geomechanical hazard during these periods causes the death of thousands of people. Our highly developed brothers in mind from other areas of space are restoring the fauna on Earth.

Key words: climate, geomechanics, rock mass, lithosphere, global catastrophes and life on Earth, climatic and geomechanical forecasts for tens of millions of years.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР, тема № (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1

** Статья публикуется в порядке обсуждения. Мнение редакции может не совпадать с позицией автора.

Введение

При решении многочисленных проблем в недропользовании геомеханики руководствуются программой ФНИ 136 «Катастрофические эндогенные и экзогенные процессы, включая экстремальные изменения космической погоды: проблемы прогноза и снижения уровня негативных последствий», т.е. предотвращение разрушения массива горных пород и горных конструкций в статической и динамической форме, когда концентрация природных напряжений в массиве горных пород превышает прочностные характеристики этих конструкций.

Предлагаемый материал является завершением цикла работ, отражающих переменное физическое состояние Земли и космоса, а также его влияние на жизнь человечества. Этот цикл работ включает:

1. Закон формирования природного напряженного состояния земной коры [1].
2. Пульсации во Вселенной и проявления их на Земле [2].
3. Относительная деформация материи на макро- и микроуровне в условиях изменения космической погоды [3 – 4].

Вполне естественно возникает вопрос о том, какие физические явления в нашем случае включает понятие «космическая погода» и какие климатические и геомеханические проблемы они вызывают.

Экспериментальные исследования

Большой объем исследований был проведен по изучению изменения активности Солнца [5] и относительной деформации массива горных пород [6].

Ввиду почти идеального совпадения графиков S_0 (рис.1) и $\epsilon_{МП}$ (рис. 2) в дальнейшем катастрофические изменения климата на Земле (поверхность) и ее деформацию можно будет прогнозировать на период 2022 – 2100 гг. по аналогии с климатом на период с 1614 по 1700 г. (табл. 1); принимаем во внимание негативные явления природы в Америке, Европе, Азии и конкретно в России (табл. 2).

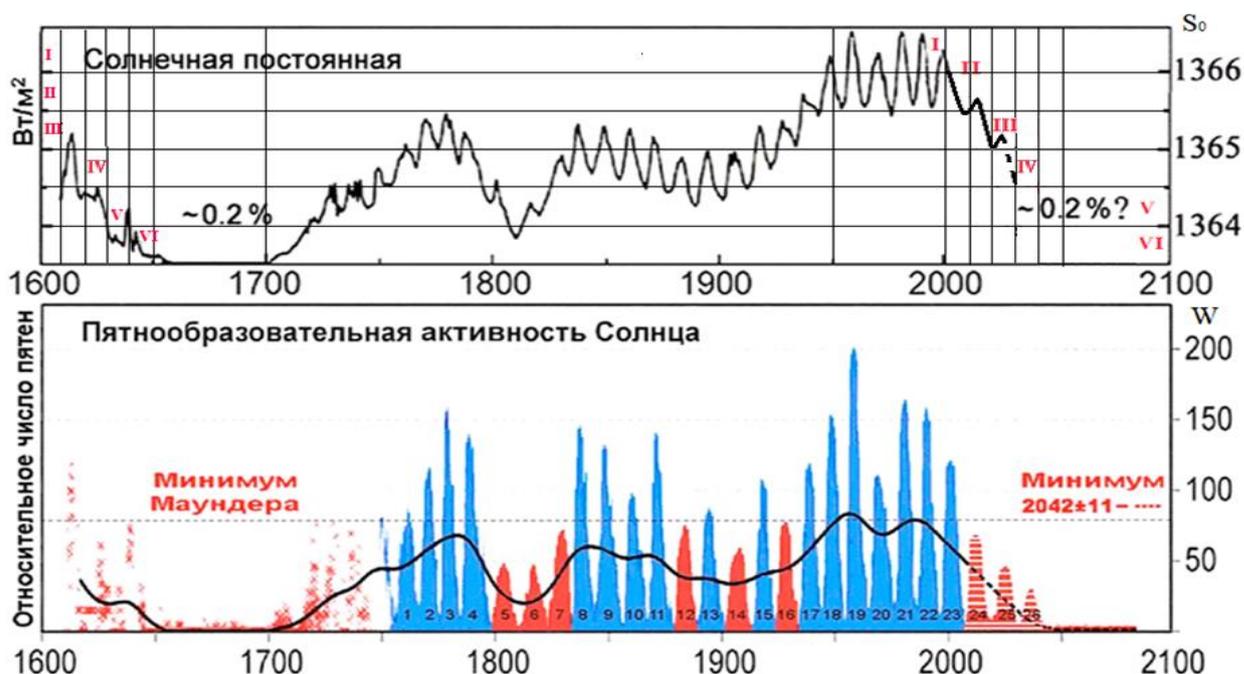


Рис. 1. Совмещенный график циклов солнечной активности W и солнечной постоянной S_0 за 500 лет (Абдусаматов, 2013)

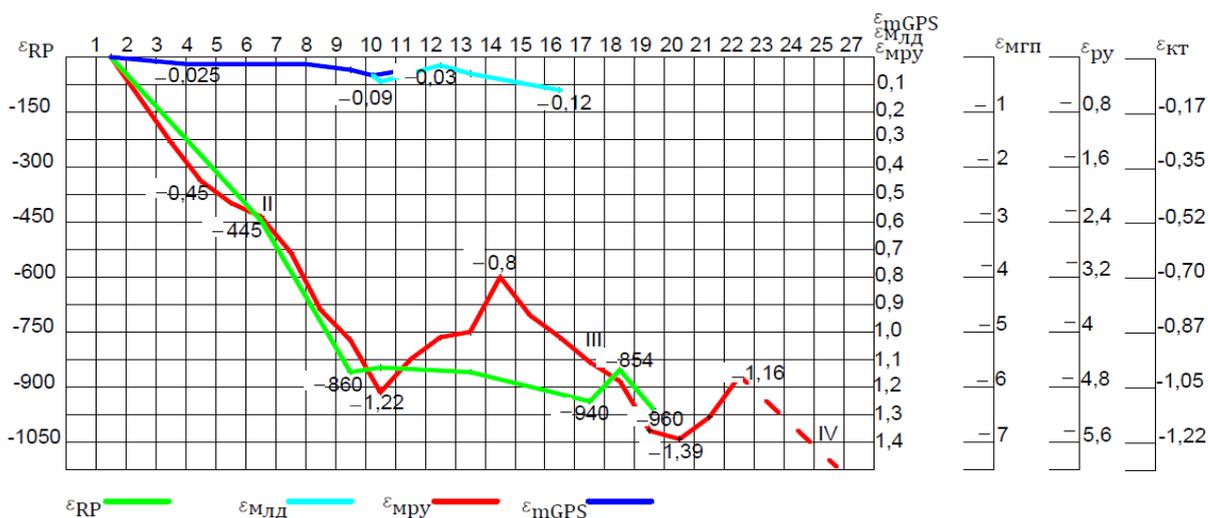


Рис.2. Результаты измерения относительной деформации:
 εМГП – массива горных пород, протона εRP и измерителей:
 εру – маркшейдерской рулетки, εКТ – кварцевой трубки ε*10-4,
 при использовании GPS – εmGPS, лазерного дальномера εМЛД, рулетки εМРУ

Таблица 1

Ступени сжатия материи

Ступени сжатия материи	Начало ступеней		Max σ _{Аф} , ε _{Аф}	
	Солнце	Земля	Солнце	Земля
I	-	1990	-	1997
II	-	2002	-	2010
III	-	2014	1610	2021
IV	1614	≈2024	1624	2033±1
V	1626	≈2036	1637	2046±1
VI	1640	≈2050	1650	2059±1

Примечание: σ_{Аф}, ε_{Аф} – астрофизическая составляющая напряжения и относительная деформация массива горных пород

Таблица 2

Летопись необычных явлений природы (Борисенков Е.П., 1988 г.)

