

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

Сетевое периодическое научное издание

ISSN 2313-1586

# **ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ**

## **PROBLEMS OF SUBSOIL USE**

Выпуск 1 (36)



16+

Екатеринбург  
2023

Сетевое периодическое научное издание

**ПРОБЛЕМЫ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ**

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  
А.А. Панжин, к.т.н., ученый секретарь 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. Барях, д.т.н., проф., академик РАН, директор ПФИЦ УрО РАН, заведующий лабораторией  
Горного института УрО РАН, г. Пермь  
Н.Г. Валиев, д.т.н., проф., заведующий кафедрой горного дела УГТУ, г. Екатеринбург  
С.Д. Викторов, д.т.н., проф., ИПКОН РАН, г. Москва  
Цоло Вутов, д.т.н., проф., председатель Научно-технического союза горного дела, геологи и металлургии Болгарии,  
г. София, Болгария  
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  
Карстен Дребенштедт, д.т.н., проф., проректор по науке Технического университета Фрайбергской горной академии,  
г. Фрайберг, Германия  
Хадхуугийн Жаргалсайхан, д.т.н., проф., директор Института горного дела Монгольского государственного университета  
науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия  
С.Н. Жариков, к.т.н., заведующий лабораторией ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
А.Г. Журавлев, к.т.н., заведующий лабораторией ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
В.С. Коваленко, д.т.н., проф., заведующий кафедрой Горного института 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  
М.В. Курленя, д.т.н., проф., академик, научный руководитель ИГД СО РАН, г. Новосибирск  
С.В. Лукичев, д.т.н., проф., директор ГоИ КНЦ РАН, г. Апатиты  
В.В. Мельник, к.т.н., заведующий отделом ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
Ю.А. Монастырский, д.т.н., проф., заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт» ГВУЗ Криворожский  
национальный университет, г. Кривой Рог, Украина  
И.Ю. Рассказов, д.т.н., чл.-корр. РАН, директор Хабаровского федерального научного центра, г. Хабаровск  
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  
А.В. Яковлев, к.т.н., заведующий лабораторией ИГД УрО РАН, г. Екатеринбург  
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](http://trud.igduran.ru)

Выпускающий редактор: Е.А. Катаева  
Редактор: О.А. Истомина  
Компьютерный набор и верстка: Я.В. Неугодникова, Т.Г. Петрова

### Уважаемые читатели!

В нашем первом выпуске журнала «Проблемы недропользования» за 2023 год мы публикуем ряд статей по докладам научно-технической конференции «Геомеханика в горном деле», проведенной в рамках X Уральского Горнопромышленного форума.

В статьях представлены результаты решения научно-практических задач геомеханики, нацеленных на повышение безопасности и эффективности освоения недр. Материалы статей представляют интерес для специалистов геомеханической направленности, занимающихся научными и практическими проблемами в недропользовании.

Тематика статей охватывает основные рубрики журнала и освещает следующие вопросы:

- Влияние буровзрывных работ на объекты недропользования при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, диагностика удароопасности в результате изменения геомеханического и геодинамического состояния подработанного массива горных пород. Авторы: Сентябов С.В., Карамнов Д.В. «Методы определения первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями». Автор: Зуев П.И. «Исследование воздействия взрывов на здания и сооружения при подземной разработке». Автор: Ломов М.А. «Аварии в горной промышленности в России, произошедшие вследствие динамических проявлений в горном массиве. Контроль горного давления на месторождении «Южное» (Приморский край)».

- Исследование механизма поступления радона в здания, его влияние на организм человека и использование в качестве метода диагностики современной геодинамической активности горного массива. Автор: Далатказин Т.Ш. «Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии». Автор: Глазачев И.В. «Оценка механизмов поступления радона в здания».

- Выявление критериев возникновения аварий от современных геодинамических движений при строительстве подземных и наземных сооружений. Авторы: Балек А.Е., Харисов Т.Ф., Озорнин И.Л. «Учет влияния современных геодинамических движений при строительстве выработок дробильно-водоотливного комплекса».

- Исследование подработанных территорий современными геофизическими методами для прогноза развития процесса сдвижения земной поверхности и других геологических процессов. Автор: Усанов С.В. «Анализ исторических данных по старым шахтам золоторудных даек Анненская и Аникинская для прогноза безопасности земной поверхности».

Представляет интерес статья Титова Р.С., Кантемирова В.Д., Яковлева А.М. «Обоснование вариантов освоения Ак-Тальского месторождения каменного угля». В ней приведены технические решения по снижению технико-технологических и горно-геологических рисков при отработке сложноструктурного месторождения каменного угля, реализация которых позволяет снизить их до приемлемого уровня, достаточного для рассмотрения инвестиционных проектов по его разработке.

В номер также вошли некоторые статьи, подготовленные по докладам XVII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования».

*Редколлегия*

## Содержание

### ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

<b>Балек А.Е., Харисов Т.Ф., Озорнин И.Л.</b> Учет влияния современных геодинамических движений при строительстве выработок дробильно-водоотливного комплекса .....	<b>6</b>
<b>Титов Р.С., Кантемиров В.Д., Яковлев А.М.</b> Обоснование вариантов освоения Ак-Тальского месторождения каменного угля .....	<b>16</b>
<b>Андреева О.Н., Кольцов П.В., Пыхтеева Н.Ф.</b> Анализ устойчивости откосов карьера Западно-Озерный для обеспечения безопасности ведения горных работ .....	<b>32</b>
<b>Яковлев А.М., Кантемиров В.Д., Титов Р.С.</b> Методика оценки фронтов горных работ глубоких карьеров на основе ГГИС моделирования рабочей зоны .....	<b>41</b>

### ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

<b>Сентябов С.В., Карамнов Д.В.</b> Методы определения первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями .....	<b>54</b>
<b>Далатказин Т.Ш.</b> Методические вопросы геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии .....	<b>64</b>
<b>Усанов С.В.</b> Анализ исторических данных по старым шахтам золоторудных даек Анненская и Аникинская для прогноза безопасности земной поверхности .....	<b>70</b>
<b>Зуев П.И.</b> Исследование воздействия взрывов на здания и сооружения при подземной разработке .....	<b>78</b>
<b>Ломов М.А.</b> Аварии в горной промышленности в России, произошедшие вследствие динамических проявлений в горном массиве. Контроль горного давления на месторождении «Южное» (Приморский край) .....	<b>85</b>

### ГЕОТЕХНИКА

<b>Плохих В.В.</b> Результаты исследования процесса механического замыкания упругого клапана и применение его в пневмоударной машине с регулируемыми параметрами рабочего цикла .....	<b>94</b>
---	-----------

### ГЕОФИЗИКА

<b>Шевченко М.Д., Мельник В.В., Замятин А.Л.</b> Геофизические исследования на участках строительства и эксплуатации подземных рудников .....	<b>105</b>
<b>Глазачев И.В.</b> Оценка механизмов поступления радона в здания .....	<b>113</b>



**ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОТРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ  
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

УДК 622.83

**Балек Александр Евгеньевич**

доктор технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории геомеханики подземных  
сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620219 г. Екатеринбург,  
Мамина-Сибиряка 58  
e-mail: [balek@igduran.ru](mailto:balek@igduran.ru)

**Харисов Тимур Фаритович**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
лаборатория геомеханики подземных  
сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru)

**Озорнин Иван Леонидович**

заведующий лабораторией  
геомеханики подземных сооружений,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [ivan.ozornin@igduran.ru](mailto:ivan.ozornin@igduran.ru)

#### **УЧЕТ ВЛИЯНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВЫРАБОТОК ДРОБИЛЬНО-ВОДООТЛИВНОГО КОМПЛЕКСА\***

##### *Аннотация:*

*Актуальность исследований обусловлена необходимостью выявления основных критериев возникновения аварийных ситуаций от воздействия современных геодинамических движений на устойчивость камерных выработок рудоворода в процессе проходки.*

*Цель исследований – выявление наиболее значимых факторов, определяющих устойчивость для последующей разработки технологий снижения риска и уменьшения тяжести последствий аварийных нарушений крепи.*

*Объектом исследований явились камерные выработки дробильно-водоотливного комплекса горизонта – 320 м шахты «Южная» Гороблагодатского месторождения, их крепи и окружающий напряженный породный массив, сложенный трещиноватыми скальными породами.*

*В качестве основного метода исследований применялось обобщение и анализ результатов натурных инструментальных измерений реперных линий – метод повторных измерений линий базисов. Результаты исследований показали, что первопричиной произошедших нарушений крепи дробильно-водоотливного комплекса горизонта – 320 м на шахте «Южная» Гороблагодатского месторождения явились деформации окружающего породного массива, происходившие на двух мас-*

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.006

**Balek Alexander Ye.**

Doctor of Engineering,  
Leading Researcher,  
Laboratory of geomechanics  
of underground constructions,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.;  
e-mail: [balek@igduran.ru](mailto:balek@igduran.ru)

**Kharisov Timur F.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of geomechanics  
of underground constructions,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [timur-ne@mail.ru](mailto:timur-ne@mail.ru)

**Ozornin Ivan L.**

Head of Laboratory of geomechanics  
of underground constructions,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
e-mail: [ivan.ozornin@igduran.ru](mailto:ivan.ozornin@igduran.ru)

#### **ACCOUNTING OF INFLUENCE OF GEODINAMIC MOVINGS DURING GROOVE CONSTRUCTION FOR GRINDING AND DRAINING COMPLEX**

##### *Abstract:*

*The relevance of the research is due to the need of identifying the main criteria for the occurrence of emergencies from the impact of current geodynamic movements on the stability of the chamber workings of the ore yard during the sinking process.*

*The purpose of the research is to identify the most significant factors determining stability for the subsequent development of risk reduction technologies and the reducing the severity of the consequences of emergency support violations.*

*The objects of the research were the chamber workings of the crushing and drainage complex on the horizon – 320 m at the Yuzhnaya mine of the Goroblagodatskoye deposit, their supports and the surrounding stressed rock mass composed of fractured rocks.*

*Generalization and analysis of the results of full-scale instrumental measurements of reference lines were the main method research, i.e. repeated measurements of baseline lines.*

*The results of the research showed that the cause of the violations in the support of the grinding and draining complex on the horizon – 320 m at the Yuzhnaya mine of the Goroblagodatskoye deposit were deformations of the surrounding rock mass that occurred at two large-scale levels due to the man-made impact of mining operations: at bases of about 100*

\* Статья подготовлена в рамках реализации Госзадания № 075-00412-22 ПП, тема рег. № 1021062010536-3-1.5.1.

штабных уровнях вследствие техногенного воздействия горных работ: на базах порядка 100 и более метров – подвижки геоблоков, обусловленные динамическим воздействием крупномасштабного тектонического разлома, что было спровоцировано выпуском из него породы и закачкой тампонажного раствора; на базах порядка 10 м – блоковые подвижки приконтурного породного массива, обусловленные изменениями его напряженно-деформированного состояния вследствие ведения проходческих работ.

**Ключевые слова:** горный массив, иерархическая блочность, геодинамические движения, напряжения, деформации, вертикальные стволы, околоствольные камеры, проходка, шахта «Южная», Гороблагодатское железорудное месторождение.

meters or more, there had taken place geological block movements caused by the dynamic impact of a large-scale tectonic fault, which was provoked by the release of rock from it and the injection of a grouting solution; on bases of 10 m there were marked block movements of the border zone rock mass caused by changes in its stress-strain state due to tunneling operations.

**Key words:** mountain massif, hierarchical blockiness, geodynamic movements, stresses, deformations, vertical trunks, near-barrel chambers, sinking, Yuzhnaya mine, Goroblagodatskoye iron ore deposit.

### Введение

На шахте «Южная», отрабатывающей Гороблагодатское железорудное месторождение, на протяжении ряда лет наблюдались проблемы с обеспечением устойчивости крепи выработок строящихся околоствольных дворов гор. –320 и –480 м. Происходили неоднократные нарушения целостности монолитной железобетонной крепи выработок дробильного комплекса: камер дробилки, опрокидывателя, дозаторной и монолитной бетонной крепи прилегающих выработок руддвора гор. –320 м, главным образом расщески ствола Южная-1 и обгонной транспортной выработки (рис. 1, 2). Нарушения крепи в основном имели сдвигово-отрывной характер и проявлялись в сколах и отслоениях пластин бетона, раскрытии трещин, а также выпирании петель арматуры, главным образом в замках кровли камер.

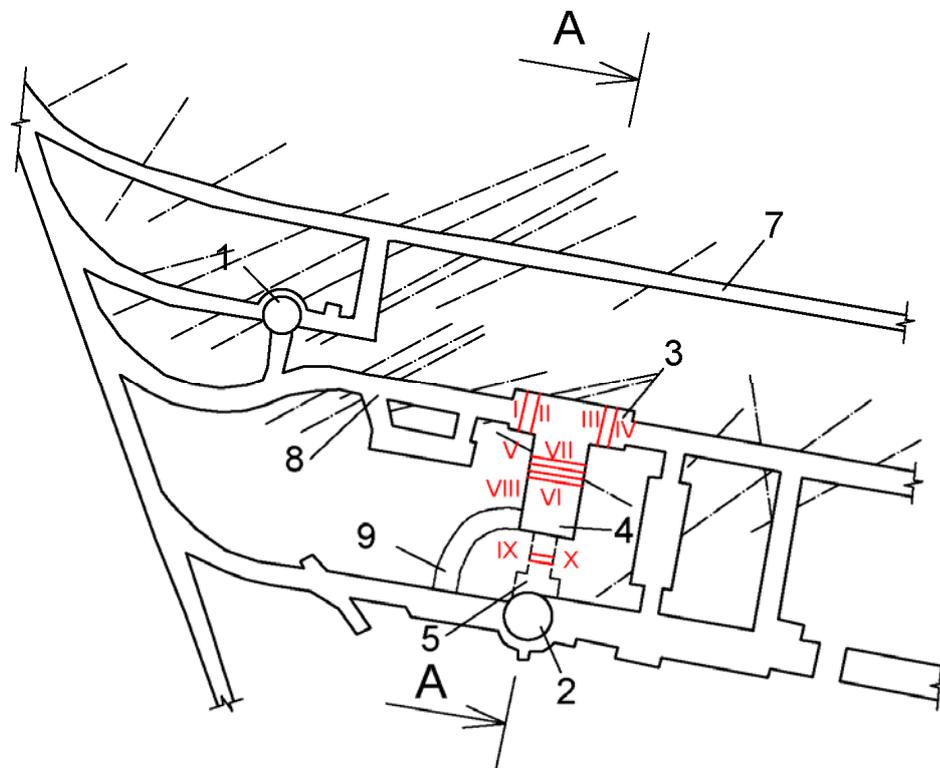


Рис. 1. План руддвора гор. –320 м шахты «Южная»:

- 1 – ствол Южная-2; 2 – камера опрокидывателя; 3 – камера дробилки с реперными линиями; 4, 5 – камера дозаторной с реперными линиями; 6 – насосная камера гор. –480 м с реперными линиями (см. рис. 2); 7 – железобетонный экран; 8 – тубинговое крепление ствола; 9 – штанговое крепление камеры дозаторной

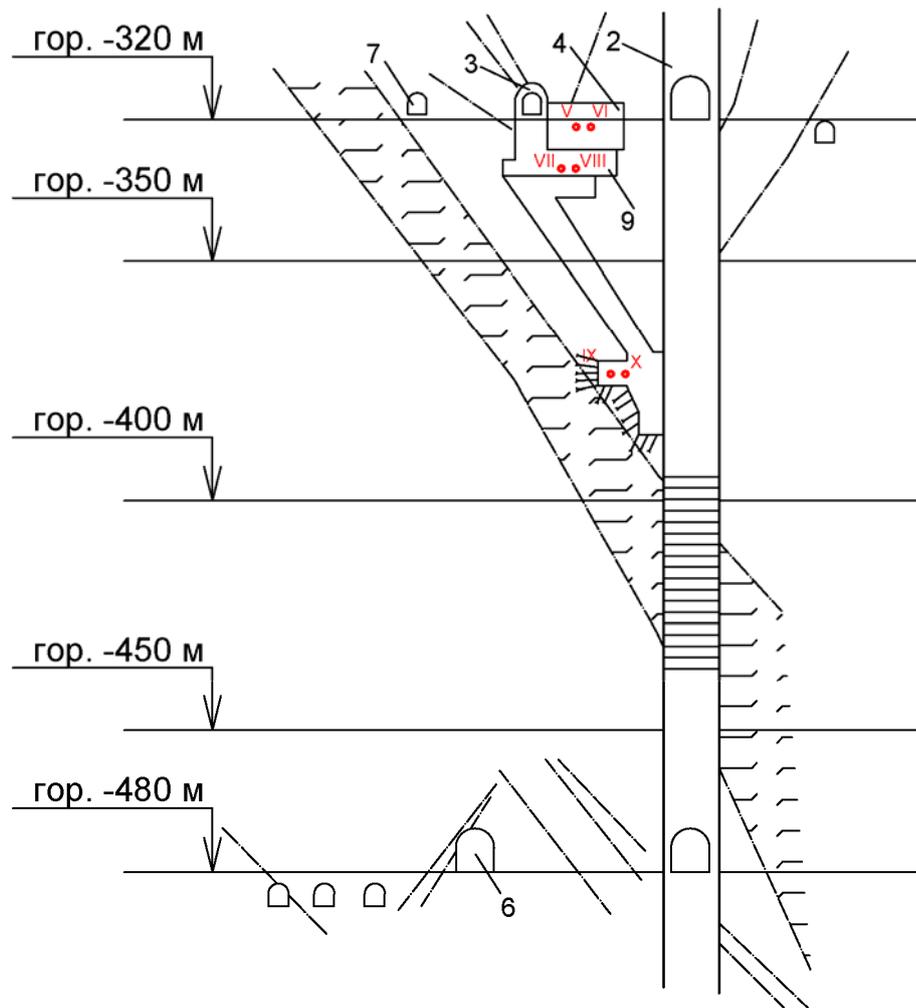


Рис. 2. Вертикальный разрез руд двора гор. -320 м шахты «Южная» по линии А-А (условные обозначения рис. 1)

Опыт работ и натурных геомеханических исследований, проведенных на российских [1 – 5] и зарубежных [6 – 9] рудниках в аналогичных условиях, позволили сформулировать и обосновать геомеханическую модель рассматриваемого участка породного массива шахты. Установлено, что основным фактором, определяющим напряженно-деформированное состояние массива на участке строительства околоствольных дворов гор. –320 и –480 м, явилась близость подвижного тектонического разлома, относящегося к более крупномасштабной структурной иерархии, по сравнению с другими тектоническими разломами, выделенных в пределах шахтного поля. И поэтому если раньше, при строительстве вышележащих горизонтов шахты, напряженное состояние массива формировалось в соответствии с геомеханической моделью сплошной упругой среды, то на рассматриваемом участке оно определяется подвижками больших объемов породного массива (геоблоков) по тектоническому разлому в режиме заданных деформаций.

Обоснование крупномасштабной геомеханической модели позволяло задавать лишь исходные граничные условия, от которых, в свою очередь, зависело напряженно-деформированное состояние более мелкомасштабных уровней, в том числе непосредственно прилегающих к контуру подземных выработок участков породного массива, деформации которых и определяли напряженное состояние крепи. В связи с уменьшением пространственных и временных масштабов деформирования среды изменялись ее прочностные и деформационные характеристики и, соответственно, подлежал пересмотру механизм ее поведения под нагрузкой, поскольку рассматриваемый иерархиче-

ски блочный массив скальных горных пород, деформирующийся на базах 100 – 1000 м в соответствии с пластической моделью, на базе порядка 10 м вполне мог оказаться упругим с учетом достаточно высоких показателей прочности и жесткости слагающих его пород, главным образом сиенитов и порфиритов [10].

В этой связи на шахте были проведены комплексные крупномасштабные геомеханические исследования, направленные на изучение напряженно-деформированного состояния крепи и приконтурного массива выработок дробильно-водоотливного комплекса в условиях воздействия геодинамических движений, спровоцированных процессами строительства.

#### *Изложение рассматриваемых вопросов*

Исследования структурного строения пород на обнажениях контура выработок гор. – 480 и – 320 м показали, что рассматриваемый сиенито-порфиритовый массив в целом является типичным для Гороблагодатского месторождения. При коэффициенте трещиноватости порядка 2 – 4, местами 1 – 2 макротрещины на погонный метр, приконтурный массив имеет неупорядоченное блочное строение с не менее чем 3 – 5 системами макротрещин, в основном крутопадающих, как правило без глинки трения и зеркал скольжения с раскрытием не более 1 мм. Согласно пятикатегорийной классификации в целом породы можно отнести к III категории устойчивости (средняя устойчивость). В местах пересечения выработками тектонических нарушений трещиноватость массива возрастает до 10 – 12 трещин на метр и, соответственно, устойчивость его понижается до IV категории (неустойчивый массив).

Зондирование приконтурного породного массива выработок дробильного комплекса с помощью перископического прибора РВП по пробуренным шпурам показало, что проведенный в процессе строительства тампонаж закрепного пространства был выполнен достаточно качественно и практически повсеместно в кровле выработок обеспечена хорошая связь бетона с массивом. При этом бутобетон в кровле прослеживается на значительную глубину, достигающую: в камере дробилки – 2,5 м, в транспортной выработке – 1,5 м.

Между тем в приконтурном массиве, примыкающем к стенкам камер, зафиксированы раскрытия структурных трещин на величину до 1 см и более. Сильнее всего это проявлялось в нижней части камеры дозаторной, находящейся вблизи зоны разлома (см. рис. 2). При разбуривании этого участка разведочными шпурами глубиной 3 м в двух шпурах из 48 были даже зафиксированы локальные пустоты протяженностью (вдоль шпура) до 30 см. Все это свидетельствовало о возможности взаимных смещений отдельных структурных блоков, что, учитывая большие размеры камер, могло происходить даже при коэффициенте трещиноватости массива менее 2 трещин на метр. Таким образом, сам по себе анализ структурного строения породного массива не позволял сделать заключение о механизме деформирования среды. Получить ответ на этот вопрос можно было лишь на основании данных мониторинговых натуральных деформационных замеров, проведенных в крепи рассматриваемых камер на протяжении 13 лет. Места проведения замеров представлены на рис. 1 и 2.