1601 – 1603	В Москве от голода погибло 120 тыс. чел., вымерло 1/3 Царства Московского.
1619	Сильное землетрясение – Польша, Прибалтика, Русь.
1660 – 1670	Холод по всей Руси.
1690	От голода погибло 1/3 населения.
1700	Море покрылось льдом: Венеция, Англия, Франция, Северная Америка.
1721	Пётр I издал указ о реквизиции хлеба у богатых.
1730 – 1731	Засуха и холод.
1747	Засуха и саранча.

Окончание табл. 2

1765	От засухи пострадало 46 уездов и вся Эстляндия. Голод во Франции до 1775 г. – Французская революция.
1770 – 1773	Эпидемия моровой язвы из Европы на Русь. В Москве умерло 56672 чел.
1785 – 1786	Стужа, холод весной – хлеба уничтожены. Вся рожь замерзла – голод на Украине, в Туле, Рязани, Воронеже, Смоленске.
1791 – 1799	Засуха
XVIII век	На Руси в XVIII веке было 68 голодных лет 1721 – 1724, 1732 – 1736, 1747 – 1750, 1757 – 1759, 1766 – 1767, 1780 – 1781, 1785 – 1789.
1801	Засуха
1802	Сильное землетрясение от Константинополя до Санкт-Петербурга.
1832 – 1833	Засуха 20 мес. Ни одной капли дождя во всей России от Чёрного и Каспийского морей до Пскова.
1846	Голод во Франции и Финляндии Голод во всей Европе Из 50 лет 48 были голодными, 1/3 повсеместно.
1853 – 1854	В Париже замёрзла Сена. 16 ноября «Балаклавская буря» от Алжира до Керчи и Курска.
1860	Неурожай, бури, град.
1874	Европа и Россия – самый холодный май за 160 лет.
1878 – 1879	Потепление – открылся сквозной морской путь.

Результаты

Есть точные данные относительной концентрации радиоуглерода по геомагнитным данным и по анализу колец деревьев за 17000 лет [7] (рис. 3), где видно, что в наступившем тысячелетии человечество закончит противостоять геомеханической опасности, которая ознаменовалась катастрофическими землетрясениями [8]:

– 1201 г. Ближний Восток и Восточное Средиземноморье (погибло более 1 млн человек при общей численности на Земле менее 400 млн чел.).

– 1619 г. Разрушились города в России, Польше и Прибалтике.

– 1802 г. Разрушились города от Константинополя до Румынии, Москвы и Санкт-Петербурга.

Отмечены общеизвестные грандиозные извержения вулканов:

– 1883 г. Вулкан Кракатау в юго-восточной Азии. Мощность взрыва соответствовала 100 – 200 мегатонн ВВ. Ударная волна обогнула Землю 4 раза.

– 1815 г. Вулкан Тамбора в юго-восточной Азии – взрыв в 3 раза мощнее, чем от Кракатау. Снег в Европе – Америке и голод.

– 1600 г. до н.э. Вулкан Санторин, взрыв в восточном Средиземноморье сопоставим со взрывом вулкана Тамбора.

После цикла геомеханической (геодинамической) опасности на последующие тысячелетия наступит климатическая опасность или будет и то и другое.

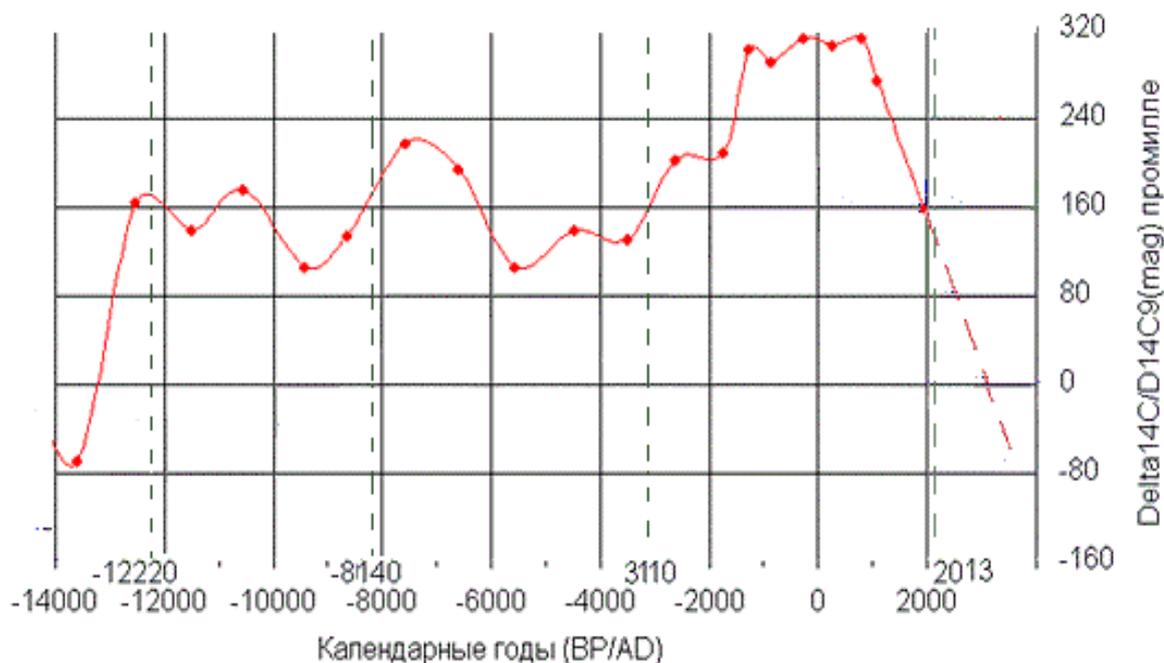


Рис. 3. Наложения графика радиоуглеродного датирования по геомагнитным данным на циклы рода человеческого

Вполне допустимо, что началом этого цикла можно считать 2013 г. н.э. – (начало III ступени сжатия МГП, за которой последуют IV, V и VI ступени), начнётся малый ледниковый период, и он продолжится более грандиозным похолоданием на десятки тысяч лет. При этом средняя температура на Земле с нуля понизится до -10°C (рис. 4), то есть наступает очередной ледниковый период, подобный предыдущим, когда вымерли мамонты и 5 из 6 древних видов человечества – остались только *Homo sapiens*.

Потоп. При сжатии материи ложе океана сжимается более интенсивно, чем вода, поэтому вода будет затапливать сушу, подниматься на десятки метров.

Такая ситуация наблюдается с циклической регулярностью на протяжении сотен млн лет (табл. 3). Но в последние 14 тыс. лет человечество жило в относительно благоприятных условиях (рис. 5).



Рис. 4. График вариаций температуры на Земле и концентрации углекислого газа в ее атмосфере в течение последних 420 тыс. лет

Таблица 3

Геологические, климатические и биологические катастрофы на Земле

Условный сектор космоса	Геологическое время, млн лет (период)	Территория	Геологические последствия		Климат	Вымирание видов фауны
			Излияние магм			
			Объем, млн км ³	Площадь, млн км ²		
А	700 д.н.э. – 710 д.н.э. Рифей	Вся Земля	-	-	Рифейское Оледенение	100 %
А	440 – 450 д.н.э. Ордовикско-силурийский	Вся Земля	-	-	Палеозойское Вулканы	60 %
Д	372 д.н.э. Девонский	Океан	-	-	Позднедевонское Вулканы	-
С	308 д.н.э. Каменноугольный	-	-	-	Оледенение	-
В	280 – 251 д.н.э.	Азия	1-4	2	Вулканы	55 %
А	200 – 205 д.н.э. Юрский	Центрально-атлантическая провинция	-	-	Вулканы	38 %
Д	128 – 138 д.н.э. Меловой	Южная Америка, Африка	1,4	2,3	Вулканы	Массовое
С	65 д.н.э. Третичный	Плато Декан, Индостан	0,5	1,5	Кайнозойское Вулканы	38 %
В	0,1 – 0,01 д.н.э. Четвертичный	Северная и южная части Земли	-	-	Четвертичное Оледенение	В т.ч. мамонты и 5 из 6 древних видов Ното
А	64 н.э.	Вся Земля	-	-	Очередное великое оледенение	

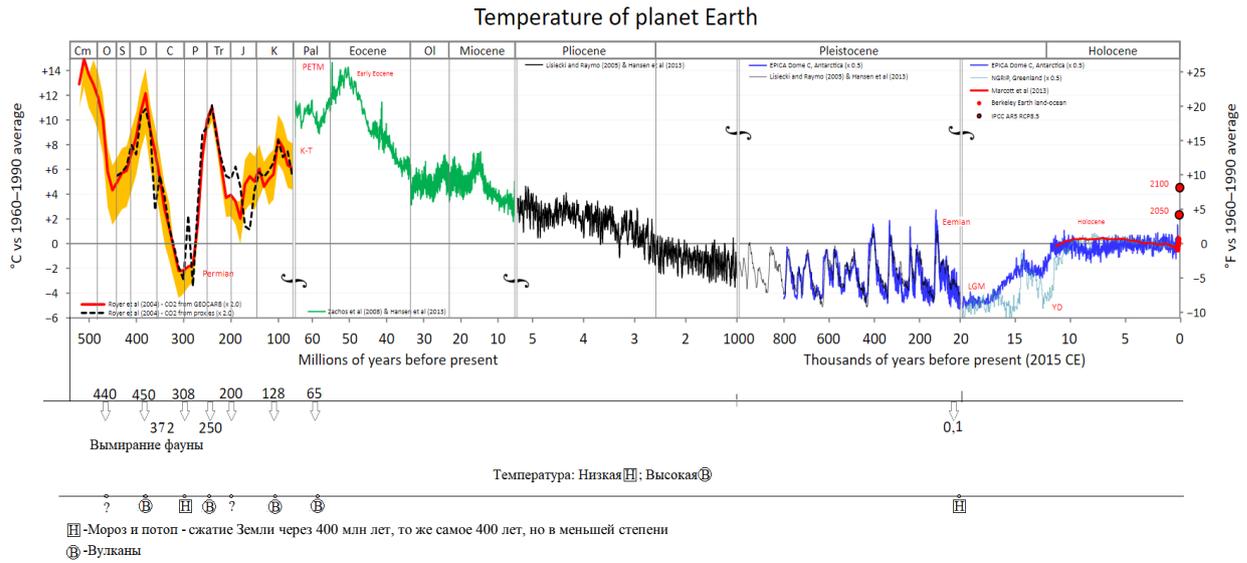


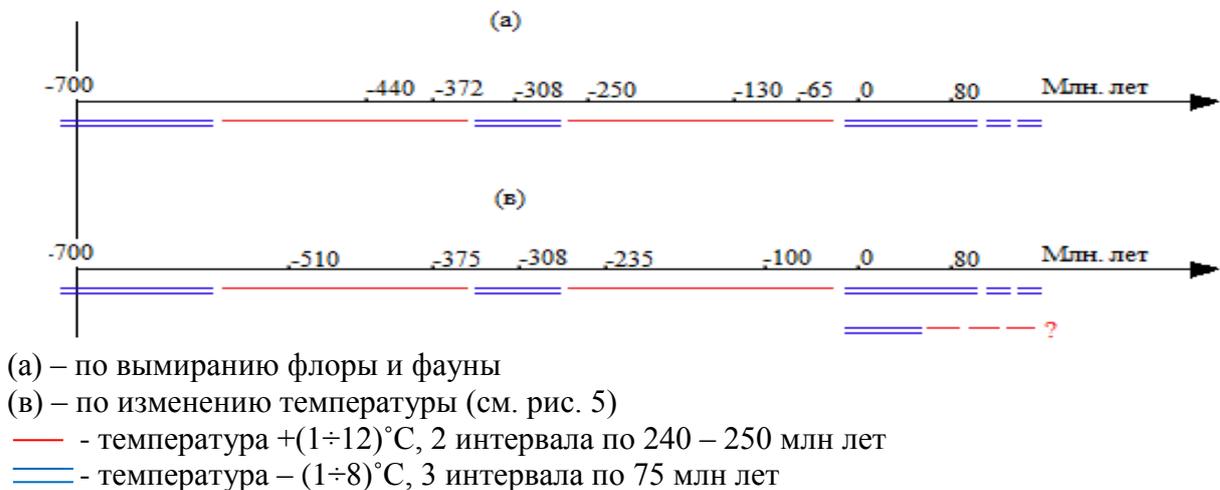
Рис. 5. Температура на планете Земля

Климатические аномалии с отрицательными средними температурами на Земле начались 3 млн лет назад и еще далеки до своего завершения.

О глобальных климатических процессах на Земле можно судить, отслеживая ее деформацию при использовании нейтринных деформометров, пропуская пучок нейтрино через массив Земли на базах измерения сотни и тысячи километров [8].

Естественно, необходимы дополнительные специальные исследования на существующих нейтринных полигонах MINOS (США), OPERA (Европа), T2K (Япония) и вновь создаваемых для повышения точности экспериментов, так как эта методика очень сложная и до конца теоретически и экспериментально не доведенная, но самая оптимальная. Она позволит на уже имеющемся уникальном оборудовании получать оперативную информацию о деформации и средней температуре Земли, используя корреляционные связи между этими характеристиками. Для этого пучки нейтрино пропускают по хорде через литосферу на базах 700 – 800 км и до 3000 км (проект), проникая на глубину от 20 до 180 км (проект).