В качестве основного инструмента исследования напряженно-деформированного состояния бетонной и железобетонной крепи применяли метод реперных линий (метод повторного измерения линий базисов). Метод заключается в установке реперов в противоположащих стенках закрепленной выработки и последующих замерах изменения расстояния между ними (конвергенции) в процессе нагружения и деформирования крепи. Для замеров использовали маркшейдерскую рулетку, дополнительно оснащенную скользящим нониусом, для повышения точности отсчета до 0,1 мм, и динамометром, для обеспечения постоянного натяжения. В комплексе с численными методами математического моделирования, использующими соответствующие геомеханические модели поведения нагруженной среды, замеры по реперным линиям позво-

ляли оценивать напряженно-деформированное состояние как отдельных участков крепи, так и конструкции в целом.

В камере насосной горизонта -480 м две горизонтальные реперные линии были установлены в железобетонной крепи основания свода сразу же после его выемки и возведения постоянного крепления (см. рис. 2). Регулярных замеров в процессе дальнейшей проходки камеры не проводили. После полной выемки камеры сжатие линии составило 8,8 мм. С учетом первоначального базиса линии 8062,2 мм это соответствовало приросту относительной деформации на величину 1,09 мм/м.

В камере опрокидывателя 4 горизонтальные линии (I, II, III, IV) были установлены на отметке -321 м, а в камере дробилки 2 линии (V, VI) – на отметке -323 м в нишах мостового крана и 2 линии (VII, VIII) – на отметке -332 м у основания дробильной установки (см. рис. 1, 2). При этом реперы двух линий камеры опрокидывателя, а именно I и IV, были закреплены в приконтурном породном массиве на границе с бетоном. Реперы остальных линий закреплены в шпурах на контуре железобетонной крепи камер. Все линии установлены до возобновления проходческих работ в камере дробилки. Полученные результаты замеров, представленные в табл. 1, отражают ключевые этапы процесса строительства, а именно:

- 1 этап – проходка монтажной выработки на отметке -333 м;
- 2 этап – выемка 5-метрового слоя под фундамент дробилки;
- 3 этап – проходка рудоспуска в камеру дозаторной;
- 4 этап – проходка камеры дозаторной.

В камере дозаторной две горизонтальные линии IX и X установлены на отметке -377 м в железобетонной крепи под сопряжением рудоспуска с камерой загрузки скипов (см. рис. 1, 2). Установка линий и первоначальный замер выполнены перед тем, как были возобновлены проходческие работы по выемке оставшихся 366 м<sup>3</sup> нижележащих слоев камеры. Результаты замеров представлены в табл. 2, где отражены последующие этапы строительства:

- 5 этап – выемка около 100 м<sup>3</sup> камеры;
- 6 этап – выемка оставшегося объема камеры до отм. -387 м;
- 7 этап – выемка 30 м<sup>3</sup> ниши на отм. -387 м;

В обеих таблицах замеренные значения представлены нарастающим итогом относительно первоначальных базисов соответствующих реперных линий. Отрицательные значения соответствует сжатию, положительные – растяжению линий.

Таблица 1

**Результаты замеров абсолютных сдвижений реперов (мм)  
и относительных деформаций (мм/м) реперных линий  
в камерах опрокидывателя и дробилки**

№ линии	Первоначальный базис линии, мм	Этапы проходческих работ							
		1-й этап		2-й этап		3-й этап		4-й этап	
		мм	мм/м	мм	мм/м	мм	мм/м	мм	мм/м
I	6379,6	-0,1	-0,02	-1,7	-0,27	-2,4	-0,38	-2,3	-0,36
II	6369,8	-0,1	-0,02	-1,4	-0,22	-2,8	-0,44	-2,5	-0,39
III	6384,8	+0,1	+0,02	-0,5	-0,08	-3,8	-0,60	-3,8	-0,60
IV	6416,6	±0	±0	-0,3	-0,05	-3,1	-0,48	-3,6	-0,56
V	10513,5	-0,9	-0,09	-3,7	-0,35	-4,9	-0,47	-4,8	-0,46
VI	10534,4	-0,8	-0,08	-3,2	-0,30	-3,9	-0,37	-4,1	-0,39
VII	8314,3	-3,6	-0,43	-16,6	-2,00	-	-	-	-
VIII	8357,2	-4,5	-0,54	-31,5	-3,77	-39,1	-4,68	-39,8	-4,76

Таблица 2

**Результаты замеров абсолютных сдвижений реперов (мм)  
и относительных деформаций (мм/м) реперных линий в камере дозаторной**

№ линии	Первоначальный базис линии, мм	Этапы проходческих работ							
		5-й этап		6-й этап (до взрыва)		6-й этап (после взрыва)		7-й этап	
		мм	мм/м	мм	мм/м	мм	мм/м	мм	мм/м
IX	4255,0	-2,2	-0,52	-2,9	-0,68	-2,8	-0,66	-2,9	-0,68
X	4305,5	-5,1	-1,18	-12,5	-2,90	-12,6	-2,93	-12,9	-3,00

Анализ результатов замеров по реперным линиям свидетельствовал о неупругом механизме деформирования крепи и приконтурного породного массива. Для крепи на это прежде всего указывали аномально большие значения относительной деформации. В незамкнутых конструкциях, таких как камера насосной и дробилки до бетонирования фундамента, это отражало, главным образом, податливость конструкции крепи и образование пластических шарниров в замке и основании свода. В камере дробилки эти шарниры наглядно прослеживались в местах нарушений бетона и прогиба арматуры. В камере насосной видимых следов нарушения бетона обнаружено не было, однако, судя по величине замеренной деформации реперной линии, трещины разрыва вполне могли быть на внешней поверхности крепи свода.

В замкнутых крепях, а именно: в камерах опрокидывателя, дробилки после бетонирования фундамента и дозаторной в месте установки реперных линий – определяющими становились уже пластические свойства самого конструкционного материала – бетона. При предварительном нахождении бетона в течение 7 – 10 лет под нагрузкой пластическая компонента его деформационных свойств, достигающая 2 – 3 мм/м, оказывалась исчерпана, что и имело место при нарушениях крепи в камере дробилки после возобновления проходческих работ на отметке – 333 м, а также в верхней части камеры дозаторной, когда к ней приблизился восстающий. Выемка дополнительных объемов породного массива и, соответственно, изменения его напряженного состояния обусловили нагружение в упругом режиме и хрупкое разрушение тех участков монолитной железобетонной крепи, где бетон утратил былую пластичность, поскольку был возведен за 7 – 10 лет до этого. Последующее деформирование нарушенных участков бетона происходило уже в соответствии с моделью запредельного поведения материала, а именно в форме неупругого смещения отдельных его частей (блоков) по образовавшимся трещинам.

Таким образом, можно было заключить, что, например, в камере дозаторной (см. табл. 2) прирост относительной деформации сжатия линии II, западный репер которой располагался на расстоянии менее метра от крупной (раскрытие 1 см) сколовой трещины бетонной крепи, на величину  $\Delta\varepsilon = -3 \text{ мм/м} = -0,003$  совершенно не соответствовал приросту напряжений  $\Delta\sigma$  упругого деформирования бетона с табличным модулем упругости  $E = 20000 \text{ МПа}$ , составляющим

$$\Delta\sigma = \Delta\varepsilon E = -60 \text{ МПа.}$$

С другой стороны, и прирост на величину  $\Delta\varepsilon = -0,6 \text{ мм/м}$  деформаций сжатия в камере опрокидывателя, где видимых нарушений бетона зафиксировано не было, также не мог отражать прироста напряжений в соответствии с упругой моделью, а именно:

$$\Delta\sigma = \Delta\varepsilon E = -12 \text{ МПа.}$$

При таком приросте напряжений в бетонной крепи, которая к этому времени уже была нагружена в результате выемки камеры опрокидывателя и дробилки, неизбежно проявились бы процессы разрушения. Очевидно, что в реальности имел место

неупругий механизм деформирования как материала, так и конструкции крепи в целом, и фактические напряжения бетона не превышали его предела прочности, т.е. -13 – -15 МПа.

О поведении приконтурного породного массива в соответствии с геомеханической моделью иерархически блочной неупругой среды свидетельствовали факты деформирования тех участков массива, которые находились на большом расстоянии от проходимых в то время выработок. Наиболее наглядно это явление проявилось в приросте деформаций реперных линий III и IV в камере опрокидывателя в период 08.11.95 – 05.04.00, когда ближайšie проходческие работы проводились в рудоспуске, т.е. на расстоянии более 20 м. Причем в это же время деформации двух других линий I и II камеры и верхних линий V и VI камеры дробилки, которые находились ближе к проходческим работам, были существенно меньшими (см. табл. 1). Полученные данные не вписывались в модель деформирования сплошной упругой среды, согласно которой перераспределение напряжений породного массива, обусловленное выемкой некоторой его области (объема), происходит практически мгновенно и проявляется на расстоянии не более 1,5 – 2 диаметра вынудой области. Между тем с позиции модели поведения блочной среды замеренные значения деформаций оказывались вполне объяснимы, как являющиеся следствием взаимных неупругих смещений отдельных геоблоков по существующим структурным ослаблениям породного массива. Эти смещения могли быть спровоцированы как проходкой рудоспуска, так и продолжающимся во времени влиянием выемки последнего слоя камеры дробилки. Согласно установленным закономерностям деформирования массива скальных горных пород в условиях блочной геомеханической модели переход напряженной среды к новому равновесному состоянию оказывается растянут во времени и происходит путем серии знакопеременных длиннопериодных колебаний отдельных геоблоков. Возможность влияния внешних факторов, в частности фактора смещения геоблоков более крупномасштабных иерархических уровней, в данном случае представлялась маловероятной с учетом незначительности замеренных деформаций по другим линиям.

В пользу блочной модели были также интерпретированы результаты замеров в камере дозаторной (см. табл. 2), хотя полученные значения и находились на пределе точности метода. Выемка 30 м<sup>3</sup> ниши на отметке -387 м практически не вызвала деформирования реперных линий, расположенных на 10 м выше. Однако спустя месяц при отсутствии проходческих работ по линии II, расположенной на более нарушенном участке крепи, был зафиксирован прирост сжатия на 0,3 мм.

На блоковый механизм деформирования приконтурного породного массива указывала также и несогласованность смещений реперов камеры опрокидывателя: реперов линий I и IV, установленных в породе, с реперами линий II и III, закрепленными на контуре бетонной крепи. Несмотря на разнесение указанных линий в каждой паре на расстояние, не превышающее 2 м, замеренные значения деформаций, даже если судить только по качественным параметрам (см. табл. 1), явно отражали подвижку отдельных породных блоков приконтурного массива.

При этом на участках, где подвижки породного массива превышали возможности пластического деформирования конструкции и материала крепи горных выработок, происходили частичные разрушения бетона и его последующее запредельное деформирование. В любом случае, после прекращения техногенного воздействия происходило затухание деформаций крепи и устойчивое состояние выработок сохранялось, поскольку главным расчетным параметром, определяющим напряженное состояние и, соответственно, устойчивость крепи выработок, являлась неупругая деформация окружающего массива, но не нагрузка на кровлю выработок от собственного веса свода разрушенных пород, которые были закреплены путем тампонажа.

По результатам натурных исследований был сделан практический вывод, что при условии стабильности напряженно-деформированного состояния окружающего

породного массива и, соответственно, отсутствии подвижек геоблоков крепь выработок околоствольных дворов гор. –320 и –480 м будет находиться в устойчивом состоянии, в том числе и на некогда нарушенных участках.

В качестве профилактических предусмотрены следующие мероприятия:

- 1) по контролю за динамическим состоянием тектонического разлома;
- 2) по ограничению подвижности геоблоков приконтурного массива в нижней части камеры дозаторной, непосредственно прилегающей к зоне разлома.

Для реализации первого мероприятия на поверхности шахтного поля запланирована установка реперной линии, пересекающей разлом. Второе мероприятие реализовано путем установки защитного железобетонного экрана из перфорированных труб из стали А-IV диаметром 83 мм с толщиной стенки 8 мм, установленных с шагом 0,25 м поперек разлома (см. рис. 2) для защиты проходческих работ в стволе от прорыва разрушенных пород вниз по разлому. Трубы одновременно являются железобетонными анкерами, способными эффективно ограничивать взаимные подвижки пересекаемых ими геоблоков приконтурного массива камеры дозаторной.

Расчеты и опыт применения аналогичных анкеров из перфорированных труб свидетельствуют, что несущая способность одного трубобетонного анкера на срез составляет порядка  $P = 1,5 - 2$  МН. Соответственно, при установке ряда анкеров с шагом 0,25 м, что составит  $N = 4$  анкера на  $1 \text{ м}^2$  породного массива, сцепление между структурными блоками, пересекаемых трубами, повышается на  $\Delta C = 6 - 8$  МПа. Таким образом, при ориентировочной величине сцепления между структурными блоками сиенитово-порфиритового массива, прилегающего к тектоническому разлому и камере дозаторной, составляющей  $C = 1$  МПа, трубы защитного экрана обеспечивают сцепление между геоблоками  $C' = 7 - 9$  МПа, т.е. повышают его почти на порядок.

В качестве дополнительной профилактической меры для повышения жесткости приконтурного массива камеры было признано наиболее целесообразным крепление традиционными железобетонными анкерами с использованием уже пробуренных по сетке  $2 \times 2$  м 48 разведочных шпуров глубиной 3 м. При 16- миллиметровом диаметре стержня из стали периодического профиля А-III несущая способность одного анкера составляет около  $P = 0,08$  МН. Таким образом, анкерование по сетке  $2 \times 2$  м, т.е.  $N = 0,25$  анкер/ $\text{м}^2$ , повысило междублоковое сцепление породного массива на  $\Delta C = 0,02$  МПа, увеличив при этом равномерность нагружения бетонной крепи камеры, предотвращая возникновение сосредоточенных разрушающих нагрузок при подвижках отдельных геоблоков приконтурного массива.

Для ремонта нарушенных участков крепи использован набрызгбетон, поскольку повышения несущей способности существующей крепи не требовалось. Толщина же слоя набрызгбетонного крепления была принята минимальной, порядка 3 – 5 см, т.к. его цель – предотвращение случайных вывалов отслоившихся пластин бетона, главным образом из кровли камер дробилки и дозаторной.

### *Заключение*

Полученные результаты натурных и аналитических исследований позволили сделать заключение, что первопричиной произошедших нарушений крепи дробильно-водоотливного комплекса горизонта –320 м шахты «Южная» Гороблагодатского месторождения явились деформации окружающего породного массива, происходившие на двух масштабных уровнях вследствие техногенного воздействия горных работ: на базах порядка 100 и более метров – подвижки геоблоков, обусловленные динамическим воздействием крупномасштабного тектонического разлома, которое было спровоцировано выпуском из него породы и закачкой тампонажного раствора; на базах порядка 10 м – блоковые подвижки приконтурного породного массива, обусловленные изменениями его напряженно- деформированного состояния вследствие ведения проходческих работ.

Показан успешный опыт решения проблемы обеспечения устойчивости камерных выработок руддвора в условиях, когда ствол оказался запроектирован на пересечении с геодинамически активным крупным разломом. Выработки дробильно-водоотливного комплекса необходимо было возводить при негативном воздействии геодинамических движений, спровоцированных процессами строительства, в результате чего их крепь деформировало и ломало.

### Список литературы

1. Сашурин А.Д., Панжин А.А., 2020. Современные проблемы и задачи геомеханики. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 188 – 198.
2. Харисов Т.Ф., Балек А.Е., Озорнин И.Л., 2020. Обоснование регламента проходки параллельных взаимовлияющих выработок в напряженных трещиноватых скальных массивах. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 331, № 10, С. 71 – 79.
3. Захаров В.Н., Федоров Е.В., Еременко В.А., Лагутин Д.В., 2018. Геомеханическое обеспечение проектирования отработки запасов каменной соли на Илецком месторождении. *Горный журнал*, № 2, С. 41 – 47.
4. Каюмова А.Н., Балек А.Е., Харисов Т.Ф., 2022. Устойчивость камерных и сближенных выработок в сложных горно-геологических условиях. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*, № 2, С. 296 – 312.
5. Avdeev A., Sosnovskaya E., Krinitsyn R., 2018. The geomechanical state of the mine "Mnogovershinnoe" lower levels monitoring. *VII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources". E3S Web of Conferences. September 25 – 27. Khabarovsk, Russia*, P. 20 – 25.
6. Islavath S. R., Deb D., Kumar H., 2020. Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V. 127, pp. 204 – 221.
7. Elrawy W.R., Abdelhaffez G.S., Saleem H.A., 2020. Stability assessment of underground openings using different rock support systems. *Rudarsko-geolosko-naftni zbornik*, V. 35(1), P. 49 – 64.
8. Qi F., Ma Z., 2019. Investigation of the Roof Presplitting and Rock Mass Filling Approach on Controlling Large Deformations and Coal Bumps in Deep High-Stress Roadways. *Latin American Journal of Solids and Structures [online]*, 16(4), pp. 24. DOI:10.1590/1679-78255586.
9. Zhengzheng Xie, Nong Zhang, Xiaowei Feng, Dongxu Liang, Qun Wei, Mingyue Weng, 2019. Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different supporting conditions in deep roadway during excavation period. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.*, vol. 123, 104122. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104122
10. Rust Wilhelm, 2015. *Non-Linear Finite Element Analysis in Structural Mechanics*. Switzerland: Springer International Publishing, 363 p.

### References

1. Sashurin A.D., Panzhin A.A., 2020. Sovremennyye problemy i zadachi geomekhaniki [Current problems and tasks of geomechanics]. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3 – 1, P. 188 – 198.
2. Kharisov T.F., Balek A.E., Ozornin I.L., 2020. Obosnovanie reglamenta pro-khodki parallel'nykh vzaimovliyaiushchikh vyrabotok v napriazhennykh treshchinovatykh skal'nykh massivakh [Substantiation of the regulations for the sinking of parallel mutually influencing workings in stressed fractured rock massifs]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, Vol. 331, № 10, P. 71 – 79.

3. Zakharov V.N., Fedorov E.V., Eremenko V.A., Lagutin D.V., 2018. Geomekhanicheskoe obespechenie proektirovaniia otrabotki zapasov kamennoi soli na Iletskom mestorozhdenii [Geomechanical support for the design of mining the rock salt reserves at the Iletsk deposit]. *Gornyi zhurnal*, № 2, P. 41 – 47.

4. Kaiumova A.N., Balek A.E., Kharisov T.F., 2022. Ustoichivost' kamernykh i sblizhennykh vyrabotok v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh [Stability of chamber and converged workings in difficult mining and geological conditions]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, № 2, P. 296 – 312.

5. Avdeev A., Sosnovskaya E., Krinitsyn R., 2018. The geomechanical state of the mine "Mnogovershinnoe" lower levels monitoring. *VII International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources". E3S Web of Conferences. September 25 – 27. Khabarovsk, Russia*, P. 20 – 25.

6. Islavath S. R., Deb D., Kumar H., 2020. Development of a roof-to-floor convergence index for longwall face using combined finite element modelling and statistical approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V. 127, pp. 204 – 221.

7 Elrawy W.R., Abdelhaffez G.S., Saleem H.A., 2020. Stability assessment of underground openings using different rock support systems. *Rudarsko-geolosko-naftni zbornik*, V. 35(1), P. 49 – 64.

8. Qi F., Ma Z., 2019. Investigation of the Roof Presplitting and Rock Mass Filling Approach on Controlling Large Deformations and Coal Bumps in Deep High-Stress Roadways. *Latin American Journal of Solids and Structures [online]*, 16(4), pp. 24. DOI:10.1590/1679-78255586.

9. Zhengzheng Xie, Nong Zhang, Xiaowei Feng, Dongxu Liang, Qun Wei, Mingyue Weng, 2019. Investigation on the evolution and control of surrounding rock fracture under different supporting conditions in deep roadway during excavation period. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.*, vol. 123, 104122. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2019.104122

10. Rust Wilhelm, 2015. *Non-Linear Finite Element Analysis in Structural Mechanics*. Switzerland: Springer International Publishing, 363 p.

УДК 662.271:622.33

**Титов Роман Сергеевич**

старший научный сотрудник,  
лаборатория управления качеством  
минерального сырья,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [ukrigd15@mail.ru](mailto:ukrigd15@mail.ru)

**Кантемиров Валерий Данилович**

кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией управления  
качеством минерального сырья,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [ukrkant@mail.ru](mailto:ukrkant@mail.ru)

**Яковлев Андрей Михайлович**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
лаборатория управления качеством  
минерального сырья,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [quality@igduran.ru](mailto:quality@igduran.ru)

**ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ОСВОЕНИЯ  
АК-ТАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
КАМЕННОГО УГЛЯ\****Аннотация:*

В настоящее время основной тенденцией горнодобывающего производства является усложнение условий разработки и связанные с этим горно-геологические риски освоения новых востребованных для народного хозяйства сложноструктурных месторождений. К разряду месторождений сложного геолого-морфологического строения относится участок Одегелдей Ак-Тальского каменноугольного месторождения в Республике Тыва. Приведены технические решения по снижению технико-технологических и горно-геологических рисков при отработке сложноструктурного месторождения каменного угля, реализация которых позволяет снизить их до приемлемого уровня, достаточного для рассмотрения инвестиционных проектов по его разработке. Рассмотрены варианты инфраструктурного обеспечения добычи угля, включая транспортную доступность месторождения и проблему электроснабжения предприятия и связанных с ним объектов. Установлены параметры разработки и экономические показатели, которые могут обеспечить приемлемый уровень эффективности добычи. Выполнена технико-экономическая оценка перспектив освоения участка Одегелдей, необходимость в которой связана с определенным дефицитом доступного для обеспечения городских котельных и частных домохозяйств угля.