При анализе результатов на рис. 5 был получен прогноз циклического изменения средней температуры на Земле за 700 млн лет до н.э. и 50 млн лет н.э. (рис. 6).



- (а) – по вымиранию флоры и фауны
- (в) – по изменению температуры (см. рис. 5)
- - температура $+(1\div 12)^\circ\text{C}$, 2 интервала по 240 – 250 млн лет
- - температура $-(1\div 8)^\circ\text{C}$, 3 интервала по 75 млн лет

Рис. 6. Температуры на Земле за 750 млн лет

Согласно предполагаемой гипотезе, аномальные климатические явления на Земле, связанные с повышением или понижением температуры, происходят при прохождении Солнечной системы через пылегазовые облака в космосе, которые включают метеориты, астероиды, кометы, малые планеты, воду и т.д. В результате происходит снижение поступления энергии от Солнца.

При периоде обращения Солнечной системы вокруг центра галактики за 250 млн лет это явление происходит следующим образом. Солнечная система и облако движутся на одной орбите, но Солнечная система быстрее, она догоняет облако, проходит через него, уходит вперёд и снова догоняет, примерно через 330 – 390 млн лет.

Но есть одна особенность. Плоскость, по которой движутся планеты солнечной системы и поле астероидов Койпера, перпендикулярно траектории движения Солнца. В результате это движение солнечной системы (СС) в туманности подобно движению проходческого щита в массиве горных пород, т.е. СС выгрызает себе тоннель в туманности диаметром десятки млн км.

Вполне возможно, что за 700 млн лет «облако» стало менее плотным в результате этого процесса консолидации «материала» и образования молодых планет и даже звезд и превратилось из плотного кучевого в перистое. Поэтому в настоящее время вместо ожидаемого катастрофического ледникового периода мы наблюдаем череду более мелких продолжительностью 80 – 120 тыс. лет, что вселяет надежду на более благоприятные условия прохождения очередной «волны» похолодания, и человечество должно быть соответственно к этому научно и технически подготовлено.

При циклическом изменении температуры на Земле наблюдается еще одна фундаментальная особенность. Перед наступлением следующего температурного режима на Земле появляются многочисленные и разнообразные представители фауны, точно соответствующие этому режиму, а при его изменении они вымирают – раньше полностью, а с приближением к нашему времени – частично:

- В Пермский период низких температур 300 млн лет до н.э. вымерли представители фауны весом в несколько тонн, пятипалые, ходячие на 4-х лапах. [9 – 16].
- В Триасовый, Юрский и Меловой периоды, когда было тепло, вымирали животные весом до десятков тонн, четырехпалые, размножающиеся откладыванием яиц.
- В Плейстоцене и Голоцене температура достигала -10°C , и вымирали уже млекопитающие (эпоха мамонтов и разумных людей).

Поэтому заселение планеты после вымирания фауны не происходило естественными путями, а являлось делом наших высокоразвитых соседей по космосу, и происходило это в течение более 500 млн лет.

После прохождения опасного участка космоса Природа восстанавливает благоприятные условия для жизни на Земле. Восстанавливается флора и фауна в соответствии с планируемо-прогнозируемыми климатическими условиями в наступающем цикле жизни. Это сотни миллионов лет, но для этого у них есть база данных. Занимались наши предки этим бесконечно долгое время. Они должны периодически следить за развитием «посадочного материала». Так живет бесконечно большой космос, и он обязательно должен быть разделён на относительно самостоятельные «области» со своими циклами развития, включающими «большой взрыв чёрной дыры» и «восстановление области». А отряды из соседних «областей» восстанавливают флору и фауну, следят, и у них много работы, так как только в нашей Галактике 150 млн звёзд, а планет в несколько раз больше.

Это не гипотеза, а проверенный и доказанный на протяжении сотен миллионов лет закон природы.

Поэтому не следует торопить судьбу. У космоса чёткое расписание:

- когда человечеству жить;
- когда бороться с лишениями;
- когда погибнуть.

Или оно найдёт возможность хотя бы частично избежать этого печального конца и дожить до следующего цикла жизни, как это произошло в последние 14 тыс. лет. (см. рис. 4)

В этот период восстановление человечества шло постепенно. Первые признаки цивилизованного сообщества появились:

- В Индии – 9000 лет назад (начало 200 – 500 тыс. лет – это 4 последних ледниковых цикла);
- В Китае – 7648 лет назад;
- В Шумерах – 6000 лет назад;
- В Вавилоне – 3000 лет назад;
- В Египте – 12000 лет назад;
- В Южной Америке – 1300 лет назад.

Но период благоприятных климатических условий заканчивается, и человечество ожидает в ближайшее время тысячелетнее очередное понижение температуры.

Заключение

1. Приведенные результаты исследования показывают, что начинающийся в 2024 – 2034 гг. и развивающийся в ближайшие десятилетия «малый ледниковый период» с большой вероятностью будет началом более грандиозного геомеханически-климатического процесса продолжительностью около 100000 лет, когда в результате сжатия Земли активизируются землетрясения, вулканы, потопа, а средняя температура на Земле постепенно опустится до -10°C и более.

2. Именно потопа, которые являются следствием того, что при сжатии материи ложа океанов (массива горных пород) будет сжиматься интенсивнее чем вода, приведут к затоплению суши, станут очень опасными явлениями природы. Этот эффект зафиксирован при определении эталона веса.

3. Из крупных неприятностей на ближайшее время (10 – 20 лет) нас ожидает:

- осложнение эксплуатации северного морского пути, не исключая его закрытия на продолжительные периоды, но в то же время прекращение оттаивания вечной мерзлоты;
- осложнение добычи нефти и газа на шельфе северных морей из-за тяжелой ледовой обстановки;
- затруднение пользования недрами на глубинах более 400 – 500 м в результате роста деформаций массива горных пород, не исключая консервации некоторых рудников на неопределенное время.

4. В 6-й ступени сжатия МГП 2050 – 2060 гг. можно ожидать понижение средней температуры на Земле до $-1 \div -2^{\circ}\text{C}$ и роста $\varepsilon_{\text{МГП}}$ более $-24 \cdot 10^{-4}$.

5. Представленная информация позволит обоснованно планировать исследования в последующие годы в научных областях: физике, климатологии, экологии, геомеханике, геотехнологии, в транспорте и строительстве.

6. В надвигающейся тяжелой климатической и геомеханической обстановке человечеству для выживания необходимо всестороннее технологическое и техническое перевооружение при всестороннем использовании недр, доступ к которому сторожит «злой Цербер» – геомеханическая опасность, ее надо познавать и нейтрализовать в первую очередь.

Список литературы

1. Зубков А.В., 2018. Закон формирования природного напряженного состояния земной коры. Доклады Академии наук, № 3, С. 1 – 11.
2. Зубков А.В., 2019. Пульсации во Вселенной и проявление их на Земле. Проблемы недропользования, № 1, С. 91– 104. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.01.091>

3. Зубков А.В., Сентябов С.В., Селин С.В., 2019. Методика определения природных напряжений в массиве по деформации карьера с использованием спутниковых навигационных систем. *Литосфера*, № 5, С. 767 – 779.
4. Зубков А.В., Сентябов С.В., 2020. Деформация земной коры, способы изучения, закономерности, проблемы. *Литосфера*, № 6, С. 863 – 872.
5. Абдусаматов Х.И., 2013. *Глубокий минимум мощности солнечного излучения приведет к малому ледниковому периоду*. Санкт-Петербург: Нестор – История, 246 с.
6. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 333с.
7. Тюрин А.М. *Практика радиоуглеродного датирования. Часть 3. Калибровочная кривая*. URL: // <https://new.chronologia.org/> (дата обращения 2.12.2023)
8. Зубков А.В., Сентябов С.В., Селин С.В., 2022. Относительная деформация материи на микро- и макроуровне в условиях изменяющейся космической погоды. *Литосфера*, Т. 22, № 2, С. 228 – 238.
9. Бернауэр Я., Рандольф П., 2014. *Проблемы радиуса протона*. URL: https://spkurdyumov.ru/uploads/2014/04/problema_radiusa_protona.pdf?ysclid=lpwai20e7h710036913 (дата обращения 7.12.2023)
10. Лухнев А.В., Санько В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Кале Э., 2010. Вращения и деформации земной поверхности в Байкало-Монгольском регионе по данным GPS-измерений. *Геология и геофизика*, № 7, С. 1006 – 1017.
11. Сун В., Яскелл С., 2008. *Минимум Маундера и переменные солнечно-земные связи*. Москва – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 336 с.
12. Борисенков Е.П., Пасецкий В.Н., 1988. *Тысячелетняя летопись необычных явлений природы*. Москва: Мысль, 522с.
13. Чумаков Н.М., 2015. *Оледенения Земли*. Москва: ГИ РАН, 159с.
14. Leonov V.S., 2010. Quantum Energetics. Theory of Super unification. *Cambriage International Science Publishing*, 745 p.
15. Emanoil Mary, 2001. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. *Extinctosaurus: encyclopedia of lost and endangered species*, 256 с.

References

1. Zubkov A.V., 2018. Zakon formirovaniya prirodnogo napryazhennogo sostoyaniya zemnoi kory [The law of formation of the natural stress state of the Earth's crust]. *Doklady Akademii nauk*, № 3, P. 1 – 11.
2. Zubkov A.V., 2019. Pul'satsii vo Vselennoi i proyavlenie ikh na Zemle [Pulsations in the Universe and their manifestation on Earth]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 1, P. 91 - 104. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2019.01.091>
3. Zubkov A.V., Sentyabov S.V., Selin S.V., 2019. Metodika opredeleniya prirodnykh napryazhenii v massive po deformatsii kar'era s ispol'zovaniem sputnikovyykh navigatsionnykh system [Method for determining natural stresses in an array by deformation of a quarry using satellite navigation systems]. *Litosfera*, № 5, P. 767 – 779.
4. Zubkov A.V., Sentyabov S.V., 2020. Deformatsiya zemnoi kory, sposoby izucheniya, zakonomernosti, problemy . [Deformation of the Earth's crust, ways of studying, patterns, problems]. *Litosfera*, № 6, P. 863 – 872.
5. Abdusamatov Kh.I., 2013. Glubokii minimum moshchnosti solnechnogo izlucheniya privedet k malomu lednikovomu period [Deep minimum of solar radiation power will lead to a small ice age]. *Sankt-Peterburg: Nestor – Istoriya*, 246 p.
6. Zubkov A.V., 2001. Geomekhanika i geotekhnologiya [Geomechanics and geotechnology]. *Ekaterinburg: IGD UrO RAN*, 333 p.

7. Tiurin A.M. Praktika radiouglerodnogo datirovaniya. Chast' 3. Kalibrovochnaya krivaya [Practice of radiocarbon dating. Part 3. Calibration curve]. URL: // <https://new.chronologya.org/> (data obrashcheniya 2.12.2023)
8. Zubkov A.V., Sentyabov S.V., Selin S.V., 2022. Otnositel'naya deformatsiya materii na mikro- i makrourovne v usloviyakh izmenyaiushcheysya kosmicheskoi pogody [The relative deformation of matter at the micro and macro levels in conditions of changing cosmic weather]. *Litosfera*, V. 22, № 2, P. 228 – 238.
9. Bernauer Ya., Randol'f P., 2014. Problemy radiusa protona [Proton radius problems]. URL: https://spkurdyumov.ru/uploads/2014/04/problema_radiusa_protona.pdf?ysclid=lpwai20e7h710036913 (data obrashcheniya 7.12.2023)
10. Lukhnev A.V., San'ko V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Kale E., 2010. Vrashcheniya i deformatsii zemnoi poverkhnosti v Baikalo-Mongol'skom regione po dannym GPS-izmerenii [Rotation and deformation of the Earth's surface in the Baikal-Mongolian region according to GPS measurements]. *Geologiya i geofizika*, № 7, P. 1006 – 1017.
11. Sun V., Yaskell S., 2008. Minimum Maundera i peremennye solnechno-zemnye svyazi [The Maunder minimum and variable solar-terrestrial connections]. Moscow – Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika", Institut komp'iuternykh issledovaniy, 336 p.
12. Borisenkov E.P., Pasetskii V.N., 1988. Tysyacheletnyaya letopis' neobychnykh yavlenii prirody [A thousand-year chronicle of unusual natural phenomena]. Moscow: Mysl', 522 p.
13. Chumakov N.M., 2015. Oledeneniya Zemli [Glaciations of the Earth]. Moscow: GИ RAN, 159 p.
14. Leonov V.S., 2010. Quantum Energetics. Theory of Super unification. *Cambridge International Science Publishing*, 745 p.
15. Emanoil Mary, 2001. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. *Extinctosaurus: encyclopedia of lost and endangered species*, 256 p.