*Ключевые слова:* сложноструктурное месторождение, каменный уголь, открытая отработка, модель карьера, схемы электроснабжения, транспортная инфраструктура, технические решения, риск, экономическая эффективность.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.016

**Titov Roman S.**

Senior Researcher,  
Quality management laboratory,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [ukrigd15@mail.ru](mailto:ukrigd15@mail.ru)

**Kantemirov Valery D.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of Quality management laboratory,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [ukrkant@mail.ru](mailto:ukrkant@mail.ru)

**Yakovlev Andrei M.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Quality management laboratory,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [quality@igduran.ru](mailto:quality@igduran.ru)

**SUBSTANTIATION OF OPTIONS  
FOR THE DEVELOPMENT  
OF THE AK-TALSKY COAL DEPOSIT***Abstract:*

Currently, the main trend of mining production is the complication of the development conditions and the associated mining and geological risks of developing new complex-structured deposits that are in demand for the national economy. The Odegeldey section of the Ak-Talsky coal deposit in the Republic of Tyva belongs to the category of deposits of complex geological and morphological structure. This article presents technical solutions to reduce technical and technological as well as mining and geological risks during the development of a complex-structured coal deposit, the implementation of which allows to reduce them to an acceptable level sufficient for consideration of investment projects for its development. Options for infrastructural support of coal mining are considered, including transport accessibility of the deposit and the problem of power supply to the enterprise and related facilities. The development parameters and economic indicators that can provide an acceptable level of production efficiency have been established. The article presents a technical and economic assessment of the prospects for the development of the Odegeldey section, the need for which is associated with a certain shortage of coal available to provide urban boiler houses and private households.

*Key words:* complex-structured deposit, coal, open-pit mining, quarry model, power supply schemes, transport infrastructure, technical solutions, risk, economic efficiency.

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания №1, тема «Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горно-технических систем» (2022–2024) (FUWE-2022-0005), пер. № 1021062010531-8-1.5.1.

### *Введение*

Ак-Тальское каменноугольное месторождение расположено в центральной части Республики Тыва в северных предгорьях хребта Танну-Ола. По данным геологических отчетов 1970-х годов месторождение состоит из 3-х участков: Чалама, Кесарыг и Одегелдей, удаленных, соответственно, друг от друга на 18 и 4 км.

Наиболее перспективным для открытой разработки является пласт № 1 участка Одегелдей. Всего на участке каменные угли представлены тремя пластами – двумя крупными № 1 и 2 и одним более мелким № 3. Участок Одегелдей Ак-Тальского угольного месторождения находится на правом берегу р. Элегест в 140 км от столицы региона г. Кызыла. Вблизи участка в 2-х км на северо-восток находится с. Холчук, которое связано с пос. Хову-Аксы грунтовой дорогой (расстояние до Ак-Тала – 25 км, до с. Холчук – 43 км).

Пласт № 1 сложного строения с углом падения в 20° имеет запасы чистого угля (без породных пропластков) по категориям В+С<sub>1</sub> – 3,7 млн т. Запасы подсчитаны до глубины 109 м, средняя истинная мощность пласта (чистого угля) составляет 8,1 м. Угли Одегелдейского участка по ГОСТ 25543-2013 относятся к марке СС (слабоспекающиеся), со средней теплотой сгорания 6,8 Мкал/кг и зольностью до 20 %. Угли характеризуются высокой зольностью и трудной обогатимостью и могут быть рекомендованы к использованию в качестве энергетического топлива.

Целью исследований является технико-экономическая оценка перспектив освоения участка Одегелдей Ак-Тальского месторождения каменного угля.

В свою очередь, основной целью освоения месторождения является возможность обеспечить углем социально значимые объекты в г. Кызыл и окрестностях (местные котельные, частные домохозяйства и др.).

### *Материалы исследований*

По результатам горно-геометрического анализа расчетные запасы угля пласта № 1 участка Одегелдей в границах проектируемого карьера с глубиной отработки 100 м следующие:

- объем балансовых запасов в границах пласта № 1, обрабатываемого карьером глубиной 100 м, составляет по категориям В+С<sub>1</sub> – 3,69 млн т;
- объем вскрышных скальных и полускальных пород в границах карьера – 26,6 млн м<sup>3</sup>;
- текущий коэффициент вскрыши в границах карьера – 7,2 м<sup>3</sup>/т;
- количество некондиционного угля пласта № 1 составляет – 4,88 млн т (3,42 млн м<sup>3</sup>) или 56,9 % от общих геологических запасов в контурах карьера (в 1,3 раза больше обрабатываемых балансовых запасов угля в этих же контурах).

Элементом новизны данной работы является разработанный метод обоснования границ ведения горных работ, основанный на оценке эффективности добычи балансовых запасов угольного пласта с комплексным анализом параметров его отработки 3-мя методами: горно-геометрическим анализом (графоаналитический метод), математического и компьютерного моделирования на базе современных геоинформационных технологий. Указанный подход позволяет получать удовлетворительный результат численного обоснования границ разработки при отсутствии ряда исходных экономических и других показателей.

Обоснование границ методом горно-геометрического анализа производилось для двух «условно» задаваемых вариантов границ ведения горных работ: карьер глубиной до 50 м (I-я очередь) и карьер для отработки всех балансовых запасов глубиной до 100 м (II-я очередь). Критерием выбора соответствующего варианта являлось выполнение заданных условий, таких как наименьший коэффициент вскрыши, обеспечение

безопасной отработки угля, соблюдения нормативных показателей потерь и разубоживания и т.д.

Обоснование границ открытых горных работ методом компьютерного моделирования выполнено на базе оцифрованных геологических данных 1970 – 1972 гг. (лаборатория УКР ИГД УрО РАН), построенных 3D моделей развития открытых горных работ с учетом горно-геологических и горнотехнических условий разработки карьера [1].

Линейные размеры карьера при полной отработке балансовых запасов угля пласта № 1 определялись с плана и разрезов его компьютерной модели и представлены на рис. 1 - 2, табл. 1.

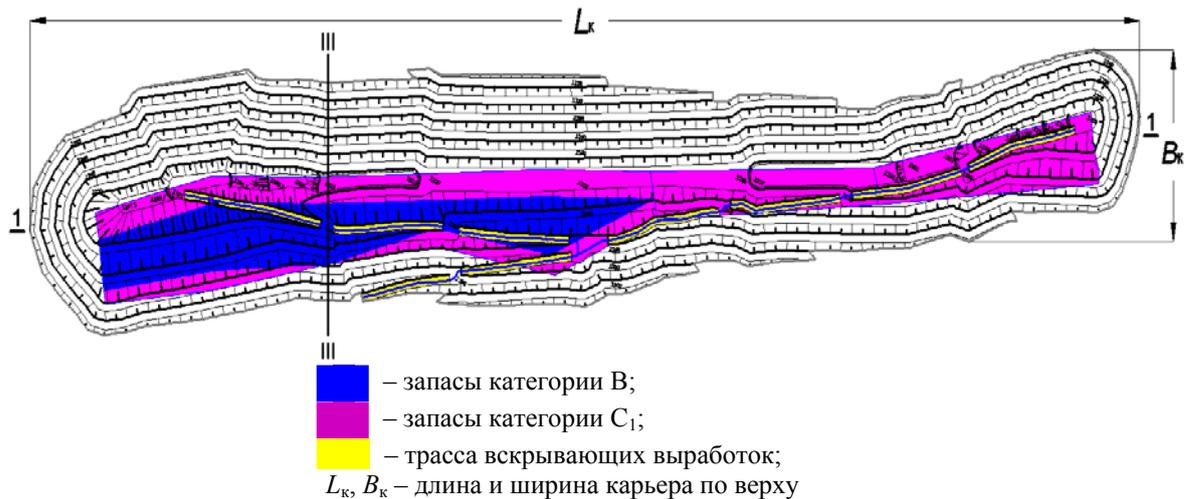


Рис. 1. План модели карьера (средний размер  $L_k \times B_k = 2500 \times 350$  м)

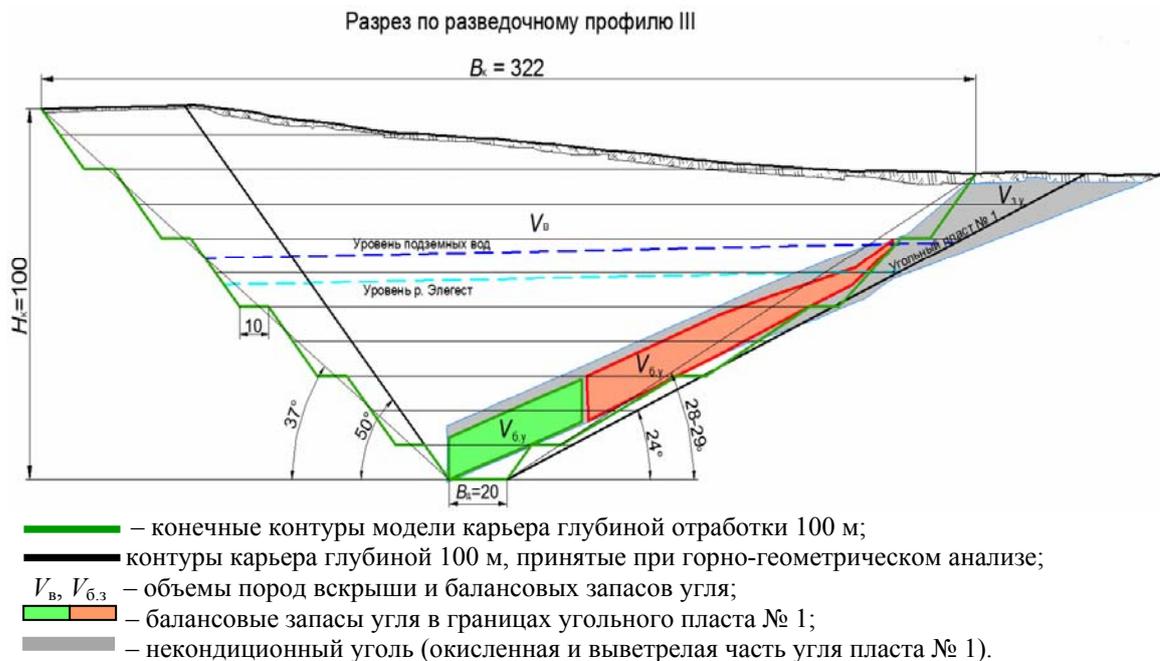


Рис. 2. Поперечный разрез модели карьера по разведочному профилю III

Таблица 1

## Основные параметры разрабатываемого карьера

№	Наименование показателей	Ед. изм.	Показатели
1	Площадь карьера по поверхности, $S_k$	тыс. м <sup>2</sup>	847,4
2	Глубина карьера, $H_k$	м	до 105
3	Длина карьера по поверхности, $L_k$	м	2500
4	Наибольшая ширина карьера по поверхности, $B_k^{\max}$	м	370
5	Средняя ширина карьера по поверхности, $B_k$	м	320
6	Углы погашения борта по углю, $\beta_{п.у}$	град.	20 – 26
7	Угол погашения борта по вскрыше, $\beta_{п.в}$	град.	36 – 37
8	Средний угол погашения борта, $\beta_{п}$	град.	29
В конечных контурах карьера			
9	Объем горной массы	тыс. м <sup>3</sup>	28 705
10	Эксплуатационные запасы руды	тыс. т	3 698
		тыс. м <sup>3</sup>	2 586
11	Объем вскрышных пород	тыс. м <sup>3</sup>	26 119
12	Средний коэффициент вскрыши, $k_b$	м <sup>3</sup> /т	7,2
		м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	10,1

Реализация математического метода обоснования границ карьера включает проверку принятой глубины карьера по следующей модели:

$$H_{к.к} = \frac{H_{к.п} \operatorname{ctg} \beta_p}{\operatorname{ctg} \beta_n} = \frac{-P_d + \sqrt{P_d^2 - 4\pi(S_d - M_n L_d [1 + k_b])}}{2\pi \operatorname{ctg} \beta_n}; \quad (1)$$

$$M_n = \frac{m_n}{\sin \alpha_n} = \frac{h_n \cos \alpha_n}{\sin \alpha_n}, \quad (2)$$

где  $\beta_n$  – угол откоса нерабочего борта карьера, град;

$P_d$  – периметр дна карьера, м;

$S_d$  – площадь дна карьера, м<sup>2</sup>;

$B_d$  – ширина дна карьера, м;

$M_n$  – горизонтальная мощность пласта (балансовой части запасов), м;

$L_d$  – длина дна карьера (определяется длиной пласта по простиранию,  $L_d \sim L_n$ ), м;

$k_b$  – средний коэффициент вскрыши, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (м<sup>3</sup>/т);

$m_n$  – средняя истинная эксплуатационная мощность пласта, м;

$h_n$  – средняя вертикальная мощность пласта, м;

$\alpha_n$  – средний угол падения пласта, град.

Общий срок эксплуатации карьера (по отработке пласта № 1), исходя из количества утвержденных балансовых запасов угля и принятой годовой производительности по его добыче в 300 тыс. т/год, определяется следующим выражением, лет:

$$T_{з.к} = \frac{Q_{п.у}}{A_y} + (T_{0.1} + T_{0.2}) = \frac{Q_{б.у} k_n}{A_y} + T_{0.3} = \frac{Q_{б.у} (1 - \eta)}{A_y} + T_{0.3} = \frac{3698498 \times (1 - 0,1)}{300000} + 1,5 = 12,6, \quad (3)$$

где  $Q_{п.у}$  – промышленные запасы угля в контурах карьера, т;

$Q_{б.у}$  – утвержденные балансовые запасы угля в контурах карьера, т;

$k_n$  – коэффициент извлечения, учитывающий потери угля при добыче, дол. ед.;

$A_y$  – проектная производительность карьера по углю, т/год;

$T_{0.3}$  – время на освоение и затухание мощности карьера по добыче (1 – 2), год.

Разработку угольного месторождения участка Одегелдей предполагается вести открытым способом с применением в качестве основного выемочного оборудования на

вскрышных и добычных работах по вариантам привода (электропривод или дизельный) [2, 3]:

– на добыче угля гидравлического гусеничного экскаватора ЭО-5225 (прямая лопата, вместимость ковша  $2,5 \text{ м}^3$ ) (ООО «ВЗЭ Экспорт», г. Воронеж, дизельный привод);

– на вскрышных работах гусеничного экскаватора ЭКГ-5А (вместимость ковша  $5 \text{ м}^3$ ) (ПАО «Уралмашзавод» (УЗТМ) электропривод) или гусеничный дизельный экскаватор Komatsu PC1250 (прямая лопата, вместимость ковша до  $6,5 \text{ м}^3$ ).

Транспортирование горной массы выполняется автомобильным карьерным транспортом:

– вскрышных пород автосамосвалами БелАЗ-7547 грузоподъемностью 45 т - 8 шт.;

– угля на склад самосвалами-углевозами КАМАЗ-65801-Т5, грузоподъемностью 31 т – 2 шт.

Основная доля технологических перевозок карьера приходится на вскрышные породы.

По физико-механическим свойствам угли месторождения и вскрышная порода требуют предварительной подготовки буровзрывным способом.

Подготовка полезного ископаемого и вскрышных пород к выемке осуществляется буровзрывным способом с применением на бурении взрывных скважин станка шарошечного бурения СБШ-250МНА-32 с диаметром скважин 200 мм (для угля) и 250 мм (для вскрышных пород) (ООО УК «Рудгормаш», г. Воронеж, электропривод высоковольтного исполнения) или СБШ-250Д (дизельное исполнение).

Взрывная подготовка вскрышной породы производится с помощью взрывчатого вещества Граммонит 79/21, угля – Граммонит Д5 [4]. Для производства взрывных работ предусмотрено привлечение специализированной организации.

На вспомогательных работах, в карьере, на отвале и складе готовой продукции предполагается использовать бульдозер с емкостью отвала  $11,9 \text{ м}^3$  и фронтальный колесный погрузчик с вместимостью ковша  $2,4 \text{ м}^3$ .

Добытый уголь из забоя транспортируется самосвалами-углевозами КАМАЗ-65801-Т5 (г/п 31 т) на угольный склад готовой продукции.

Извлеченная вскрыша вывозится автосамосвалами БелАЗ-7547 (г/п 45 т) во внешний отвал, расположенный в непосредственной близости от разрабатываемого карьера, часть скальных вскрышных пород используется для ремонта и строительства автодорог в пределах Одегелдейского участка месторождения.

Освоение участка Одегелдей связано с отсутствием в радиусе более 50 км необходимых объектов инфраструктур – автодорог с твердым покрытием и объектов электроснабжения (ЛЭП, трансформаторных подстанций и др.).

В связи с этим при разработке ТЭО освоения месторождения было рассмотрено три варианта схемы электроснабжения предприятия и связанных с предприятием объектов в близлежащем селе Холчук:

– *вариант 1* (базовый, условное обозначение Э1) – предусматривается строительство ЛЭП-35 кВ протяженностью 40 км до с. Холчук и ряда трансформаторных понизительных подстанций: 110/35 кВ – 1 шт., 35/6 кВ – 1 шт., 6/0,4 кВ – 1 шт. – и воздушных и кабельных линий электропередач (рис. 3);

– *вариант 2* (условное обозначение Э2) – энергообеспечение основных и вспомогательных объектов добычи обеспечивается дизельной электростанцией мощностью 2400 кВт напряжением на выходе 6 кВ, размещаемой на промплощадке в с. Холчук, по этому варианту предполагается строительство ряда трансформаторных понизительных подстанций, воздушных и кабельных линий электропередач (рис. 4);

– *вариант 3* (условное обозначение Э3) – предусматривает использование в карьере на основных и вспомогательных технологических операциях дизельного оборудования, при этом для электропитания отдельных групп вспомогательного оборудования предусматривается дизельная электростанция мощностью до 800 кВт и модернизация действующей трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ в с. Холчук (рис. 5).

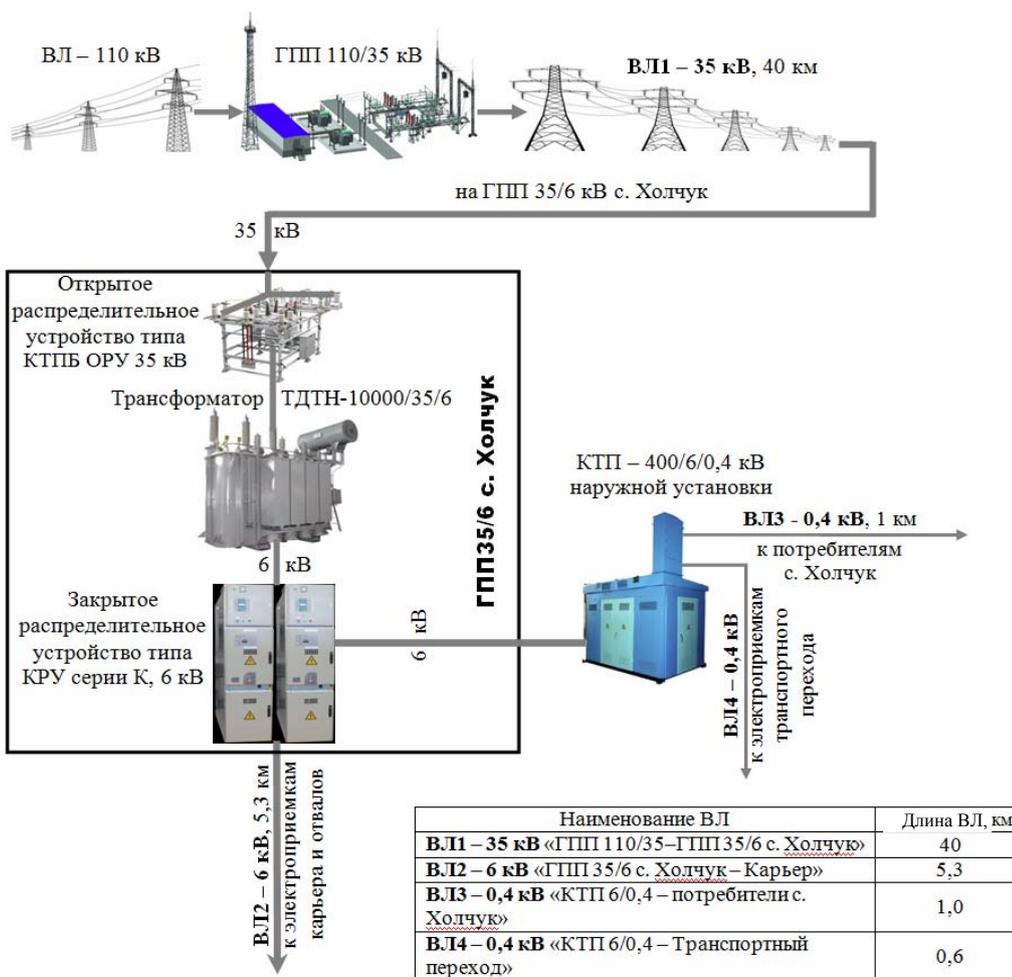


Рис. 3. Принципиальная схема электроснабжения по варианту 1 (Э1)

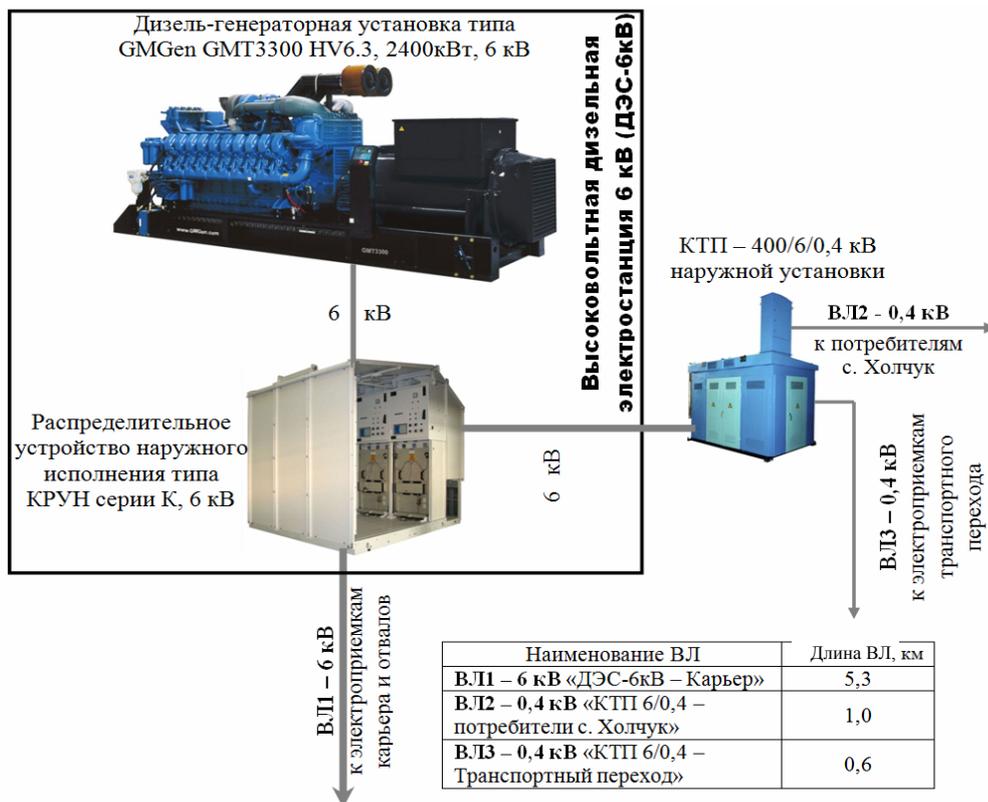


Рис. 4. Принципиальная схема электроснабжения по варианту 2 (Э2)

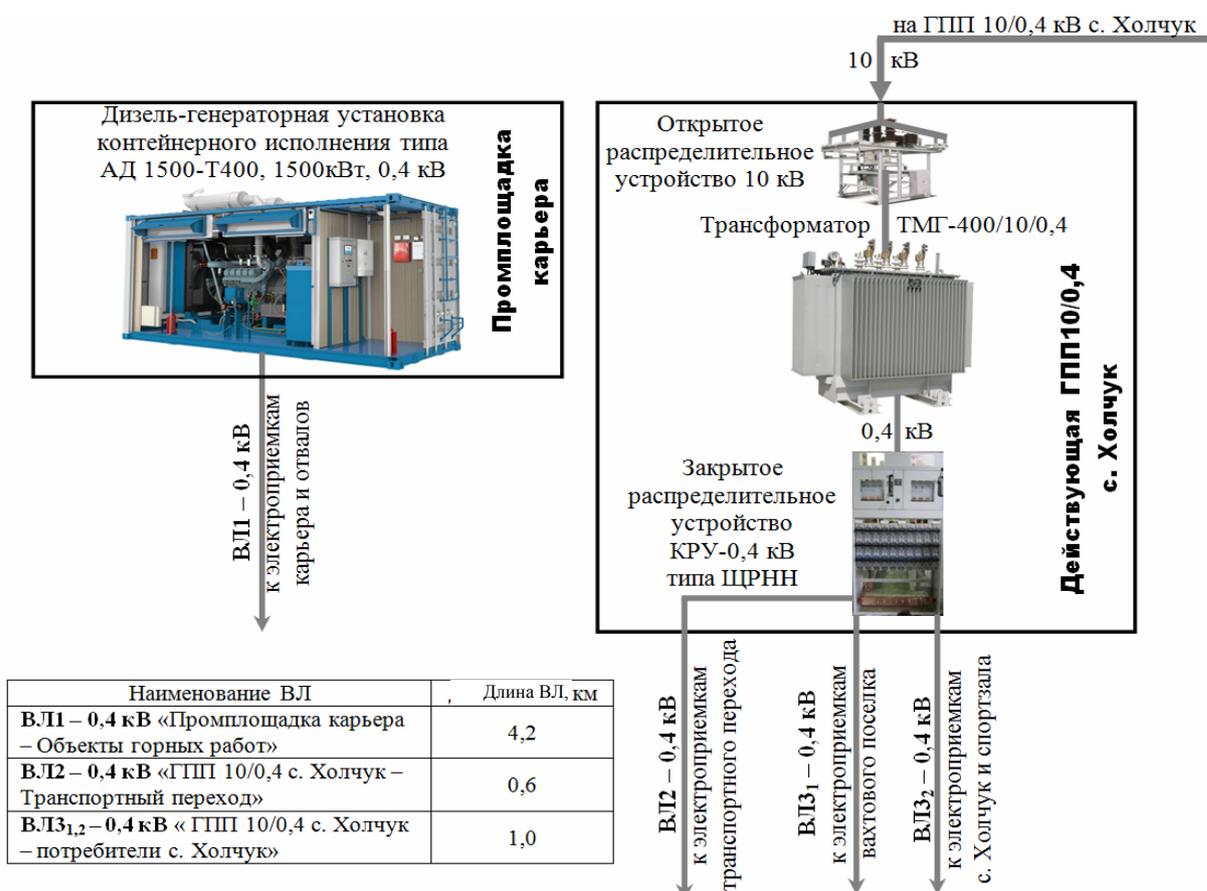


Рис. 5. Принципиальная схема электроснабжения по варианту 3 (ЭЗ)

Рассмотрено два варианта обеспечения безопасной транспортной доступности карьера:

- 1-й вариант – строительство новой автодороги IV категории с. Холчук – с. Ак-Тал протяженностью 20 км с выходом на существующую дорожную сеть района;
- 2-й вариант – ремонт существующей автодороги с. Холчук – с. Ак-Тал.

В настоящее время по действующей грунтовой автодороге с. Холчук – с. Ак-Тал производится круглогодичное движение низкой интенсивности.

По оцениваемому варианту строительства новой автодороги с. Холчук – с. Ак-Тал предлагается устройство насыпной (гравийной) автодороги в соответствии с п. 4.3 СП 34.13330.2012 и ГОСТ Р 52398-2005, которая относится к классу «дорога обычного типа» (не скоростная дорога) категории IV с расчетной интенсивностью движения от 200 до 2000 авт./сутки. Дорога имеет единую проезжую часть, доступ на которую возможен через пересечения и примыкания, расположенные не чаще, чем через 100 м. По технической классификации автомобильных дорог общего пользования ГОСТ Р 52398-2005, дорога IV категории может иметь 2 полосы движения с шириной по 3,0 м каждая, без центральной разделительной полосы. Расход материалов на строительство автодороги протяженностью 20 км представлен в табл. 2.

Таблица 2

**Расход материалов для строительства автодороги с. Холчук – с. Ак-Тал**

Объекты	Расход материалов, тыс. м <sup>3</sup>		
	Щебень	Смесь № С4	Песок
На 1 км дороги	1,6	1,63	0,06
Всего на дорогу (20 км)	32	32,6	1,2

При реализации варианта с ремонтом существующей автодороги решено использовать для подсыпки скальные породы текущей вскрыши (песчаники, алевролиты) после их предварительной подготовки (дробления, сортировки). Для этих целей предлагается использовать мобильный агрегат дробления и сортировки типа АДС-50-И (ДРО-755-А) производства ЗАО «Дробмаш» г. Выкса, который состоит из конусной дробилки, грохота самобалансного, транспортера приемо-передающего, транспортера разгрузки дробилки и транспортеров разгрузки грохота.

Оба варианта обеспечения транспортной доступности разрабатываемого карьера к автодорожной сети предусматривают обустройство технологического транспортного перехода через реку Элегест (рис. 6, табл. 3).

В состав транспортного перехода входят автомобильный мост через реку Элегест грузоподъемностью 60 т для одностороннего проезда груженых автосамосвалов-углевозов типа КАМАЗ-65801-Т5 (масса автосамосвала с грузом – 50 т) и порожних карьерных автосамосвалов БЕЛАЗ-7547 (грузоподъемностью – 45 т, масса порожнего а.с. – 33 т), предназначенных для перевозки вскрыши. Для проезда техники на гусеничном ходу и перевозки крупногабаритных грузов предусмотрен брод в 30 м от моста по течению реки.

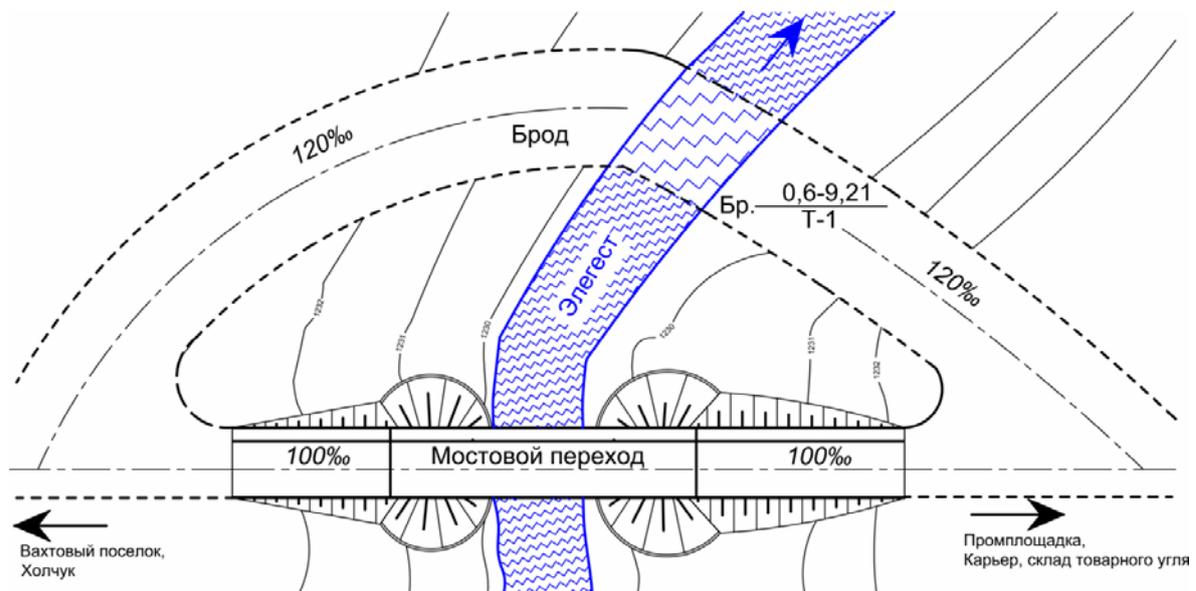


Рис. 6. Транспортный переход через реку Элегест

Таблица 3

**Параметры мостового перехода**

Параметры	Ед. изм.	Значение
Тип моста		малый
Длина моста	м	26
Количество полос	шт.	1
Ширина моста	м	6
Категория автодороги		III-в
Грузоподъемность моста	т	60
Нагрузка на ось	т	18
Интенсивность движения по мосту	авт./сут.	56 – 60

При разработке ТЭО был рассмотрен ряд дополнительных мероприятий, которые позволят снизить горно-геологические риски при разработке карьера.

Основные риски горно-геологического характера при разработке карьера следующие:

– вблизи от выходов угольного пласта находится русло р. Элегест (100 – 500 м), и на отдельных площадках мощность рыхлых отложений достигает 35 м, в связи с этим наиболее вероятным участком возникновения геомеханических рисков является Северо-западный борт карьера, расположенный вблизи р. Элегест (80 – 100 м);

– приток воды в карьер до глубины 25 м (до уровня р. Элегест) определен в  $0,8 \text{ м}^3/\text{час}$ , а в диапазоне глубин 25 – 100 м – до  $860 \text{ м}^3/\text{час}$ .

Для локализации геомеханических рисков при производстве горных работ рекомендуются следующие мероприятия:

– устройство противофильтрационной завесы барражного типа (рис. 7), которая сокращает поступление воды в выработанное пространство, тем самым снижая обводненность массива и вероятность деформации борта карьера;

– устройство системы открытого водоотлива и дренажа, обеспечивающих своевременное удаление воды из карьера с учетом максимальных водопротоков  $1250 \text{ м}^3/\text{час}$ .

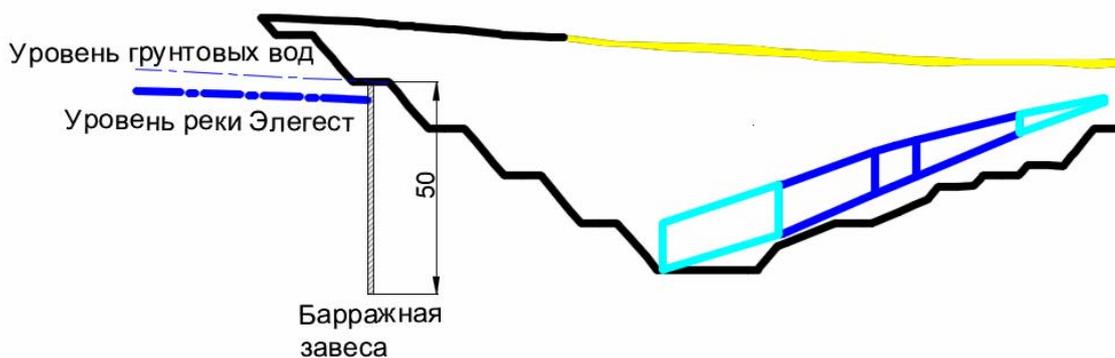


Рис. 7. Схема расположения «барражной» завесы в карьере

Противофильтрационная завеса устраивается на участке Северо-западного борта карьера в зоне (на горизонтах) с наиболее интенсивным притоком воды. Технологически завеса выполняет функции вертикальной перегородки, сокращающей фильтрацию подземных вод. Для создания завесы в массиве на рабочих горизонтах карьера проходятся скважины диаметром 160 мм буровым станком СБШ-250, через которые в массив закачиваются вяжущие растворы (бетон и др.) или противофильтрационные материалы (глина, суглинок). Длина завесы на опасном участке – до 50 м, расстояние между скважинами – 2 – 5 м.

На нижних горизонтах карьера (от 50 м и более) для сбора подземных вод и атмосферных осадков сооружается карьерный водосборник – зумпф-отстойник емкостью 4 – 4,5 тыс.  $\text{м}^3$ , обеспечивающий прием воды с максимальным притоком до  $1243,7 \text{ м}^3/\text{час}$ . На поверхность отстоянная вода подается передвижной насосной станцией карьерного водоотлива закрытого типа, оснащенной электронасосным агрегатом типа 1Д1250-125 с номинальной подачей  $1250 \text{ м}^3/\text{ч}$  и напором 125 м.

Сдерживающими факторами эффективного освоения месторождения являются следующие:

– недостаточная степень геологической изученности пласта № 1, что заключается в недостаточном объеме выполненных геологоразведочных работ, в т.ч. 33 разведочных и 59 картировочных скважин, до глубины 102 – 150 м, с сеткой 250×250 и 500×500 м, что недостаточно для оцениваемой площади (более 120 Га);

– объем утвержденных запасов не позволяет обеспечить длительный период поставок угля потребителям в г. Кызыл (не более 10 лет с начала эксплуатации карьера).

Для снижения влияния указанных факторов предложен комплекс технических решений:

– для снижения риска неподтверждения количественных и качественных показателей запасов угля рекомендуется выполнить эксплуатационную доразведку участков контактов рудных тел с пустой породой с сеткой 50×50 м (25×25 м) и глубиной до 150 м, с последующими исследованиями проб, подсчетом и корректировкой балансовых запасов;

– для продления срока эксплуатации карьера необходимо выполнить работы по обоснованию прироста утвержденных запасов после детальной разведки пласта № 2 по категориям В и С<sub>1</sub>, прогнозные ресурсы которого по категории Р<sub>1</sub> составляют 6,2 млн т, прирост запасов может составить до 2,8 млн т угля или ~ 10 лет дополнительной работы карьера и дополнительный доход до 800 млн руб. (рис. 8).

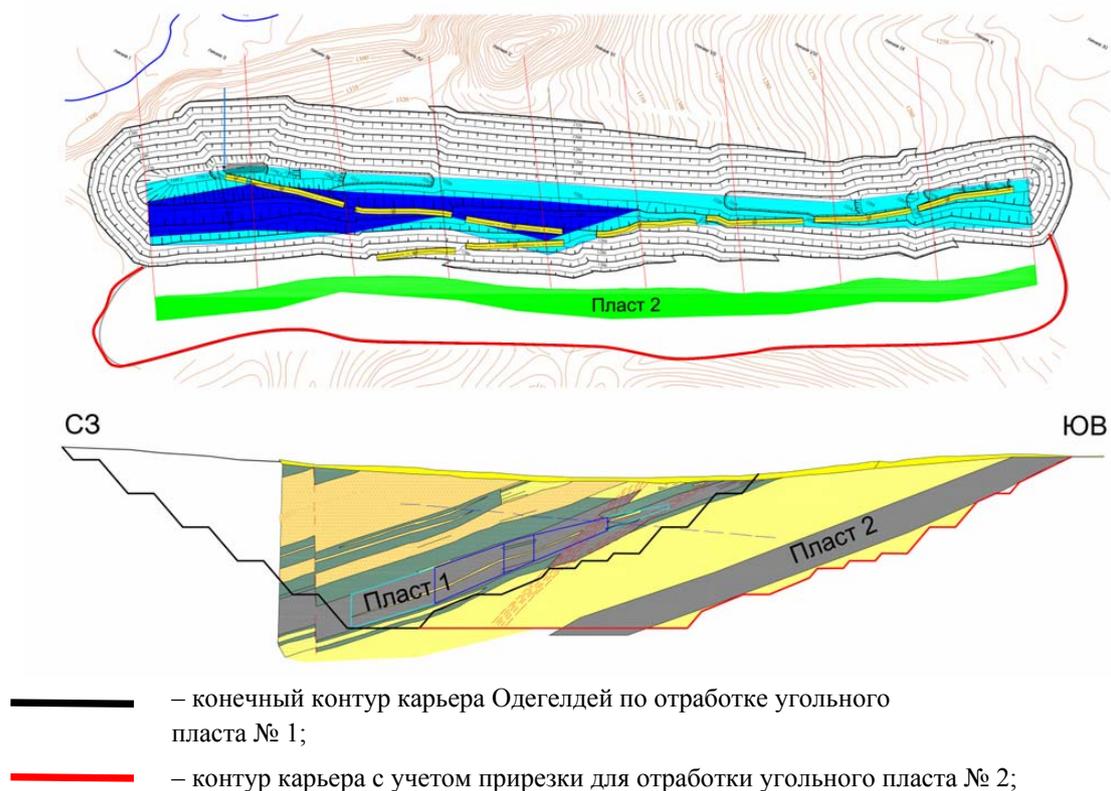


Рис. 8. Контурсы угольного карьера Одегелдей

Для уменьшения рисков снижения качественных показателей угля рекомендуется следующее [5 – 10]:

– внедрение мероприятий по стабилизации качества угля, включающих селективную выемку и сортировку угля в забое (сокращение разубоживания пустой породой);

– при этом селективная выемка угля производится гидравлическим экскаватором с емкостью ковша  $2,5 \text{ м}^3$ , за счет динамического управления ковшом в различных плоскостях, позволяющим с наименьшими потерями и разубоживанием производить разборку угольной массы в забое и отдельную выемку угля и породы;

– сепарацию засоренного угля на складе готовой продукции с помощью плоскостного сепаратора простой конструкции, который позволяет производить разделение материала на основе различия в форме частиц угля и породы и разной величины их коэффициентов трения. Простота конструкции сепаратора позволяет изготовить его собственными силами предприятия.

С учетом вышеизложенных горно-геологических условий освоения месторождения выполнена технико-экономическая оценка разработки карьера по вариантам строительства инфраструктурных объектов, включая организацию вахтового поселка в с. Холчук (табл. 4) [11 – 13].

Оценка необходимого объема инвестиций и ежегодных эксплуатационных затрат в условиях отсутствия исходной информации производилась с использованием профессионального программного комплекса ПК «Гранд-Смета 2020», который позволяет выполнить сметные расчеты по статьям затрат, включая проектирование объекта; стоимость материалов и оборудования; стоимость строительно-монтажных работ (СМР) и др.

Эффективность инвестиций оценена на основе расчетных динамических показателей:

- чистого дисконтированного дохода

$$NPV = \sum_{t=1}^n \alpha \times CF_t = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - IC_0; \quad (4)$$

- внутренней нормы доходности

$$\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} - IC_0 = 0; \quad (5)$$

- индекса доходности инвестиций

$$PI = \frac{NPV}{IC_0} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{IC_0}; \quad (6)$$

- срока окупаемости

$$PP = \left( \frac{IC_0}{CF_{cr}} \right) + T_c, \quad (7)$$

где  $CF_t$  – денежный поток в период времени  $t$ ;

$IC_0$  – объем начальных инвестиций;

$r$  – ставка дисконтирования (барьерная ставка);

$t$  – период оценки;

$IRR$  – ставка процента, которая показывает доходность инвестиций, или внутренняя норма доходности;

$CF_{cr}$  – расчетный среднегодовой доход от проекта;

$T_c$  – срок строительства объектов инфраструктуры, необходимых для освоения месторождения.

В табл. 4 представлены результаты сравнения вариантов освоения участка Одегелдей.