УДК 662.2

Флягин Александр Сергеевич
младший научный сотрудник,
лаборатория разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: flyagingdr@mail.ru

Федоров Евгений Владимирович
начальник участка, ООО «Уралвзрывпром»,
620146, Свердловская область, Екатеринбург,
ул. Шаумяна 81, офис 220
e-mail: mamu.fedorov@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ВЗРЫВАНИИ ЛЕДЯНЫХ ПОКРОВОВ

Аннотация:

Для предупреждения и ликвидации опасных ледяных заторов в русле рек в настоящее время чаще всего применяется взрывной способ, реже авиационное бомбометание, минометно-артиллерийский обстрел, а также ледокольный метод. В статье описан опыт борьбы с заторами на затороопасных участках рек с применением эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) заводского производства марки НПГМ-П-П-М диаметром 60 мм, изготовленного по ТУ 20.51.11-016-37945333-2017, применяемого в качестве основного заряда для взрывания ледяных покровов. Иницирование и монтаж сети производились с применением детонирующего шнура марки ДШЭ-12 и пиротехнических реле марки РП-Д. Данный вид взрывчатых веществ (ВВ) и СИ показал их неоспоримые преимущества перед другими классами промышленных ВВ, имея превосходную водоустойчивость, в результате чего сохраняются взрывчатые характеристики в проточных водах и даже на большой глубине [1]. В результате проведенных работ по взрыванию льда со средней толщиной 0,7 м ЭВВ имеют преимущества перед штатными ВВ и ВВ из утилизируемых боеприпасов [2] как в техническом, так и в экономическом аспекте. Удельный расход ЭВВ составил 0,36 кг/м³, что в разы ниже, при использовании тротилсодержащих ВВ при дроблении льда.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.04.116

Flyagin Alexander S.
Junior Researcher,
Laboratory of rock destruction,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiriyaka Str. ;
e-mail: flyagingdr@mail.ru

Fedorov Evgeny V.
site manager,
Uralvzryvprom LLC,
620146 Ekaterinburg, 81 Shaumyana Str., off. 220
e-mail: mamu.fedorov@mail.ru

APPLICATION OF EMULSION EXPLOSIVES WHEN EXPLODING ICE COVER

Abstract:

To prevent and eliminate dangerous ice jams in riverbeds, the explosive method is currently most often used, less often used are aerial bombing, mortar and artillery shelling, as well as the ice-breaking method. The article considers the experience of dealing with congestions in flood-prone river sections using an emulsion explosive (EE) of industrial production NPGM-P-II-M brand with a diameter of 60 mm manufactured according to TU 20.51.11-016-37945333-2017 used as the main charge for exploding ice sheets. The initiation and installation of the network was carried out using a detonating cord of the DShE-12 brand and pyrotechnic relays of the RP-D brand. This type of explosives and initiation systems have shown their undeniable advantages over other classes of industrial explosives having excellent water resistance, as a result of which explosive characteristics are preserved in flowing waters and even at great depths [1]. As a result of the work carried out for blasting ice with an average thickness of 0.7 meters, EE have advantages over regular explosives and explosives from recycled ammunition [2], both in technical and economic aspects. The specific consumption of EE was 0.36 kg/m³, which is several times lower when using (TNT containing) explosives when crushing ice.

Введение

В весенний период вскрытия рек ледяной покров может создавать заторы, которые могут привести к наводнениям. Когда лед начинает таять, ледяные глыбы, плывущие по течению, могут скапливаться и образовывать заторы, что препятствует свободному течению воды и может вызвать повышение уровня воды в реках. Во время ледохода часто происходят подтопления прибрежных территорий. Это может привести к

повреждению имущества, включая дома, предприятия и инфраструктуру. Образованные заторы, скопившиеся льдины в русле реки во время ледохода, вызывают стеснение водного сечения, что в свою очередь увеличивает скорость течения воды, а это увеличивает опасность подмыва опор мостов и даже их сноса. Ежегодный ущерб, наносимый ледоходами хозяйственным субъектам, исчисляется миллионами рублей. С учетом повторяемости ледохода ежегодно работы по защите сооружений являются крайне важными.

Разрушение льда методом взрывания является одним из основных направлений предупреждения и ликвидации опасных заторов. Взрывы широко применяются в оперативной борьбе с заторами на затороопасных участках путем закладки зарядов ВВ на лед, в лед и под лед. Проведение взрывных работ при проведении работ по предупреждению и ликвидации опасных заторов и подготовки к ледоходу является самым эффективным, чему также способствуют незначительные капитальные затраты и простота средств механизации. Появление мощных водоустойчивых и менее опасных в обращении взрывчатых веществ, а также применение современных технологий расширяет возможности данного способа как в период подготовки в ледоходу, так и в период ликвидации образовавшихся заторов.

На тему ледоборьбы написано много трудов и научных работ [1, 7, 10, 11]. Но описания применения для данного вида работ ЭВВ отсутствуют в открытой печати. Основными видами используемых ВВ, описанных в источниках, являются тротилсодержащие или конверсионные. Есть и аммиачно-селитренные типа «Игданит», но они не получили распространения при взрывании ледяных покровов из-за низкой водоустойчивости.

Заторные опасные ледовые явления и обусловленные ими затопления местности широко распространены почти по всей территории Российской Федерации.

Десятки российских предприятий, ведущих взрывные работы на карьерах и шахтах, в весеннее время проводят ледокольные подрядные работы на реках, опасных по образованию ледяных заторов и подтоплению заселенных людьми территорий. Взрывные работы по раскалыванию ледяного покрова являются предупредительными мероприятиями, позволяющими ускорить процесс ледохода и обеспечить беззаторный пропуск льда на реках для охраны мостовых сооружений и объектов во время ледохода, а также во избежание наводнений.

Одной из таких организаций является ООО «Уралвзрывпром», специализирующееся на взрывных работах в карьерах и шахтах Урала.

В 2023 г. в районе мостов через р. Тура в Слободотуринском муниципальном районе и Туринском городском округе Свердловской области этой организацией были проведены взрывные работы по взрыванию льда со средней толщиной 0,7 м.

Описание метода взрывных работ

В зависимости от цели ледовых взрывных работ могут быть выбраны следующие три типа расположения зарядов: на поверхности ледяного покрова, в толще льда и под ледяным покровом (в воде). Разрушение ледяного покрова с помощью подрыва заряда на его поверхности вызывается действием продуктов детонации и ударной воздушной волны, распространяющейся с определенной скоростью по поверхности льда.

Наиболее эффективный способ разрушения льда – зарядами, расположенными под ледяным покровом. Характер разрушения льда определяется воздействием на него взрывной волны, возникающей в воде. Схема разрушения ледяного покрова подводным взрывом представлена на рис. 1.

Наибольший эффект достигается при размещении подводных зарядов на некоторой глубине под ледяным покровом – тем большей, чем он толще. Так, при толщине льда 0,5, 1,0 и 1,5 м значение глубины закладки находится, соответственно, в диапазонах 1–1,5; 2–2,5; 3 – 3,5 м.

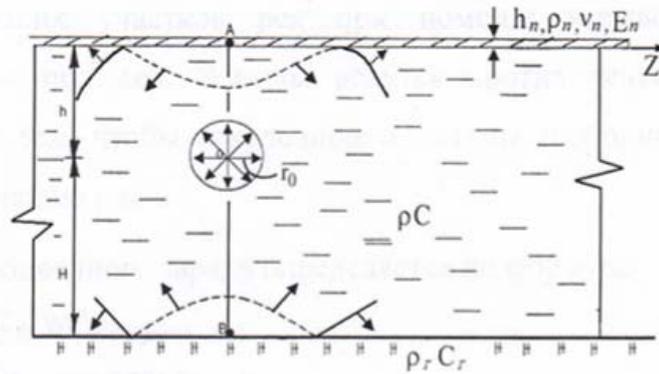


Рис. 1. Схема разрушения ледяного покрова подводным взрывом:

h и H – расстояния от эпицентра взрыва O до нижней поверхности льда и до поверхности дна реки; ρ – плотность воды; C – скорость распространения продольной волны в воде; ρ_r – плотность грунта; C_r – скорость продольной волны в грунте; r – сферический заряд с радиусом r_0 ; A – эпицентр взрыва (его проекция)

С целью предупреждения образования заторов ниже предполагаемых затороопасных мест проводится освобождение от льда больших участков рек при помощи взрывов зарядов, опускаемых под лед.