Таблица 4

**Технико-экономическая оценка сравниваемых вариантов**

Наименование показателя	Ед. измер.	Значение показателя по вариантам			
		1	2	3	4
Объем добычи угля	тыс. т/год	300	300	300	300
Численность персонала	чел.	149	149	149	149
<b>Всего первоначальных инвестиций, в т.ч.:</b>	<b>млн руб</b>	<b>1229,6</b>	<b>889,9</b>	<b>793,7</b>	<b>759,5</b>
Горнокапитальные работы, водоотлив, отвалообразование	-“-	149,1	149,1	149,1	149,1
Технологическое и вспомогательное оборудование с электроприводом	-“-	479,8	-	-	-
Технологическое оборудование с дизельным приводом	-“-	-	471,1	471,1	471,1
Энергоснабжение по вар. Э1(стр-во ЛЭП-35кВ с тр. подстанциями)	-“-	406,6	-	-	-
Энергоснабжение по варианту Э2 (дизельная электростанция)	-“-	-	75,6	75,6	-
Энергоснабжение по варианту Э3 (реконструкция ЛЭП-10 кВ)	-“-	-	-	-	41,40
Вахтовый поселок в с. Холчук	-“-	42,7	42,7	42,7	42,7
Строительство автодороги с. Холчук – Ак-Тал (20 км)	-“-	113,7	113,7	-	-
Ремонт автодороги с. Холчук – с. Ак-Тал (10 км) скальными вскрышными породами после дробления и сортировки	-“-	-	-	17,5	17,5
Технологический транспортный переход через реку Элегест	-“-	37,7	37,7	37,7	37,7
<b>Эксплуатационные расходы</b>	<b>млн руб/год</b>	<b>399,4</b>	<b>488,5</b>	<b>488,5</b>	<b>485,6</b>
<b>Отпускная цена угля</b>	<b>руб/т</b>	<b>2800</b>	<b>2500</b>	<b>2450</b>	<b>2450</b>
<b>Чистый дисконтированный доход</b>	<b>млн руб.</b>	<b>2031,23</b>	<b>1050,0</b>	<b>1030,3</b>	<b>1080,5</b>
Индекс доходности	доли ед.	1,63	1,17	1,27	1,40
<b>Срок окупаемости с учетом строительства инфраструктуры</b>	<b>лет</b>	<b>8,1</b>	<b>5,8</b>	<b>5,6</b>	<b>5,4</b>

*Результаты исследований*

Выполненная оценка вариантов освоения участка Одегелдей Ак-Тальского каменноугольного месторождения соответствует мировой практике предварительного технико-экономического обоснования (предТЭО) эффективности инвестиций в сложно реализуемый бизнес-проект. Стадия предТЭО позволяет более детально проанализировать альтернативные варианты проекта, т.к. на стадии бизнес-планирования это весьма трудоемко и требует дополнительных затрат.

Поскольку рассматриваемый объект имеет социально-экономическую направленность, то имеет значение размер отпускной цены на добываемый уголь для населения [14, 15]. На территории Республики Тыва осуществляется государственное регулирование цен на каменный уголь (Федеральный закон от 26.07.2006 г. № 135-ФЗ «О защите конкуренции»). Установлено, что в регионе цена на уголь (на 2020 г.) колеблется в диапазоне 2300 – 2700 руб/т, при этом наблюдается тенденция по ежегодному росту отпускной цены для населения на 3 – 5% (100 – 150 руб/год).

С учетом вышеизложенного рассмотрены варианты отпускной цены на уголь карьера Одегелдей в пределах от 1700 руб/т (со скидкой ~38 % к действующим ценам в регионе) до 2900 руб/т (с учетом тенденций роста отпускных цен). На рис. 9 представлено графическое обоснование оптимальной отпускной цены на уголь, которая позволяет обеспечить приемлемую эффективность (чистый дисконтированный доход) и срок окупаемости проекта с учетом его социальной значимости.

Результаты сравнения вариантов следующие:

- минимальная отпускная цена угля для получения приемлемых результатов по вариантам составляет 2450 – 2500 руб/т для *вариантов 2 – 4* и 2800 руб/т – для *варианта 1*;

- объем первоначальных инвестиций (капитальных затрат) *по варианту 1* больше на 350 – 470 млн руб по сравнению с *вариантами 2 – 4*, что объясняется строительством дорогостоящих инфраструктурных объектов;

- эксплуатационные затраты *по варианту 1* меньше по сравнению с *вариантами 2 – 3* на 296,7 млн руб/год и *варианту 4* – на 277 млн руб/год, соответственно, что объясняется использованием в *вариантах 2 – 4* преимущественно дизельного оборудования (в т.ч. *по вариантам 2, 3* – мощных дизельных электростанций), потребляющих в больших объемах дорогостоящее дизельное топливо до 4,76 тыс. т/год (5,8 млн л/год);

- при соответствующей отпускной цене угля чистый дисконтированный доход (ЧДД) проекта *по варианту 1* больше на 1243,9 млн руб. и сроке окупаемости инвестиций с учетом времени строительства дополнительной инфраструктуры (ЛЭП-35 кВ, автодорога, спортзал) – 8,1 года.

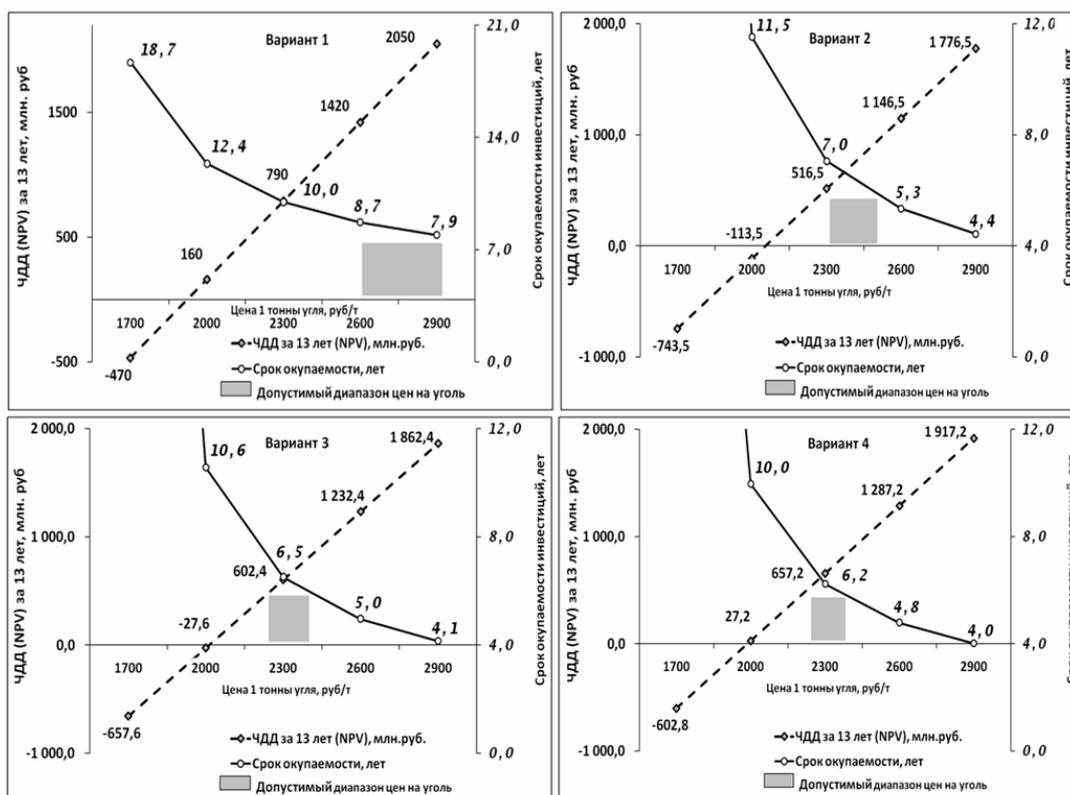


Рис. 9. Оценка эффективности вариантов освоения месторождения в зависимости от отпускной цены угля

### Выводы

Рассмотренные варианты освоения месторождения имеют достоинства и недостатки.

Достоинства вариантов:

*Вариант 1* – возможность реализовать в проекте строительство важных для развития региона инфраструктурных объектов, таких как ЛЭП-35 кВ протяженностью 40 км с понизительными подстанциями, автодороги IV категории протяженностью 20 км; меньшие из всех вариантов эксплуатационные затраты (меньше на 86 - 89 млн руб/год по вариантам);

*Варианты 2, 3* – быстрый ввод в строй объектов энергоснабжения карьера (за счет быстромонтируемых мощных дизельных электростанций);

*Вариант 4* – имеет наименьший по сравнению с другими вариантами объем первоначальных инвестиций (< на 35 – 40 %), небольшой срок ввода карьера в эксплуатацию (1,5 – 2 года), возможность реконструкции действующей ЛЭП-10 кВ с трансформаторной подстанцией в с. Холчук.

Недостатки вариантов:

*Вариант 1* – большой объем первоначальных инвестиций по сравнению с другими вариантами, значительный период времени (4,5 – 5 лет) от начала финансирования проекта до получения товарного угля в связи со строительством масштабных объектов инфраструктуры (в первую очередь ЛЭП-35 кВ); увеличение отпускной цены угля до 2800 – 2900 руб/т для достижения эффективности проекта;

*Варианты 2 – 4* – повышенные эксплуатационные затраты по сравнению с *вариантом 1* вследствие использования технологического оборудования на дорогостоящем дизельном топливе и дизельных электростанций для электроснабжения карьера, усложнение организации работ в связи с необходимостью доставки в регион значительных объемов дизтоплива – до 4,6 тыс. т/год.

Следует отметить, что любой из рассмотренных вариантов освоения участка Одегелдей может быть успешно реализован, однако с точки зрения перспектив развития региона и последующего комплексного освоения минерально-сырьевых ресурсов более предпочтительным является *вариант 1*, позволяющий обеспечить транспортную и энергетическую доступность района добычи.

Представленная оценка вариантов освоения месторождения каменного угля выполнена на уровне предварительного технико-экономического обоснования эффективности инвестиций. При этом были реализованы методы комплексного анализа параметров отработки карьера по вариантам с использованием графоаналитического, математического и метода компьютерного моделирования на базе современных геоинформационных технологий.

Предложенные методы позволяют при отсутствии многих исходных данных получать результаты, необходимые для дальнейшего проектирования объекта разработки, и рекомендуются для обоснования эффективности отработки сложноструктурных месторождений.

### Список литературы

1. Арсентьев А.И., 1982. *Принятие решений о параметрах карьера*. Ленинград: ЛГИ, 60 с.
2. Кантемиров В.Д., 2021. Оценка технологических решений по комплексному освоению Ельничного месторождения магнетита. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, №. 5 – 1, С. 29 – 40.
3. Кантемиров В.Д., 2014. Технологические особенности освоения новых сырьевых баз. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 6, С. 369 – 373.

4. Кутузов Б.Н., Белин В.А., 2012. *Проектирование и организация взрывных работ*. Москва: Издательство «Горная книга», 416 с.
5. Кубиньски В., Кубиньска-Ябцон Е., Петров А., Сала Д., Савон Д.Ю., 2017. Анализ рисков в горнодобывающей промышленности, связанных с безопасностью работы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 11, С. 168 – 176.
6. Цветкова А.Ю., 2011. Обзор основных рисков предприятий горнодобывающей и металлургической отраслей в современных условиях. *Записки Горного института*, Т. 194, С. 339 – 343.
7. Карташова Н.А., 2017. Разработка предложений по совершенствованию системы управления рисками на предприятии горнодобывающей отрасли Северо-Востока России (на примере АО «Чукотская горно-геологическая компания», рудник «Купол»). *Международный научно-исследовательский журнал*. № 8(50), Ч. 1, С. 38 – 43.
8. Малашкина В.А., Погорелая Ю.В., 2012. Сравнение методов оценки и анализа рисков на горнодобывающих предприятиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 12, С. 267 – 279.
9. Шаклеин С.В., Рогова Т.Б., 2009. *Оценка риска пользования недрами*. Учеб. пособие. Кемерово: Изд-во ГУ КузГТУ, 120 с.
10. Петросов А.А., 2009. *Стратегическое планирование, прогнозирование, экономические риски горного производства*. Москва: «Мир горной книги», Издательство МГГУ, Издательство «Горная книга», 684 с.
11. Пешкова М.Х., 2003. *Экономическая оценка горных проектов*. Москва: Издательство МГГУ, 422 с.
12. Уварин Н.Л., 2002. *Экономические методы управления предприятием*. Москва: Издательство МГГУ, 500 с.
13. Мельников Н.Н., Бусырев В.М., 2001. *Экономические аспекты освоения месторождений*. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 156 с.
14. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М., Козлова М.В., 2020. Технологические особенности открытой разработки высокочистого кварца. *Известия вузов. Горный журнал*, № 6, С. 14 – 25.
15. Кантемиров В.Д., Титов Р.С., Яковлев А.М., 2019. Анализ эксплуатационных показателей горнодобывающего оборудования ведущих железорудных карьеров России. *Известия вузов. Горный журнал*, № 2, С. 40 – 50.

## References

1. Arsent'ev A.I., 1982. Prinyatie reshenii o parametrakh kar'era [Making decisions about career parameters]. Leningrad: LGI, 60 p.
2. Kantemirov V.D., 2021. Otsenka tekhnologicheskikh reshenii po kompleksnomu osvoeniyu El'nichnogo mestorozhdeniya magnezita [Evaluation of technological solutions for the complex development of the Yelnichny deposit of magnesite]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, №. 5 – 1, P. 29 – 40.
3. Kantemirov V.D., 2014. Tekhnologicheskie osobennosti osvoeniya novykh syr'evykh baz [Technological features of the development of new raw material bases]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 6, P. 369 – 373.
4. Kutuzov B.N., Belin V.A., 2012. Proektirovanie i organizatsiia vzryvnykh работ [Design and organization of blasting operations]. Moscow: Izdatel'stvo "Gornaia kniga", 416 p.
5. Kubin'ski V., Kubin'ska-Yabtson E., Petrov A., Sala D., Savon D.Yu., 2017. Analiz riskov v gornodobyvayushchei promyshlennosti, svyazannykh s bezopasnost'yu raboty. [Analysis of risks in the mining industry related to work safety]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 11, P. 168 – 176.
6. Tsvetkova A.Yu., 2011. Obzor osnovnykh riskov predpriyatii gornodobyvayushchei i metallurgicheskoi otraslei v sovremennykh usloviyakh [Overview of the main risks at min-

ing and metallurgical enterprises in modern conditions]. Zapiski Gornogo instituta, Vol. 194, P. 339 – 343.

7. Kartashova N.A., 2017. Razrabotka predlozhenii po sovershenstvovaniyu sistemy upravleniya riskami na predpriyatii gornodobyvayushchei otrasli Severo-Vostoka Rossii (na primere AO "Chukotskaya gorno-geologicheskaya kompaniya", rudnik "Kupol") ») [Development of proposals for improving the risk management system at the enterprise of the mining industry in the North-East of Russia (on the example of the Chukotka Mining and Geological Company, Kupol mine)]. Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. № 8(50), Ch. 1, P. 38 – 43.

8. Malashkina V.A., Pogorelaya Yu.V., 2012. Sravnenie metodov otsenki i analiza riskov na gornodobyvayushchikh predpriyatiyakh [Comparison of risk assessment and risk analysis methods at mining enterprises]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 12, P. 267 - 279.

9. Shaklein S.V., Rogova T.B., 2009. Otsenka riska pol'zovaniya nedrami [Assessment of the risk of subsurface use]. Ucheb. posobie. Kemerovo: Izd-vo GU KuzGTU, 120 p.

10. Petrosov A.A., 2009. Strategicheskoe planirovanie, prognozirovanie, ekonomicheskie riski gornogo proizvodstva [Strategic planning, forecasting, economic risks of mining production]. Moscow: "Mir gornoj knigi", Izdatel'stvo MGGU, Izdatel'stvo "Gornaya kniga", 684 p.

11. Peshkova M.Kh., 2003. Ekonomicheskaya otsenka gornykh proektov [Economic assessment of mining projects]. Moscow: Izdatel'stvo MGGU, 422 p.

12. Uvarin N.L., 2002. Ekonomicheskie metody upravleniya predpriyatiem [Economic methods of enterprise management]. Moscow: Izdatel'stvo MGGU, 500 p.

13. Mel'nikov N.N., Busyrev V.M., 2001. Ekonomicheskie aspekty osvoeniya mestorozhdenii [Economic aspects of field development]. Apatity: Izd. KNTs RAN, 156 p.

14. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M., Kozlova M.V., 2020. Tekhnologicheskie osobennosti otkrytoi razrabotki vysokochistogo kvartsa . [Technological features of the open development of high-purity quartz]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, № 6, P. 14 - 25.

15. Kantemirov V.D., Titov R.S., Yakovlev A.M., 2019. Analiz ekspluatatsionnykh pokazatelei gornodobyvayushchego oborudovaniya vedushchikh zhelezorudnykh kar'erov Rossii [Analysis of operational indicators of mining equipment at the leading iron ore quarries in Russia]. Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal, № 2, P. 40 – 50.

УДК 662.271:622.1

**Андреева О.Н.**

старший научный сотрудник  
лаборатории устойчивости бортов  
карьеров и сдвижения горных пород,  
АО «Уралмеханобр»,  
620063, г. Екатеринбург, ул. Хохрякова, 87  
e-mail: [golovina\\_on@umbr.ru](mailto:golovina_on@umbr.ru)

**Кольцов П.В.**

кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией устойчивости  
бортов карьеров и сдвижения горных пород,  
АО «Уралмеханобр»  
e-mail: [Kpavel@umbr.ru](mailto:Kpavel@umbr.ru)

**Пыхтеева Н.Ф.**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры строительных конструкций  
и механики грунтов,  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
e-mail: [n.f.pykhiteeva@urfu.ru](mailto:n.f.pykhiteeva@urfu.ru)

**АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ  
КАРЬЕРА ЗАПАДНО-ОЗЕРНЫЙ  
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ  
ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ***Аннотация:*

Приведено решение актуальной задачи по обеспечению устойчивости участка борта для функционирования транспортного съезда. В 2020 г. на карьере Западно-Озерного месторождения произошло обрушение группы уступов юго-восточного борта. Эксплуатация транспортного съезда была приостановлена для ликвидации последствий деформационных процессов. Сотрудниками института «Уралмеханобр» было проведено обследование состояния участка деформации, выполнено моделирование исследуемого участка борта для определения фактического коэффициента запаса устойчивости и рассчитан необходимый проектный профиль борта карьера, обеспечивающий долговременную сохранность капитального съезда. Моделирование показало, что проектный угол не соответствует фактическим физико-механическим характеристикам вмещающих пород, кроме того, в проекте на отработку оценка производилась по средневзвешенным характеристикам вмещающих пород, без обоснования устойчивости верхних горизонтов, сложенных слабыми глинистыми породами.

Предметом исследований является устойчивость нарушенного участка юго-восточного борта карьера месторождения Западно-Озерное.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.032

**Andreeva O.N.**

Senior Researcher,  
Laboratory of quarry sides stability  
and rock movement,  
«Uralmekhanobr» JSC,  
620063 Ekaterinburg, 87 Khokhryakova Str.;  
e-mail: [golovina\\_on@umbr.ru](mailto:golovina_on@umbr.ru)

**Koltsov P.V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of the Laboratory of quarry sides stability  
and rock movement,  
«Uralmekhanobr» JSC,  
e-mail: [Kpavel@umbr.ru](mailto:Kpavel@umbr.ru)

**Pykhiteeva N.F.**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of building  
structures and soil mechanics,  
Ural Federal University n.a. the First President  
of Russia B.N.Yeltsin,  
620000 Ekaterinburg, 19 Mira Str.;  
e-mail: [n.f.pykhiteeva@urfu.ru](mailto:n.f.pykhiteeva@urfu.ru)

**ANALYSIS OF STABILITY OF SLOPES  
OF THE ZAPADNO-OZERNY PIT  
TO ENSURE MINING SAFETY***Abstract:*

The paper presents the solution of the urgent problem of ensuring the stability of the side section for the functioning of the transport exit.

In 2020, a group of ledges of the southeastern side fell down at the Zapadno-Ozernoye field quarry. The operation of the transport exit was suspended to eliminate the consequences of deformation processes. Employees of the «Uralmekhanobr» Institute conducted a survey of the state of the deformation site, carried out modeling of the studied section of the side to determine the actual coefficient of stability margin, and calculated the necessary design profile of the side of the quarry, ensuring the long-term safety of the capital exit. Modeling has shown that the design angle does not correspond to the actual physical and mechanical characteristics of the host rocks; in addition, in the project for testing, the assessment was made according to the weighted average characteristics of the host rocks, without substantiating the stability of the upper horizons composed of weak clay rocks.

The subject of the research is the stability of the disturbed section of the southeastern side of the quarry of the Zapadno-Ozernoye field.

The purpose of the work is to establish the causes of the deformations that have occurred, to determine the conditions under which the section of the southeastern side of the quarry will be in a stable condition, and to ensure long-term safe operation

Цель работы – установить причины возникших деформаций, определить условия, при которых участок юго-восточного борта карьера будет находиться в устойчивом состоянии, и обеспечить долговременную безопасную эксплуатацию капитального съезда.

Для достижения вышеперечисленных целей решены следующие задачи:

- оценка устойчивости фактического состояния участка деформаций;
- разработка рекомендаций по дальнейшей безопасной отработке запасов руды ниже деформирующегося участка борта карьера.

В процессе выполнения работы были рассмотрены проектные параметры бортов карьера Западно-Озерного месторождения, рассчитан фактический коэффициент запаса устойчивости участка деформаций, рекомендован новый контур, обеспечивающий долговременную устойчивость рассматриваемого участка.

На основании расчетов сделаны выводы о том, что одной из главных причин возникновения деформации на исследуемом участке стали завышенные проектные углы уступов, не соответствующие фактическим физико-механическим характеристикам пород, слагающих эти уступы.

Предприятию выданы рекомендации по дальнейшей отработке деформирующегося участка, возможной при выполнении работ по разному, согласно рекомендованному контуру.

*Ключевые слова:* карьер, инструментальные спутниковые наблюдения, визуальное обследование, наземное лазерное сканирование, деформации, обрушение, устойчивость бортов карьеров, откос, разнос участка борта.

of the capital exit.

To achieve the above mentioned goals, the following tasks have been solved:

- stability assessment of the actual state of the deformation site;
- development of recommendations for further safe mining of ore reserves below the deforming section of the quarry side.

In the course of the work, the design parameters of the sides of the Zapadno-Ozernoye field quarry were considered, the actual coefficient of stability of the deformation site was calculated, and a new contour was recommended to ensure the long-term stability of the site under consideration.

Based on the calculations, it was concluded that one of the main causes of deformation on the studied area were overestimated design angles of ledges that do not correspond to the actual physical and mechanical characteristics of the rocks composing these ledges.

The company was given recommendations for further development of the deforming area, what is possible when carrying out work on the separation, according to the recommended contour.

*Key words:* quarry, instrumental satellite observations, visual survey, ground laser scanning, deformations, collapse, stability of quarry walls, slope, separation of a side section.

## Введение

Важнейшими задачами на горном предприятии являются обеспечение устойчивости бортов карьера, своевременное предупреждение возникающих деформаций откосов и корректировка углов откосов в зависимости от изменяющейся горно-геологической обстановки как в процессе развития открытых горных работ, так и при постановке бортов в предельное положение на стадии доработки. Решение данных задач направлено на повышение безопасности и экономической эффективности горного производства, а также обеспечение сохранности прилегающих к карьерам территорий и расположенных на них объектов.

Разработка месторождений открытым способом должна сопровождаться комплексом маркшейдерско-геологического мониторинга состояния откосов уступов, бортов карьеров и отвалов для обеспечения их устойчивости, своевременного предупреждения развития деформаций и корректировки углов откосов в зависимости от изменяющейся горно-геологической ситуации и, в конечном итоге, обеспечения безопасности и эффективности ведения открытых горных работ.

Карьеры являются опасным производственным объектом, поэтому, несмотря на ведение горно-капитальных работ в строгом соответствии с проектной документацией, на них возможны проявления деформационных процессов. Предупреждением, установлением причин их развития и разработкой мероприятий по локализации либо ликвида-

ции занимаются специализированные организации, одной из которых является лаборатория устойчивости бортов карьеров и сдвижения горных пород отдела горной науки АО «Уралмеханобр».

В 2010 г. институтом «Уралмеханобр» был разработан Проект наблюдательной станции. С 2011 г. и по настоящее время на карьере, согласно проекту, проводится комплекс инструментальных мониторинговых наблюдений за состоянием устойчивости бортов карьера Западно-Озерного месторождения, который включает в себя спутниковые наблюдения по контрольным точкам, наземное лазерное сканирование и визуальное обследование состояния откосов уступов, предохранительных берм и прибортовой территории.

В 2020 г. на карьере Западно-Озерного месторождения произошло обрушение группы уступов юго-восточного борта. Эксплуатация транспортного съезда была приостановлена для ликвидации последствий деформационных процессов. Сотрудниками института «Уралмеханобр» было проведено обследование состояния участка деформации, выполнено моделирование исследуемого участка борта для определения фактического коэффициента запаса устойчивости и рассчитан необходимый проектный профиль борта карьера, обеспечивающий долговременную сохранность капитального съезда.

#### *Обследование участка деформаций*

Наименее устойчивыми участками на карьере являются верхние горизонты, где в течение продолжительного времени протекают плавные деформации откосов уступов, сложенных рыхлыми глинистыми породами наносов и интенсивно выветрелыми породами. На данных участках фиксируются деформационные процессы в виде осыпей и промоин. Данные деформации со временем увеличиваются в размерах и ведут к разрушению уступа и прибортовой поверхности. Одним из таких участков является восточный борт карьера (рис. 1).



Рис. 1. Деформации верхнего уступа восточного борта в августе 2019 г.

Средняя и нижняя группы уступов сложены трещиноватыми интенсивно выветрелыми андезит-дацитами. На данных горизонтах также наблюдаются локальные деформации в виде осыпей, обусловленные выветриванием пород в приоткосной части. В

октябре 2019 г. на участке восточного борта в отметках 470÷420 м произошел вывал горной массы. Обрушение зафиксировано на уступе, выше которого располагается транспортный съезд (рис. 2).



Рис. 2. Деформации восточного борта в отметках 470 – 420 м в октябре 2019 г.

В апреле 2020 г. также были зафиксированы деформации в виде локального обрушения уступа в отметках 497÷485 м и деформации в отметке 478,4 м (транспортный съезд) в виде просадки с размерами трещины: длина – 8,0 м, ширина – 0,1 – 0,15 м. В начале июня 2020 г. на юго-восточном борту карьера Западно-Озерного месторождения маркшейдерской службой предприятия было зафиксировано обрушение горной массы общим объемом 120 758 м<sup>3</sup>, со смещением ее в сторону выработанного пространства (рис. 3). Согласно паспорту обрушения, размеры деформации составили: длина по фронту – 140 м; глубина развития – 23 м.



Рис. 3. Деформации юго-восточного борта в отметках 504 – 400 м

Для определения причин и возможности локализации деформаций и дальнейшей безопасной отработки запасов руды институтом «Уралмеханобр» был проведен расчет устойчивости по участку деформации.

### Методика исследований

Оценка устойчивости участка юго-восточного борта карьера производилась с использованием программного комплекса «Откос» (продукция компании «Scad Office»). Программа включает в себя серию расчетных методик и позволяет выполнять многовариантные расчеты устойчивости откосов. Расчеты производились по методам Феллиниуса, Спенсера, Бишопа.

На рис. 4 представлены расчетные поверхности скольжения для оценки устойчивости фактического состояния участка деформаций. Полученные данные значения коэффициента запаса устойчивости (к.з.у) были сведены в табл. 1.

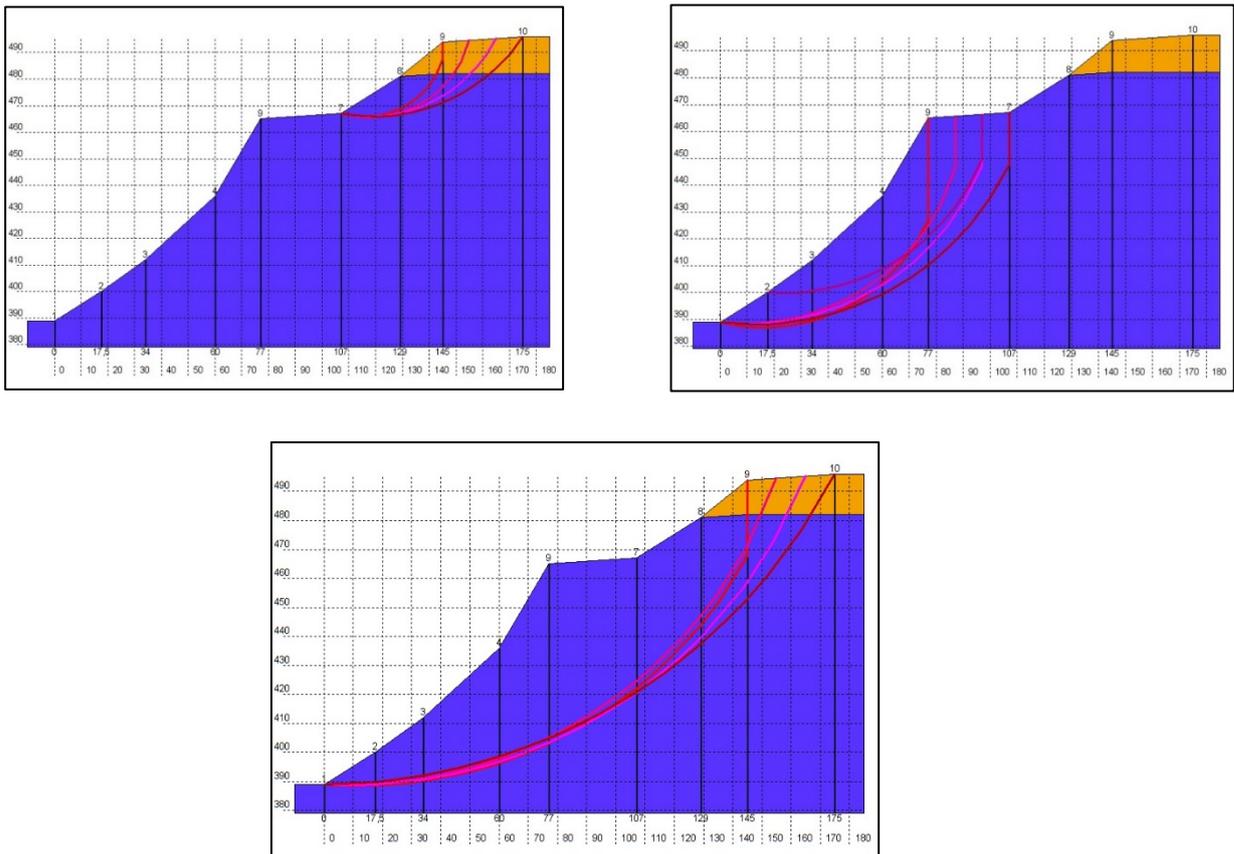


Рис. 4. Расчетные разрезы.

Оценка устойчивости фактического состояния участка деформаций

Таблица 1

Оценка устойчивости фактического состояния на 09.06.2020 г.

Высота уступа, м	Метод	Полученный к.з.у.	Мин. к.з.у.
$\frac{465 \div 388}{77}$	Фелениуса	0,99	0,99
	Спенсера	1,04	
	Бишопа	1,06	
$\frac{495 \div 467}{28}$	Фелениуса	2,1	2,1
	Спенсера	2,19	
	Бишопа	2,2	
$\frac{495 \div 388}{107}$	Фелениуса	1,0	1,0
	Спенсера	1,04	
	Бишопа	1,05	

## Результаты

Результаты расчетов показали слабую устойчивость склонов, что приведет к развитию деформаций и нарушению стабильности работы предприятия. Дальнейшая отработка возможна только при корректировке контура участка юго-восточного борта, обеспечивающего его долговременную устойчивость.

Одной из главных причин возникновения деформации на карьере Западно-Озерного месторождения стали завышенные проектные углы уступов, не соответствующие фактическим физико-механическим характеристикам пород, слагающих эти уступы. Сотрудниками института «Уралмеханобр» был отстроен рекомендуемый (новый) контур, обеспечивающий долговременную устойчивость борта карьера (рис. 5).

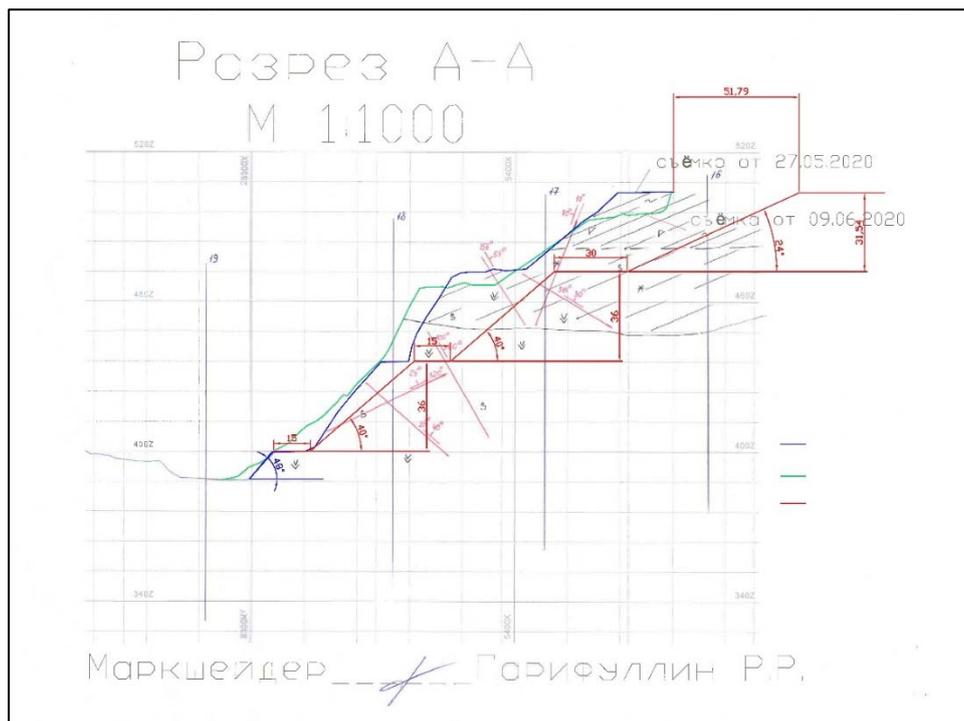


Рис. 5. Рекомендуемый контур юго-восточного борта карьера

По новому контуру была выполнена оценка устойчивости в программном комплексе «Откос». Расчетные поверхности скольжения показаны на рис. 6. Оценка устойчивости рекомендуемого контура представлена в табл. 2.

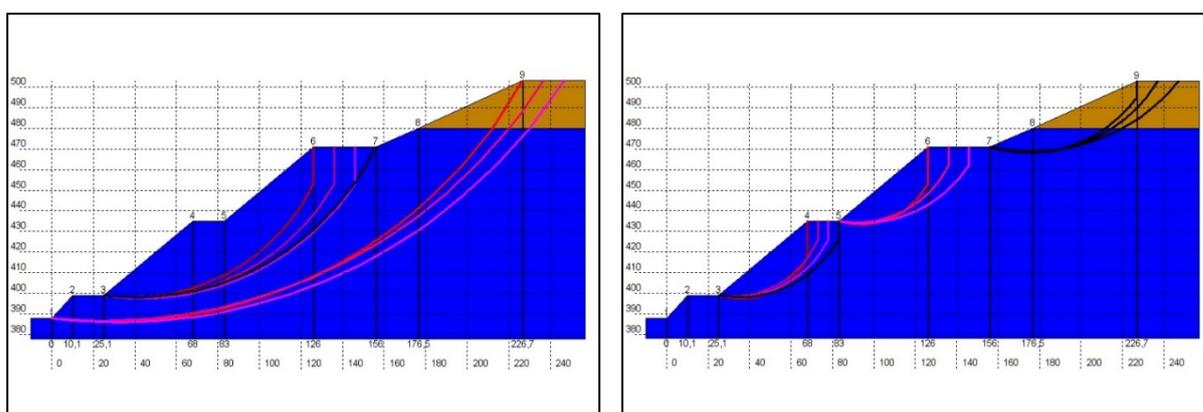


Рис. 6. Расчетные разрезы. Оценка устойчивости рекомендуемого контура

Таблица 2

## Оценка устойчивости рекомендуемого (проектного) контура

Горизонт /высота уступа, м		Метод	Полученный к.з.у.	Мин. к.з.у.
$\frac{503 \div 471}{32}$	уступ	Фелениуса	2,37	2,37
		Спенсера	2,47	
		Бишопа	2,48	
$\frac{471 \div 435}{36}$	уступ	Фелениуса	1,54	1,54
		Спенсера	1,61	
		Бишопа	1,62	
$\frac{435 \div 399}{36}$	уступ	Фелениуса	1,54	1,54
		Спенсера	1,61	
		Бишопа	1,62	
$\frac{471 \div 399}{72}$	Часть борта	Фелениуса	1,25	1,25
		Спенсера	1,3	
		Бишопа	1,3	
$\frac{503 \div 388}{115}$	Весь борт	Фелениуса	1,24	1,24
		Спенсера	1,29	
		Бишопа	1,29	

Исходя из выполненных расчетов предприятию АО «Учалинский ГОК» рекомендовано на рассматриваемом участке угол откоса верхней части восточного борта карьера в отм. 508÷479 м снизить до 24°, а угол откоса в отметках 477÷438 м – до 40°. При данных параметрах борт будет находиться в устойчивом состоянии, что позволит обеспечить безопасную отработку месторождения.

В настоящее время на предприятии ведутся работы по разносу верхних горизонтов для придания откосу рекомендуемых параметров (рис. 7).



а) по состоянию на июнь 2020 г.

б) по состоянию на август 2020 г.

Рис. 7. Участок разноса верхних горизонтов восточного борта карьера

### Заключение

Завышенные углы уступов, слабая геологическая изученность массива послужили проявлению различных деформаций на участке юго-восточного борта карьера Западно-Озерного месторождения. Дальнейшая отработка может быть продолжена только при выполнении выданных рекомендаций, основной из которых является ведение горных работ по новому рекомендуемому контуру участка юго-восточного борта карьера с приданием склонам рекомендуемых углов наклона, соответствующих свойствам пород.

## Список литературы

1. *Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров*, 1972. Ленинград: ВНИМИ, 168 с.
2. *Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах: утв. Госгортехнадзором РФ 16.03.98*, 1998. Санкт-Петербург: ВНИМИ, 208 с.
3. *Проект ОАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» Открытый рудник на базе месторождения «Западно-Озерное» 0024.02 П 1.01 Пояснительная записка. ФГУП «ГИПРОЦВЕТМЕТ»*. Москва, 2008.
4. *Изменение №1 в Технический проект отработки запасов месторождения Западно-Озерное. АО «Учалинский ГОК». Открытый рудник 5836-354-08-ПЗ. Пояснительная записка. ОАО «Гипроруда»*, Екатеринбург, 2017.
5. *Рекомендации по локализации деформационных явлений на участке юго-восточного борта карьера «Западно-Озерный». ОАО «Уралмеханобр»*, Екатеринбург, 2020.
6. *Проект наблюдательной станции для контроля устойчивости бортов карьера месторождения «Западно-Озерное». ОАО «Уралмеханобр»*, Екатеринбург, 2010.
7. *Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости*, 1987. Ленинград: ВНИМИ,
8. *Временные методические указания по управлению устойчивостью бортов карьеров цветной металлургии: утв. Министерством цветной металлургии СССР 14.01.1988*, 1989. Москва: Унипромедь, 128 с.
9. *Инструкция по расчету устойчивости бортов разрезов при их ликвидации и обеспечению сохранности прилегающих к разрезам территорий.: утв. Министерством угольной промышленности СССР 17.01.1977; согласовано Госгортехнадзором СССР 21.12.1976*, 1977. Ленинград: ВНИМИ, 55 с.
10. *Инструментальные наблюдения за деформациями бортов карьера месторождения «Западно-Озерное»: Отчет о НИР: договор № 2086/18. Уралмеханобр; рук. Кольцов П.В.; исполн. Андреева О.Н. и др.*, 2019. Екатеринбург, 47 с.

## References

1. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu uglov naklona bortov, otkosov ustupov i otvalov stroyashchikhsya i ekspluatiруemykh kar'erov* [Methodological guidelines for determining the inclination angles of the sides, the slopes of ledges and dumps on quarries under construction and operate], 1972. Leningrad: VNI-MI, 168 p.
2. *Pravila obespecheniya ustoichivosti otkosov na ugol'nykh razrezakh: utv. Gosgortekhnadzorom RF 16.03.98* [Rules for ensuring the stability of slopes at coal mines: approved. Gosgortekhnadzor of the Russian Federation 16.03.98], 1998. Sankt-Peterburg: VNIMI, 208 p.
3. *Proekt OAO "Uchalinskii gorno-obogatitel'nyi kombinat" Otkrytyi rudnik na baze mestorozhdeniya "Zapadno-Ozernoe" 0024.02 P 1.01 Poyasnitel'naya zapiska.* [Project of JSC "Uchalinsky Mining and Processing Plant": Open mine on the basis of the Zapadno-Ozernoye deposit 0024.02 P 1.01 Explanatory note]. FGUP "GIPROTsvETMET". Moscow, 2008.
4. *Izmenenie №1 v Tekhnicheskii proekt otrabotki zapasov mestorozhdeniya Zapadno-Ozernoe. AO "Uchalinskii GOK". Otkrytyi rudnik 5836-354-08-PZ. Poyasnitel'naya zapiska* [Change No. 1 to the Technical Project of mining reserves of the deposit Zapadno-Ozernoye. JSC Uchalinsky GOK. Open mine 5836-354-08-PZ. Explanatory note]. ОАО "Giproruda", Ekaterinburg, 2017.
5. *Rekomendatsii po lokalizatsii deformatsionnykh yavlenii na uchastke yugovostochnogo borta kar'era "Zapadno-Ozernyi"* [Recommendations for localization of deforma-

tion occurrence on the section of the south-eastern side of the Zapadno-Ozerny quarry]. OAO "Uralmekhanobr", Ekaterinburg, 2020.

6. Proekt nablyudatel'noi stantsii dlya kontrolya ustoichivosti bortov kar'era mestorozhdeniya "Zapadno-Ozernoe" [Project of an observation station for monitoring the stability of the sides at the quarry of the Zapadno-Ozernoye deposit]. OAO "Uralmekhanobr", Ekaterinburg, 2010.

7. Metodicheskie ukazaniya po nablyudeniyam za deformatsiyami bortov razrezov i otvalov, interpretatsii ikh rezul'tatov i prognozu ustoichivosti [Methodological guidelines for observations the sides deformations of sections and dumps, and for interpretation of the results to predict their stability], 1987. Leningrad: VNIMI,

8. Vremennye metodicheskie ukazaniya po upravleniyu ustoichivost'yu bortov kar'erov tsvetnoi metallurgii: utv. Ministerstvom tsvetnoi metallurgii SSSR 14.01.1988 [Temporary guidelines for managing the stability of the sides of non-ferrous metallurgy quarries: approved. Ministry of Non-Ferrous Metallurgy of the USSR 14.01.1988], 1989. Moscow: Unipromed', 128 p.

9. Instruksiya po raschetu ustoichivosti bortov razrezov pri ikh likvidatsii i obespecheniyu sokhrannosti prilegayushchikh k razrezam territorii.: utv. Ministerstvom ugol'noi promyshlennosti SSSR 17.01.1977; soglasovano Gosgortekhnadzorom SSSR 21.12.1976 [Instruction for calculating the stability of the sides of the sections during their liquidation and ensuring the safety of the territories adjacent to the sections: approved. Ministry of Coal Industry of the USSR 17.01.1977; approved by Gosgortekhnadzor of the USSR 21.12.1976], 1977. Leningrad: VNIMI, 55 p.