Вес подводного заряда определялся по формуле:

$$Q = K_{\text{ВВ}} \cdot K_{\text{д}} \cdot W^3,$$

где $K_{\text{д}}$ – удельный расход ВВ, кг/м³;

$K_{\text{ВВ}}$ – коэффициент работоспособности ВВ;

W – линия наименьшего сопротивления (измеряется от центра заряда ВВ до поверхности льда), м.

Для патронированных эмульсионных ВВ «НПГМ-П- II-60» $K_{\text{ВВ}} = 0,8$.

Удельный расход ВВ изменяется от 0,3 до 1,5 кг/м³ и зависит от размера льдин, необходимой степени дробления в майне льда и его разброса. Глубина опускания заряда W увеличивается с повышением толщины ледяного покрова. Расстояние между зарядами зависит от диаметра образуемой майны, условий взрыва и характера выполняемой работы. Обычно расстояние колеблется от 3 до 15 W (глубин опускания заряда в воду).

Параметры расположения и вес зарядов были выбраны исходя из опыта и результата взрывания прошлых лет непосредственно на этих объектах. Из практики проведения ледокольных работ перед основным взрывом льда необходимо провести небольшой взрыв ледяного покрова реки с малым зарядом взрывчатого вещества с целью отпугивания рыбных ресурсов от будущего места взрыва. Это позволяет предостеречь от массовой гибели рыбные ресурсы. Производство взрывных работ выполнялось в соответствии с заранее разработанной проектной документацией на основании [5] и при строгом соблюдении требований [6].

Задача на данном участке проведения работ по обработке льда состояла в образовании 2-х майн размерами 60 м в длину и 4 м в ширину, средняя толщина ледяного покрова $h_{\text{ср}} = 0,7 - 0,8$ м.

В ходе работ был выбран подводный тип расположения заряда как наиболее подходящий для данного вида работ. Для размещения подводного заряда бурилась скважина диаметром 130 мм с использованием мотобура. Учитывая, что заряд располагался под водой, возникла потребность в зарядании скважин водостойчивыми взрывчатыми веществами. Данная работа была проведена с применением водостойчивого взрывчатого вещества марки НПГМ-П- II-М-60 взамен патронированного аммонита № 6 ЖВ диаметром 90 мм. Ранее применяемый аммонит № 6 ЖВ при взрывании льда требовал дополнительного использования герметичной упаковки, что в условиях низ-

кой температуры затрудняло процесс зарядания. Приходилось размещать заряды в толще льда для исключения контакта ВВ с водой, что в свою очередь снижало эффективность дробления льда. И, конечно же, стоимость аммонита № 6 ЖВ в разы больше стоимости патронированных эмульсионных ВВ, что сказывается на общей стоимости взрывных работ. В качестве средств инициирования применялся детонирующий шнур марки ДШЭ-12, характеризующийся водостойкостью до 30 суток на глубине до 30 м, и пиротехническое реле марки РП-Д с номинальным временем замедления 45 мс. Иницирование поверхностной взрывной сети производилось электрическим способом от двух электродетонаторов ЭД-8, соединенных параллельно. Электродетонаторы инициировались от взрывной машинки КПМ-3 из безопасного места.

Параметры буровых и взрывных работ

Заданные размеры майны, подлежащей взрыванию, указаны в табл. 1.

Таблица 1

Размеры майны, подлежащей взрыванию

Наименование	Размеры			Объем, м ³	Скорость течения реки, км/ч
	Длина, м	Ширина, м	Толщина льда, м		
Майна 1	60	4	0,7	168	3
Майна 2	60	4	0,7	168	3

Параметры расположения и вес зарядов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры расположения и вес зарядов

Толщина льда, м	Глубина погружения зарядов, м	Расстояние между зарядами, м	Удельный расход ВВ, кг/м ³	Диаметр отверстия для размещения подводного заряда, мм	Вес заряда, кг
0,7	2,4	4	0,36	130	4

При необходимости увеличения ширины майны с сохранением количества заряда ВВ, скважины возможно располагать в шахматной сетке с отклонением от створа основного ряда не более половины расстояния между скважинами.

Схема расположения зарядов приведена на рис. 2.

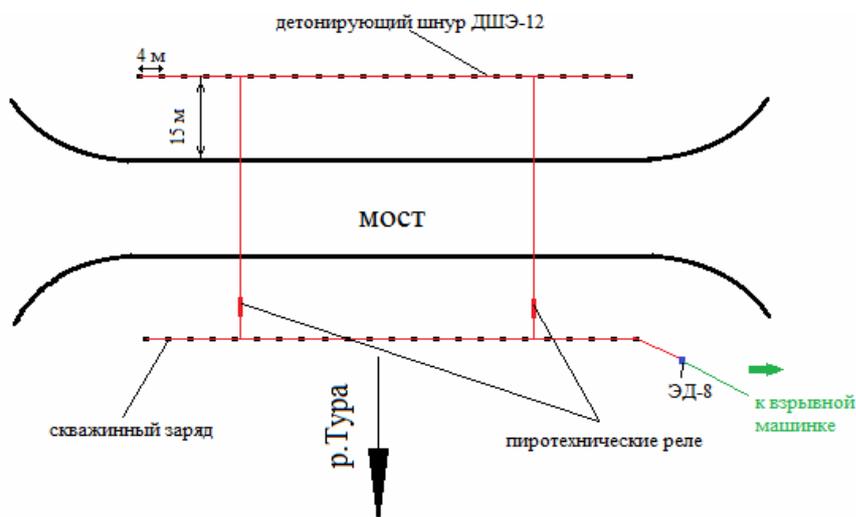


Рис. 2. Схема расположения зарядов

Взрывные работы были проведены с радиусом опасной зоны 100 м в соответствии с «Правилами безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения» и приложением № 21.

Конструкция заряда представлена на рис. 3.

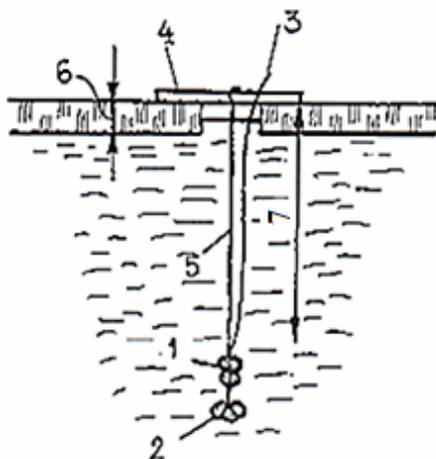


Рис. 3. Конструкция заряда подледного взрывания:
1 – заряд ВВ; 2 – груз; 3 – детонирующий шнур; 4 – перекладина; 5 – шпагат; 6 – лед;
7 – глубина погружения

Работы были проведены согласно «Проекту производства взрывных работ в районе мостов через р. Тура, разработанному ООО «Уралвзрывпром», в течение одного светового дня. В ходе работ были образованы майны необходимых размеров (рис. 4), тем самым обеспечено беспрепятственное прохождение льда. Затвор льда был предотвращен, и охраняемый объект (мост) через р. Тура, находящийся около с. Галактионовка, был полностью сохранен (рис. 5).