10. Instrumental'nye nablyudeniya za deformatsiyami bortov kar'era mestorozhdeniya "Zapadno-Ozernoe" [Instrumental observations of deformations of the quarry sides on the Zapadno-Ozernoye deposit]: Otchet o NIR: dogovor № 2086/18. Uralmekhanobr; ruk. Kol'tsov P.V.; ispoln. Andreeva O.N. i dr., 2019. Ekaterinburg, 47 p.

УДК [622.34:519.256]:519.72

**Яковлев Андрей Михайлович**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
лаборатория управления качеством  
минерального сырья,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [quality@igduran.ru](mailto:quality@igduran.ru)

**Кантемиров Валерий Данилович**

кандидат технических наук,  
заведующий лабораторией управления качеством  
минерального сырья,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [ukrkant@mail.ru](mailto:ukrkant@mail.ru)

**Титов Роман Сергеевич**

старший научный сотрудник,  
лаборатория управления качеством минераль-  
ного сырья,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [ukrigd15@mail.ru](mailto:ukrigd15@mail.ru)

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ФРОНТОВ  
ГОРНЫХ РАБОТ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ  
НА ОСНОВЕ ГГИС МОДЕЛИРОВАНИЯ  
РАБОЧЕЙ ЗОНЫ\***

*Аннотация:*

Ухудшение горнотехнических и горно-геологических условий добычи полезных ископаемых по мере понижения горных работ при отработке сложноструктурных месторождений требует создания инновационных методик, позволяющих на основе аудита состояния горных работ в карьере обеспечить планирование горных работ наиболее экономически эффективным способом. В статье приведены основы разработанной методики, позволяющей в автоматическом режиме оценить соотношение фронтов горных работ и качественные показатели запасов полезного ископаемого (ПИ) на рабочих горизонтах карьера. Целью работы является снижение трудоемкости и повышение качества процессов планирования горных работ. Более качественное планирование горных работ с учетом качества сырья позволяет увеличить степень извлечения ценных компонентов и более комплексно использовать минеральные ресурсы. Предложенная методика предназначена для автоматизированного планирования горных работ в режиме управления качеством сырья и позволяет определить резервы горного производства; установить преобладающий технологический сорт рудного сырья в анализируемых участках месторождения; выбрать рациональный способ добычи сырья с учетом его качества.

*Ключевые слова:* геометризация, геологические базы данных, геоинформационное моделирование, качество полезного ископаемого, блочное моделирование, планирование горных работ, резервы добычи.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.041

**Yakovlev Andrei M.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher,  
Laboratory of quality management,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [quality@igduran.ru](mailto:quality@igduran.ru)

**Kantemirov Valery D.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of the Laboratory of quality management,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [ukrkant@mail.ru](mailto:ukrkant@mail.ru)

**Titov Roman S.**

Senior Researcher,  
Laboratory of quality management,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [ukrigd15@mail.ru](mailto:ukrigd15@mail.ru)

**METHODOLOGY FOR ASSESSING  
THE FRONTS OF MINING OPERATIONS  
OF DEEP QUARRIES BASED ON GGIS  
MODELING OF THE WORKING AREA**

*Abstract:*

The deterioration of mining-engineering and mining-geological conditions of mineral extraction, when mining operations decrease during the development of complex-structured deposits, requires the creation of innovative techniques that allow, based on the audit of the state of mining operations in the quarry, to ensure the planning of mining operations in the most cost-effective way. The article presents the basics of the developed methodology, which allows to automatically assessing the ratio of mining fronts and qualitative indicators of mineral reserves (MR) on the working horizons of the quarry. The purpose of the work is to reduce the labor-complexity and improve the quality of planning processes for mining. Better planning of mining operations, taking into account the quality of raw materials, allows to increase the degree of extraction of valuable components and the more comprehensive use of mineral resources. The proposed methodology is intended for automated planning of mining operations in the raw material quality management mode and allows to determine the reserves of mining production, to establish the predominant technological grade of ore raw materials in the analyzed areas of the deposit, and to choose a rational method of extraction of raw materials, taking into account its quality.

*Key words:* geometrization, geological databases, geoinformation modeling, mineral quality, block modeling, mining planning.

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания №1, тема «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

В настоящее время сформировалась тенденция к ухудшению горнотехнических условий ведения горных работ на большинстве глубоких карьеров. Основными причинами является понижение горных работ и связанное с ним увеличение расстояний транспортирования горной массы. При этом из-за организационных и других факторов часто фиксируется отставание вскрышных работ на верхних горизонтах карьеров с большим количеством участков борта в консервации, что существенно ограничивает развитие добычных фронтов на нижележащих горизонтах и усложняет планирование горных работ [1 – 4]. Для решения этих проблем рекомендуются автоматизированные методы оценки текущего состояния горных работ и качества запасов в карьерах, позволяющие своевременно определить резервы горного производства, выделить направление и варианты интенсификации горных работ с учетом качества ПИ, учесть горнотехнические условия для оптимизации добычных работ по участкам карьера.

## Материалы исследований

Реализация методик производится с применением разработанного геоинформационного обеспечения. Для оценки качества полезного ископаемого и состояния горных работ используются блочные и каркасные модели различных вариантов положения горных работ в карьере [5 – 10].

На рис. 1 представлена блок-схема методики геоинформационного моделирования качества руд и моделей месторождения. Исходными данными для моделирования являются данные геологической разведки: таблицы интервального опробования скважин, планы подсчета запасов и другая документация.

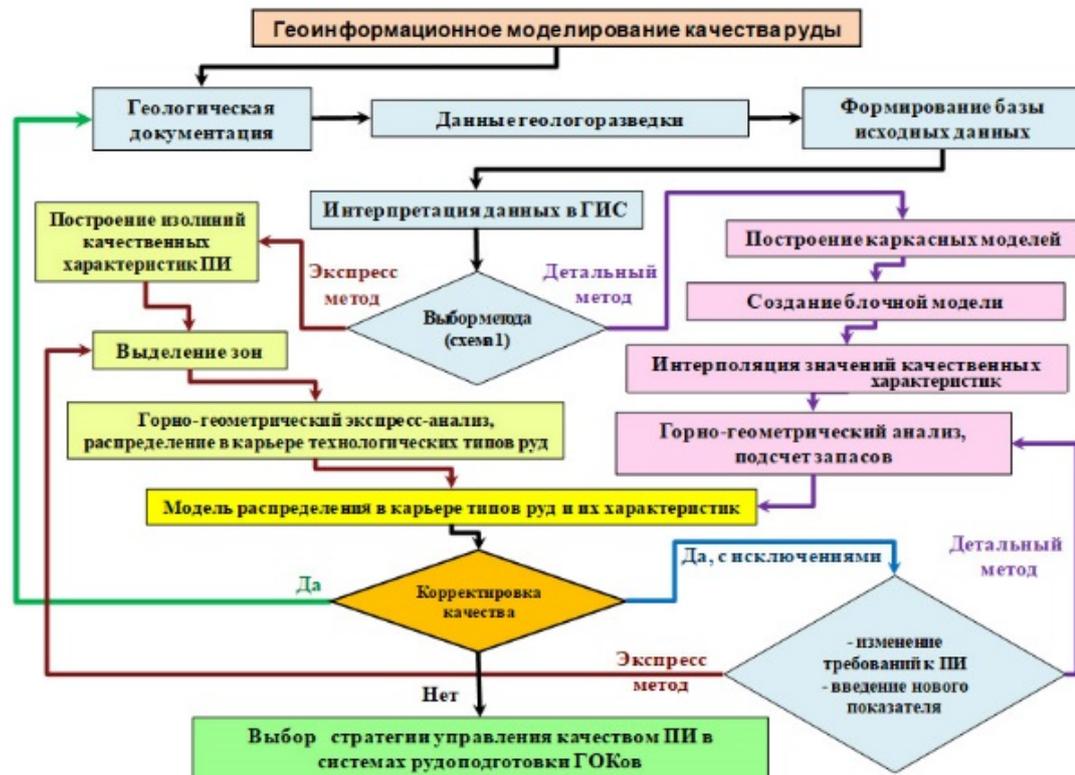


Рис. 1. Блок-схема методики геоинформационного моделирования качества руд

### Краткое описание методики

1. Геометризация качественных характеристик ПИ производится с использованием программных продуктов горно-геологических информационных систем (ГГИС) (GEOVIA Surpac, Mineframe, Datamine и др.) на основе сформированной базы исходных данных. База исходных данных для создания блочной модели в ГГИС формируется из данных детальной и эксплуатационной разведки месторождения (участков), геофизического исследования массива, результатов дополнительных минералогических и других исследований кернов горных пород (см. рис.1).

2. Формирование базы исходных данных производится в форматах файлов программ Excel или Access. Производится оценка объема полученных данных и выбор метода их интерпретации в ГГИС для блочного моделирования.

3. Для интерпретации данных в ГГИС предлагается 2 основных метода: *экспресс- и детальный методы*. Оба метода требуют предварительного создания геологической базы данных и позволяют достоверно производить оценку и районирование в карьере руд по качественным признакам. Методы различаются трудоемкостью выполнения, детальностью и возможностью корректировок построенных моделей в зависимости от установленных или изменившихся требований к качеству полезного ископаемого. На рис. 1 представлена блок-схема методики выбора метода моделирования и интерпретации геоданных.

Выбор метода зависит от объема геоданных в сформированной базе, решаемых задач и сроков их выполнения.

Рекомендуются следующие варианты:

– при сравнительно *небольшом* объеме геоданных (блок, уступ, участок карьера) использовать экспресс-метод на основе метода обратных расстояний (детерминистический способ);

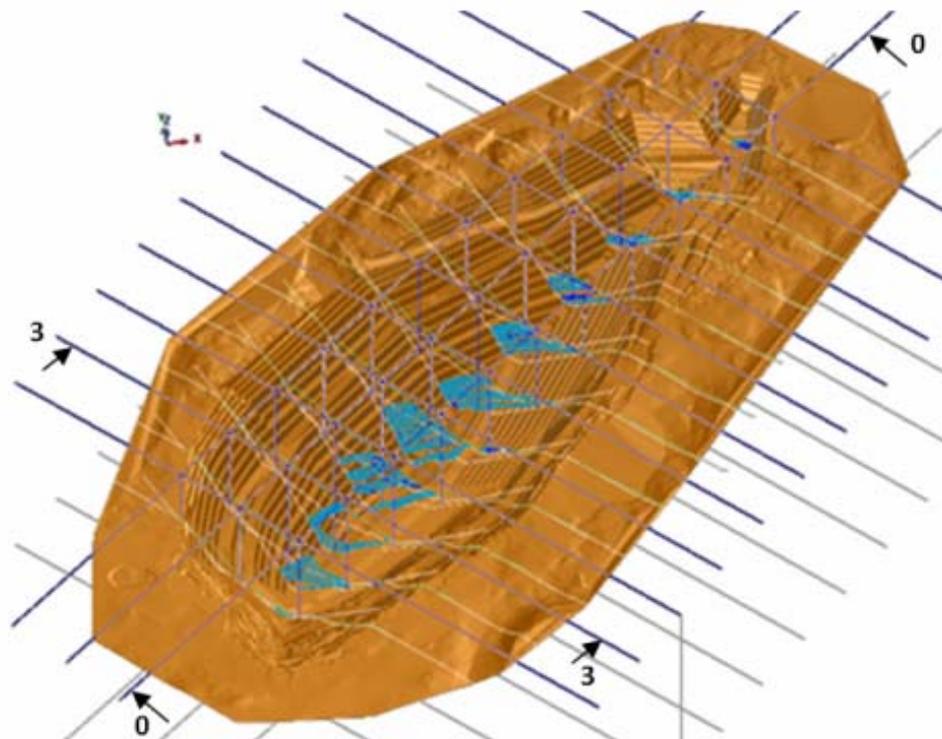
– при *большом* объеме исходных данных предлагается использовать детальный метод блочного моделирования на основе методов геостатистики (кригинга с линейной вариограммой).

В зависимости от масштаба изучаемого объекта предлагается использовать различные методы геоинформационного моделирования: экспресс-метод или детальный. Экспресс-метод используется для моделирования отдельных небольших блоков месторождения (экскаваторных, буровых и др.) или добычных горизонтов. Детальный метод позволяет оценить все месторождение на основе построения блочной модели и также используется для оценки резервов горного производства.

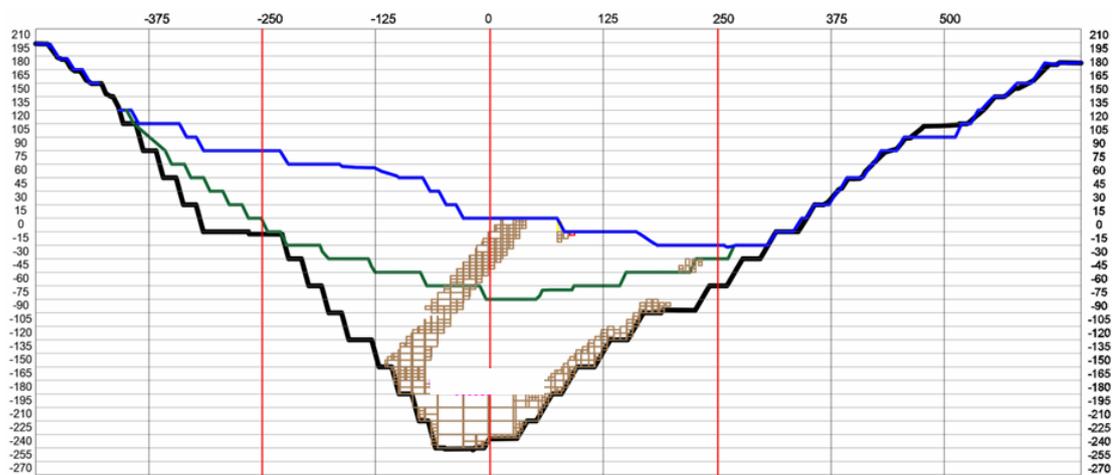
При использовании детального метода данные блочной модели выгружаются в виде центроидов микроблоков блочной модели. Для апробирования методики были использованы детальный метод и геоданные карьеров АО «Карельский окатыш». На базе блочной модели подготовлены 11 поперечных и 3 продольных разреза Западного карьера с шагом 250 м (рис. 2). Представлена нарезка профилей разрезов, необходимая для выполнения первичного горно-геометрического анализа, который показал, что основные запасы руды сосредоточены в глубинной части месторождения на глубоких горизонтах карьера. Полученная информация позволяет сделать вывод о сложном геолого-геоморфологическом строении участка месторождения. Для эффективного планирования добычи рекомендуется с помощью разработанной методики произвести аудит текущего состояния горных работ в карьере и наметить мероприятия по ликвидации оставания вскрышных работ на верхних горизонтах.

Суть аудита горных работ заключается в оценке соотношения типов фронтов (активный, погашенный, участки консервации) по горизонтам карьера и запасов в пределах конечного контура карьера. Такой подход позволяет установить возможное отставание вскрышных горных работ на рабочих горизонтах и определить резервы запасов руды с учетом качества и направления интенсификации добычи.

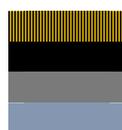
а)



б)



Условные обозначения:



руда;

граница проектного контура карьера;

вариант границы горных работ на 5-й год разработки карьера;

граница контура текущего положения горных работ в карьере (на 2021 г.);

а) план карьера в изометрии;

б) поперечный разрез карьера по профилю 3-3

Рис. 2. Профилирование месторождения для выполнения горно-геометрического анализа

Для снижения отставания вскрышных работ в глубоких карьерах рекомендуются следующие мероприятия [11]:

– поддержание фронта работ, обеспечивающего заданную производительность, качество сырья и коэффициент вскрыши;

- отработка запасов рабочими площадками переменной ширины с целью интенсификации горных работ в определенных участках рабочей зоны;
- этапная отработка участков месторождения с целью стабилизации качества сырья при минимальном коэффициенте вскрыши; выделенные участки обрабатывать секторами с сырьем одинакового качества;
- изменение места выемки и объемов горной массы по площади карьера с учетом обеспечения концентрации горного оборудования на выделенных участках.

### Результаты исследований

Оценка состояния фронтов по горизонтам карьера производится на основе каркасных моделей – текущего положения горных работ в карьере и предельного проектного положения на конец отработки. С использованием ГИС производится построение погоризонтных планов. После этого они приводятся к типовому виду (рис. 3), где «слоями» (уровнями) и различными цветами в редакторе \*.dxf файлов выделяются участки фронта горных работ, относящиеся к определенной категории:

- активный фронт: добычной или вскрышной (дает возможность осуществить подвигание участка фронта на горизонте);
- участки консервации – на них для подвигания уступа необходимо обеспечить разнос верхних горизонтов;
- погашенный фронт, т.е. участок, где уже достигнуто предельное проектное положение.

Профилирование месторождения позволяет выполнить первичную оценку следующих горно-геологических и горнотехнических условий разработки:

- объем запасов руды и морфологию ее залегания по рабочим горизонтам карьера;
- объем и текущий коэффициент вскрыши;
- качество руды и др.

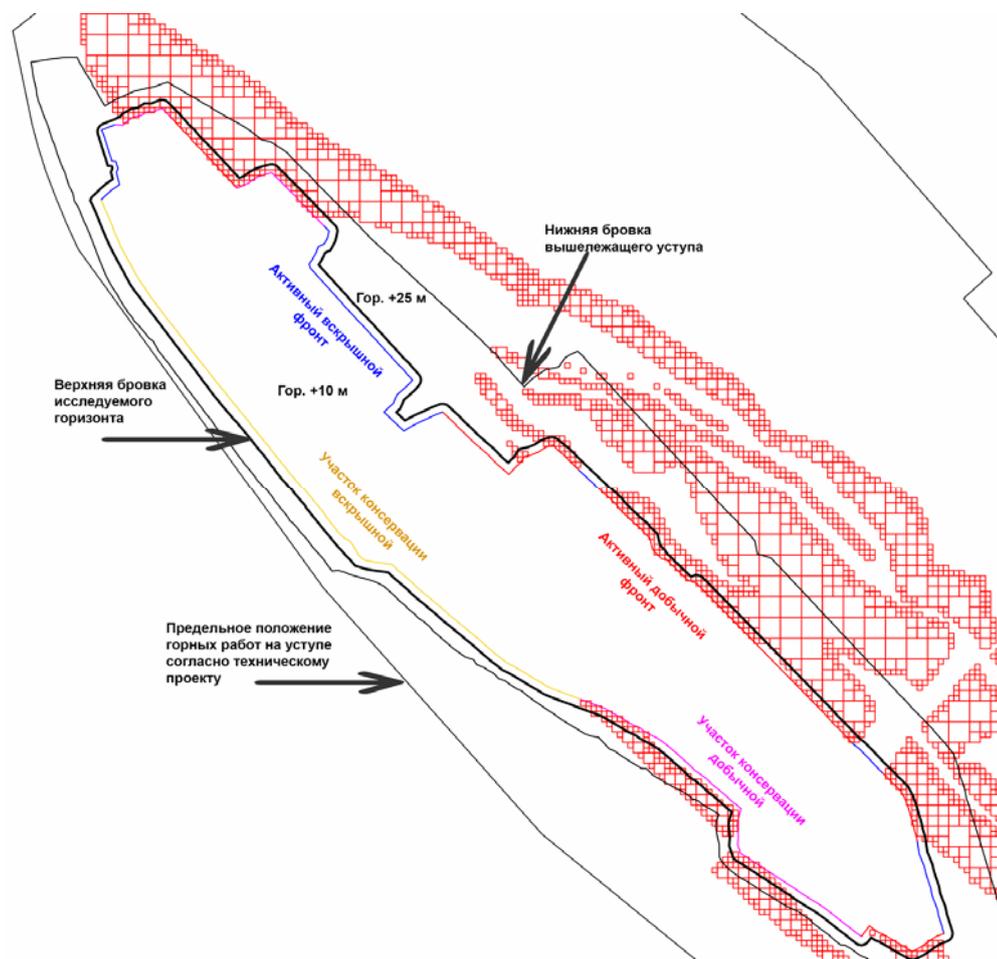
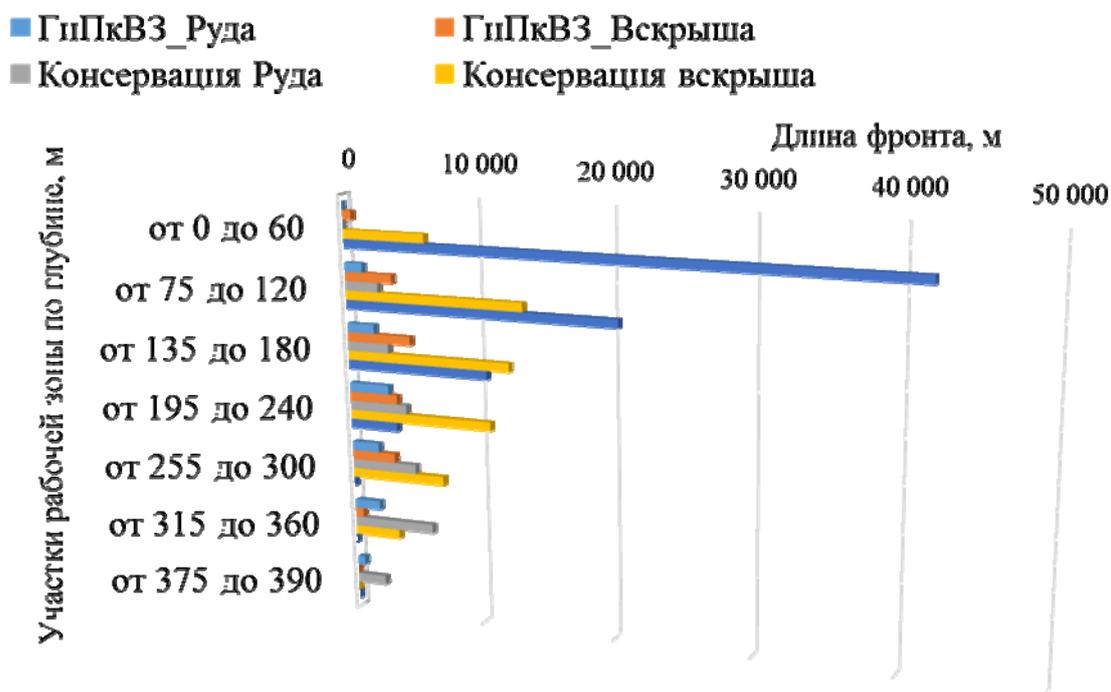


Рис. 3. Пример погоризонтного плана с выделенными типовыми зонами фронта горных работ

На следующем этапе моделирования производится автоматизированная программная обработка погоризонтных планов, учитывающая особенности конфигурации каждого горизонта (пример результатов обработки представлен на рис. 4) и дается детальная характеристика горнотехнических условий разработки.