Рис. 4. Образовавшаяся майна после взрыва



Рис. 5. Общий вид моста и получившейся майны

Представленный материал, описывающий применение эмульсионных ВВ, представляет интерес как для научных работников, так и для производителей, непосредственно выполняющих работы по ледоборьбе.

Список литературы

1. Колганов Е.В., Колганов Е.В., Соснин В.А., 2009. *Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества*. 1-я книга (Составы и свойства). Дзержинск: Изд-во ГосНИИ «Кристалл», 592с.
2. Яковлев В.Б., Марков В.С., 2017. К вопросу разрушения ледяных заторов на реках Севера с применением модульной вертолетной системы всм -1. *Вестник Воронежского института ГПС МЧС России*, № 3 (24). С. 41 – 44.
3. Першин А.Е., 2019. Борьба с ледовыми заторами в районе города Великий Устюг. *Вестник науки и образования*. № 10 – 3 (64). С. 21 – 23.
4. Агафонова С.А., Василенко А.Н., Фролова Н.Л., 2016. Факторы образования ледовых заторов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях. *Вестник Московского университета, Серия 5, География*, С. 82– 90.
5. *Инструкция по организации и безопасному производству взрывных ледокольных работ и ледоходных работ*, ИГД УрО РАН; ООО НПП "Взрывтехнология". Екатеринбург: Альфа Принт, 2021, 19 с.
6. «*Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения*», утверждённые Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору», приказ от 3 декабря 2020 г. № 494: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=431880&ysclid=lqkel8w0qx586728598> (дата обращения 12.12.2023)
7. Ганопольский М.И., Барон В.Л., Белин В.А., Пупков В.В., Сивенков В.И., 2007.

Методы ведения взрывных работ. Специальные взрывные работы. Москва: МГГУ, 558 с.

8. *Инструкция по предупреждению, обнаружению и ликвидации отказавших зарядов взрывчатых веществ на земной поверхности ООО «Уралвзрывпром»* 2017 г. 25 с. URL: https://uralvp.ru/catalog/specialnye_vzryvnye_raboty/ (дата обращения 8.12.2023)

9. *Технические условия «НПГМ» ТУ 20.51.11-016-37945333-2017.* НАО НИПИ-ГОРМАШ 2017 г., 23 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/437261799?ysclid=lqkfedkwzd861667475> (дата обращения 8.12.2023)

10. Тавризов В.М., 1986. *Взрывание льда.* Москва: Недра, 135.

11. Давыдов С.А., 1959. Как бороться с ледоходом. *Автомобильные дороги*, № 10.

12. Авдеев Ф.А., Барон В.Л., Гуров Н.В., Кантор В.Х., 1986. *Нормативный справочник по буровзрывным работам.* Москва: Недра, 511 с.

References

1. Kolganov E.V., Kolganov E.V., Sosnin V.A., 2009. Emul'sionnye promyshlennye vzryvchatye veshchestva [Emulsion industrial explosives]. 1-ya kniga (Sostavy i svoistva). Dzerzhinsk: Izd-vo GosNII "Kristall", 592 p.

2. Yakovlev V.B., Markov V.S., 2017. K voprosu razrusheniya ledyanykh zatorov na rekakh Severa s primeneniem modul'noi vertoletnoi sistemy VSM -1 [On the issue of the destruction of ice jams on the rivers of the North using the modular helicopter system VSM-1]. Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii, № 3 (24). P. 41 – 44.

3. Pershin A.E., 2019. Bor'ba s ledovymi zatorami v raione goroda Velikii Ustyug [Control of ice jams in the area of Veliky Ustyug]. Vestnik nauki i obrazovaniya. № 10-3 (64). P. 21 – 23.

4. Agafonova S.A., Vasilenko A.N., Frolova N.L., 2016. Faktory obrazovaniya ledovykh zatorov na rekakh basseina Severnoi Dviny v sovremennykh usloviyakh [Factors of ice congestion formation on the rivers of the Northern Dvina basin in modern conditions]. Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 5, Geografiya, P. 82– 90.

5. *Instruktsiya po organizatsii i bezopasnomu proizvodstvu vzryvnykh ledokol'nykh rabot i ledokhodnykh rabot* [Instructions for the organization and safe production of explosive icebreaking and ice-moving works]. IGD UrO RAN; ООО NPP "Vzryvtekhnologiya". Ekaterinburg: Alfa Print, 2021, 19 p.

6. "Pravila bezopasnosti pri proizvodstve, khraneni i primeneni vzryvchatykh materialov promyshlennogo naznacheniya" [Federal norms and Rules in the field of industrial safety "Safety rules for the production, storage and use of explosive materials for industrial purposes"], utverzhdennye Federal'noi sluzhboi po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru', prikaz ot 3 dekabrya 2020 g. № 494: Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti . URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=431880&ysclid=lqkel8w0qx586728598> (data obrashcheniya 12.12.2023)

7. Ganopol'skii M.I., Baron V.L., Belin V.A., Pupkov V.V., Sivenkov V.I., 2007. *Metody vedeniya vzryvnykh rabot* [Methods of conducting blasting operations]. Spetsial'nye vzryvnye raboty. Moscow: MGGU, 558 p.

8. *Instruktsiya po preduprezhdeniyu, obnaruzheniyu i likvidatsii otkazavshikh zaryadov vzryvchatykh veshchestv na zemnoi poverkhnosti ООО "Уралвзрывпром" 2017 г.* [Instructions for the prevention, detection and elimination of failed explosive charges on the Earth's surface of Uralvzryvprom LLC 2017] - 25 p. URL: https://uralvp.ru/catalog/specialnye_vzryvnye_raboty/ (data obrashcheniia 8.12.2023)

9. *Tekhnicheskie usloviya "NPGM" ТУ 20.51.11-016-37945333-2017* [Technical specifications of NPGM TU 20.51.11-016-37945333-2017]. НАО НИПИ-ГОРМАШ 2017 г., 23 p. URL: <https://docs.cntd.ru/document/437261799?ysclid=lqkfedkwzd861667475> (data obrashcheniya 8.12.2023)

10. Тавризов В.М., 1986. *Взрывание льда* [Exploding of ice]. Moscow: Nedra, 135.



11. Davydov S.A., 1959. Kak borot'sya s ledokhodom [How to deal with ice drift]. Avtomobil'nye dorogi, № 10.

12. Avdeev F.A., Baron V.L., Gurov N.V., Kantor V.Kh., 1986. Normativnyi spra-vochnik po burovzryvnyim rabotam [Normative reference book on drilling and blasting operations]. Moscow: Nedra, 511 p.