ГипКВЗ – готовые и подготовленные к выемке запасы; высота анализируемого участка рабочей зоны – 60 м

Рис. 4. Анализ распределения типов фронтов по участкам рабочей зоны карьера

В разработанном программном обеспечении определяется качество руды по участкам фронтов на горизонтах (рис. 5), даются рекомендации для достижения выемочным оборудованием максимальной производительности для получения наибольшего экономического эффекта.

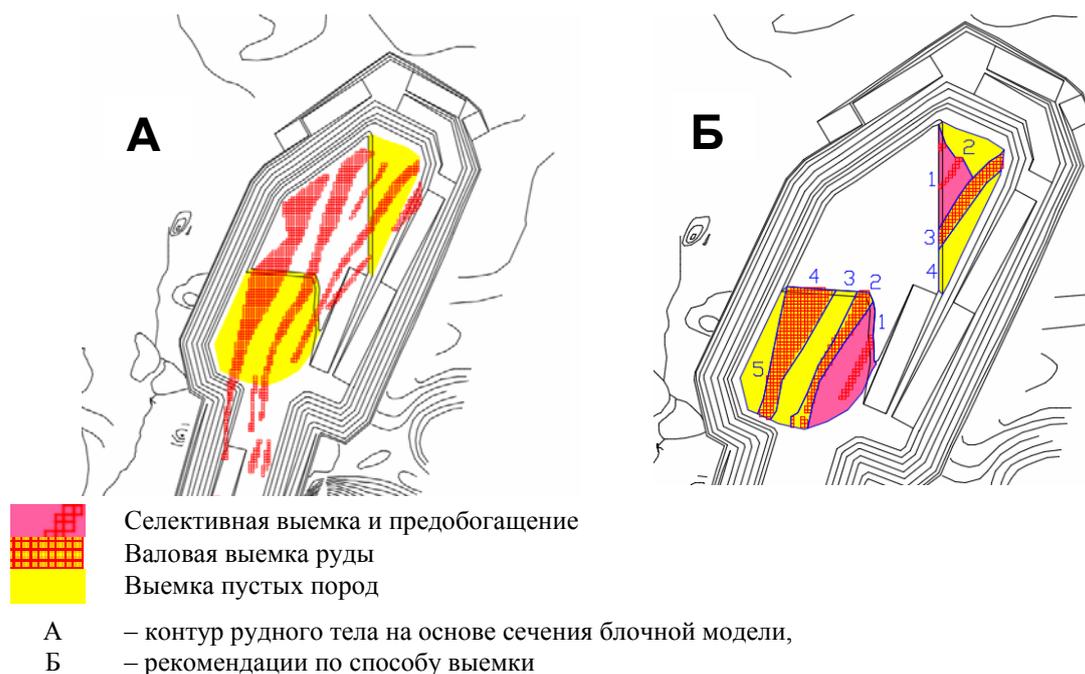


Рис. 5. Оценка качества запасов и выбор способа выемки в участках активного добычного фронта

С помощью представленной методики установлено, что на Центральном карьере АО «Карельский Окамыш» общая длина неактивного фронта горных работ составила 22,57 км, в т.ч. по руде – 5,87 км, по вскрыше – 16,7 км.

Для оценки качества руды по участкам фронта горных работ (см. рис. 5) первоначально в каждом блоке блочной модели производится сопоставление его с типом фронта на участках рабочей зоны мощностью 45 м (активный, в консервации и др.) и времени извлечения горной массы при различных направлениях разработки.

Далее программа рассчитывает качественные и статистические показатели добываемой горной массы. В основе алгоритма программы заложена функция взаимоотношения точек центроидов и многоугольников, представляющих границы этапов обработки участков горизонта по типам фронтов. Использована широко распространенная для анализа модель-функция DE-9IM [12].

Использование разработанных методик и программного обеспечения позволяет выбрать метод управления качеством руды при добыче на рабочих и планируемых к обработке горизонтах карьера (табл. 1, 2), рассчитать среднее содержание, рудоносность, объемные показатели руды и вскрыши, а также значение коэффициента вариации для каждого полезного и вредного компонента в руде.

Таблица 1

**Объемные и качественные характеристики руды при различных вариантах развития горных работ на северном участке карьера (см. рис. 5)**

Порядок отработки	Объем горной массы	Объем руды	Рудоносность	Содержание Fe <sub>магн</sub>	
	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	%	Сред., %	К <sub>вар</sub> , %
1	52 578	5 500	10	18,1	16,34
2	52 631	375	1	16,4	0,39
3	45 313	32 000	71	25,2	11,72
4	62 487	375	1	22,6	0,75

Таблица 2

**Объемные и качественные характеристики руды при различных вариантах развития горных работ на южном участке карьера (см. рис. 5)**

Направления отработки	Объем горной массы	Объем руды	Рудоносность	Кол-во блоков	Fe <sub>магн</sub>	
	м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup>	%	шт.	Сред, %	К <sub>вар</sub> , %
1	123 373	13 125	11	105	21,9	15,8
2	57 558	41 875	73	335	17,3	4,2
3	107 360	750	1	6	18,2	8,5
4	118 888	102 875	87	823	27,9	11,9
5	67 062	2 125	3	17	26,4	6,9

По результатам анализа состояния горных работ в карьере предложено несколько вариантов их развития в зависимости от текущего положения на 10 лет вперед, при этом решена задача по разному восточного борта и предложена корректировка схемы вскрытия с построением планов горных работ (рис. 6), которые сформированы на основе программных продуктов собственной разработки, а также с использованием программных комплексов Autocad и Surpac.

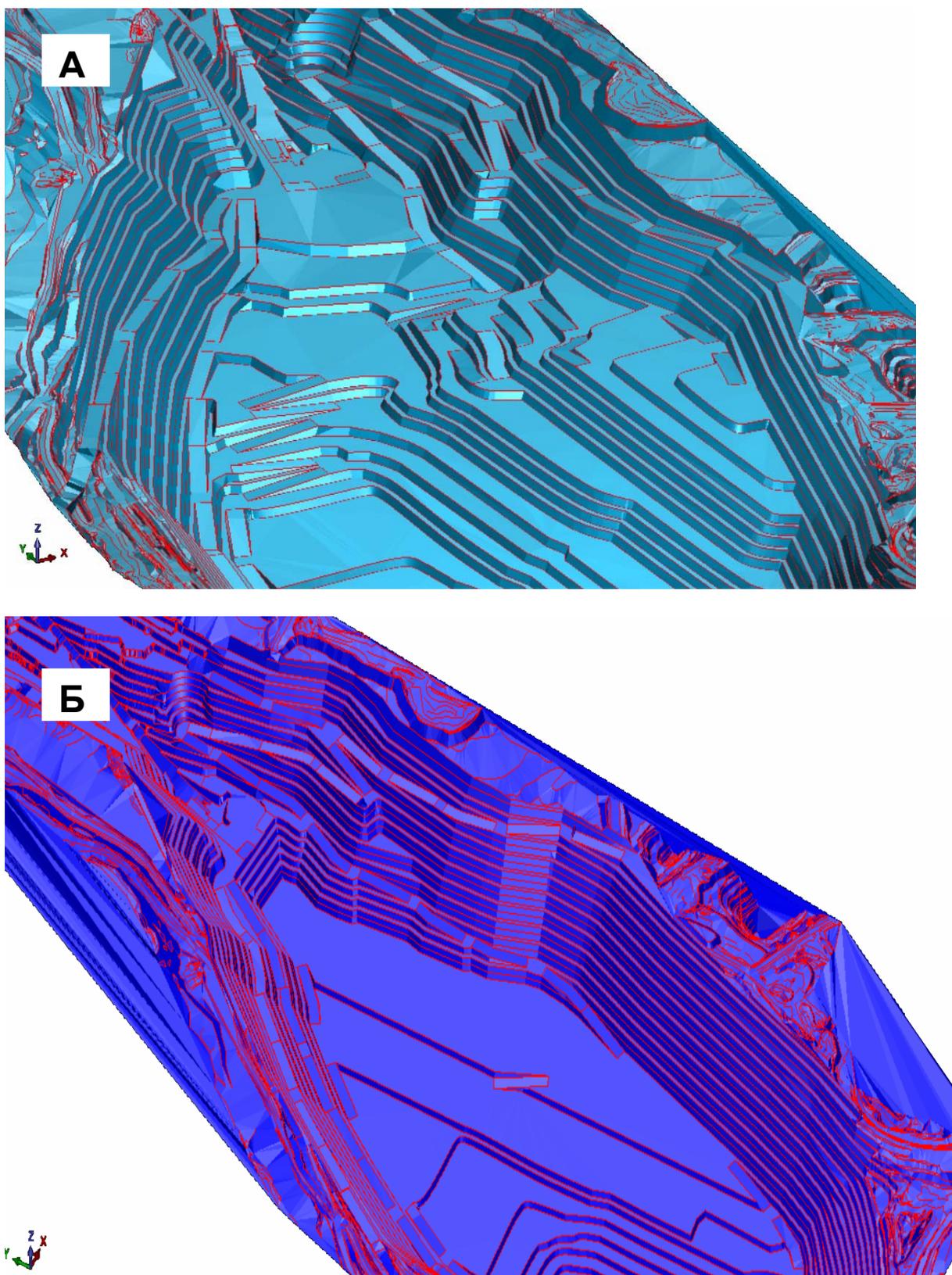


Рис. 6. Фрагмент планов горных работ на 5-й («А») и 10-й («Б») годы разработки Центрального карьера



Рис. 7. Распределение объемов вскрыши и руды по глубине карьера



Рис. 8. Распределение качества руды по глубине карьера

Представленные на рис. 4, 7, 8 результаты анализа участков рабочей зоны Центрального карьера позволили выявить следующие тенденции:

– сдерживающим фактором для освоения запасов нижних горизонтов является небольшая протяженность активных фронтов на нижних горизонтах карьера и значительное количество участков консервации фронтов горных работ на верхних горизонтах карьера, что сдерживает интенсификацию добычных работ и снижает объем резервов;

– основные запасы руды сосредоточены в нижней части карьера, на глубине от поверхности от 195 до 390 м;

– с понижением горных работ наблюдается повышение качества руды, а именно рост содержания Fe магнитного с 23,61 до 25,93 % и снижение содержания серы в концентрате с 0,27 до 0,24 %.

### Выводы

Представленные методика и разработанное на ее базе программное обеспечение (ПО) позволяют в автоматизированном режиме оценить соотношение фронтов горных работ и качественные показатели запасов ПИ на рабочих горизонтах карьера. Использование методики способствует снижению трудоемкости и повышению качества процессов планирования горных работ в карьерах, разрабатывающих сложноструктурные месторождения. Более качественное планирование горных работ с учетом качества сырья позволяет увеличить степень извлечения ценных компонентов и более комплексно использовать минеральные ресурсы.

Анализ фронтов горных работ по типу и качеству запасов при различных положениях рабочей зоны позволяет провести аудит резервов интенсификации горного производства и своевременно выполнить корректировку режима работы карьера по руде и вскрыше в зависимости от потребностей рынка.

Методика позволяет учесть прослой пустых пород в структуре рудного тела, которые сложно установить на плоской модели (чертеже) погоризонтного плана и оперативно скорректировать контуры запасов при отработке.

Использование представленной методики и разработанного ПО не требует наличия на ГОКе современных средств ГГИС и специализированных программных продуктов. Для их применения достаточно офисных пакетов (Excel и аналогов) и редактора dxf файлов с целью интерпретаций данных исследований. Реализация вышеизложенного комплекса методик позволяет повысить эффективность планирования горных работ без приобретения дорогостоящих программ и дополнительного обучения пользователей, что может быть востребовано для малых предприятий и карьеров.

Предложенная методика актуальна в условиях импортозамещения и позволяет определить резервы горного производства; установить преобладающий технологический сорт рудного сырья в пределах анализируемых участков месторождения; выбрать рациональный способ добычи сырья с учетом его качества.

### Список литературы

1. Kumral M., 2013. Multi-period mine planning with multi-process routes. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (3), P. 317 – 321.

2. Yan S., Lin H., Jiang X., 2012. A planning model with a solution algorithm for ready mixed concrete production and truck dispatching under stochastic travel times. *Engineering Optimization*, 44 (4), P. 427 – 447.

3. Rimélé A., Dimitrakopoulos R., Gamache M., 2020. A dynamic stochastic programming approach for open-pit mine planning with geological and commodity price uncertainty. *Resources Policy*, 65, P. 101 – 570.

4. Корнилков С.В., Аленичев В.М., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М., 2017. Прогноз качественных показателей добываемого сырья на основе геоинформационных технологий. *Горный журнал*, № 12, С. 10 – 15.
5. Яковлев В.Л., Лаптев Ю.В., Яковлев А.М., 2014. Геоинформационная оценка изменчивости качества титаномагнетитовых руд Гусевогорского месторождения. *Литосфера*, № 5, С.122 – 128.
6. Яковлев А.М., 2021. Апробация алгоритмов автоматизированной обработки геологических баз данных в технологических схемах управления качеством минерального сырья. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 – 1, С. 248– 257.
7. Яковлев А.М., 2021. Планирование горных работ в режиме управления качеством сырья на основе геоинформационного моделирования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 – 1, С. 258 – 268.
8. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., 2020. Оценка качественных показателей полезных ископаемых с использованием геоинформационных технологий блочного моделирования. *Геоинформатика*, № 3, С. 29 – 37.
9. Кантемиров В.Д., Яковлев А.М., Титов Р.С., 2019. Геоинформационные технологии при моделировании качественных характеристик руд. *Геоинформатика*, №. 3, С. 12 – 18.
10. Asad M.W.A., 2005. Cutoff grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Volume 19, Issue 3, P. 176 – 187.
11. Корнилков С.В., 1997. *Управление рабочей зоной действующих и проектируемых глубоких карьеров: автореферат диссертации ... доктора технических наук: 05.15.03.* Екатеринбург, 35 с.
12. Clementini, Eliseo, Di Felice, Paolino; van Oosterom, Peter, 1993. "Небольшой набор формальных топологических отношений, подходящих для взаимодействия с конечным пользователем". В Abel, David; Ooi, Beng Chin (eds.). *Advances in Spatial Databases: Third International Symposium, SSD '93 Singapore, June 23-25, 1993 Proceedings.* Конспекты лекций по информатике, Том 692/1993, Springer, pp. 277 – 295. doi:10.1007/3-540-56869-7\_16. ISBN 978-3-540-56869-8.

## References

1. Kumral M., 2013. Multi-period mine planning with multi-process routes. *International Journal of Mining Science and Technology*, 23 (3), P. 317 – 321.
2. Yan S., Lin H., Jiang X., 2012. A planning model with a solution algorithm for ready mixed concrete production and truck dispatching under stochastic travel times. *Engineering Optimization*, 44 (4), P. 427 – 447.
3. Riméle A., Dimitrakopoulos R., Gamache M., 2020. A dynamic stochastic programming approach for open-pit mine planning with geological and commodity price uncertainty. *Resources Policy*, 65, P. 101 – 570.
4. Kornilkov S.V., Alenichev V.M., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M., 2017. Prognoz kachestvennykh pokazatelei dobyvaemogo syr'ya na osnove geoinformatsionnykh tekhnologii [Forecasting of quality indicators of extracted raw materials based on geoinformation technologies]. *Gornyi zhurnal*, № 12, P. 10 – 15.
5. Yakovlev V.L., Laptev Yu.V., Yakovlev A.M., 2014. Geoinformatsionnaya otsenka izmenchivosti kachestva titanomagnetitovykh rud Gusevogorskogo mestorozhdeniya [Geoinformation assessment of the quality varying of titanomagnetite ores of the Gusevogorsky deposit]. *Litosfera*, № 5, S.122 – 128.
6. Yakovlev A.M., 2021. Aprobatsiya algoritmov avtomatizirovannoi obrabotki geologicheskikh baz dannykh v tekhnologicheskikh skhemakh upravleniya kachestvom mineral'nogo syr'ya [Approbation of algorithms for automated processing of geological databases in

technological schemes of mineral raw material quality management]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 1, P. 248– 257.

7. Yakovlev A.M., 2021. *Planirovanie gornykh rabot v rezhime upravleniya kachestvom syr'ya na osnove geoinformatsionnogo modelirovaniya* [Planning of mining operations in the raw material quality management mode based on geoinformation modeling]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 1, P. 258 – 268.

8. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., 2020. *Otsenka kachestvennykh pokazatelei poleznykh iskopaemykh s ispol'zovaniem geoinformatsionnykh tekhnologii blochnogo modelirovaniya* [Evaluation of the quality indicators of minerals using geoinformational technologies of block modeling]. *Geoinformatika*, № 3, P. 29 – 37.

9. Kantemirov V.D., Yakovlev A.M., Titov R.S., 2019. *Geoinformatsionnye tekhnologii pri modelirovanii kachestvennykh kharakteristik rud* [Geoinformational technologies for modeling the qualitative characteristics of ores]. *Geoinformatika*, №. 3, P. 12 – 18.

10. Asad M.W.A., 2005. *Cutoff grade optimization algorithm with stockpiling option for open pit mining operations of two economic minerals*. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, Volume 19, Issue 3, P. 176 – 187.

11. Kornilkov S.V., 1997. *Upravlenie rabochei zonoj deistvuyushchikh i proektiruemnykh glubokikh kar'erov: avtoreferat dissertatsii ... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.15.03* [Management of the working area of existing and projected deep quarries: abstract of the dissertation... Doctor of Technical Sciences: 05.15.03]. Ekaterinburg, 35 p.

12. Clementini, Eliseo, Di Felice, Paolino; van Oosterom, Peter, 1993. "Nebol'shoi nabor formal'nykh topologicheskikh otnoshenii, podkhodyashchikh dlya vzaimodeistviya s konechnym pol'zovatelem". V Abel, David; Ooi, Beng Chin (eds.). *Advances in Spatial Databases: Third International Symposium, SSD '93 Singapore, June 23-25, 1993 Proceedings*. *Konspekty lektsii po informatike, Tom 692/1993*, Springer, pp. 277 – 295. doi:10.1007/3-540-56869-7\_16. ISBN 978-3-540-56869-8.



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
ПРИ ОСВОЕНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

УДК 622.833.5

**Сентябов Сергей Васильевич**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
лаборатория геодинамики и горного давления,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [sentyabov1989@mail.ru](mailto:sentyabov1989@mail.ru)

**Карамнов Дмитрий Викторович**

младший научный сотрудник,  
лаборатория геодинамики и горного давления,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [MarlouBT2011@yandex.ru](mailto:MarlouBT2011@yandex.ru)

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД  
НАТУРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ\****Аннотация:*

Возникшая в нашей стране в начале 40-х годов прошлого века сначала на угольных шахтах, а затем в 70-х годах и на рудниках проблема горных ударов или динамических явлений остается до настоящего времени до конца не решенной. Так, на Таштагольском руднике число динамических явлений достигает до 1,5 тыс. в год, на Шерегешском с 1995 по 2005 г. произошло более 70 динамических явлений с энергией до 107 Дж, на Казском с 1987 по 2007 г. отмечено более 200 явлений.

На уральских рудниках, например, на СУБРе, число горных ударов за год достигает 3000, иногда со смертельным исходом, а на железорудных шахтах Урала, в связи с углублением горных работ, их число также возрастает. Достаточно сказать, что только на одной шахте Естюнинской за период с 1990 по 2009 г. произошло 30 горных ударов и отмечено 10 техногенных землетрясений.

Причина этих явлений кроется в недостаточном геомеханическом обосновании параметров мер профилактики и, в первую очередь, в отсутствии расчетного прогноза удароопасности, позволяющего предусматривать предупреждение динамических явлений на стадии проектирования горных работ и строительства.

Таким образом, расчетный геомеханический прогноз и определение первоначального напряженного состояния на рудниках остаются до настоящего времени весьма актуальными.

*Ключевые слова:* напряженно-деформированное состояние, наблюдательная станция, устойчивость, переменные во времени напряжения, массив горных пород, физико-механические свойства.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.054

**Sentyabov Sergey V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior 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](mailto:sentyabov1989@mail.ru)

**Karamnov Dmitry V.**

Junior Researcher,  
Laboratory of Geodynamics and Mining Pressure,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [MarlouBT2011@yandex.ru](mailto:MarlouBT2011@yandex.ru)

**METHODS FOR DETERMINING  
THE INITIAL STRESSES OF THE ROCK  
MASSIF BY IN-SITU MEASUREMENTS***Abstract:*

Emerged in our country in the early 40's of the last century, first in coal mines, and then in the 70's also in metal mines, the problem of rock bumps or dynamic phenomena remains to this day not finally solved. So, on the Tashtagolsky mine the number of dynamic phenomena reaches up to 1.5 thousand a year, on Sheregeshsky mine, there were more than 70 dynamic phenomena with energy up to 107 J between 1995 and 2005, on Kazsky mine were marked more than 200 phenomena from 1987 to 2007.

At mines of the Urals, for example, at SUBR, the number of rock bumps reaches 3000 per year, sometimes with fatal consequence, and at the iron ore mines of the Urals, in connection with deepening of mining works, their number also increases. Suffice it to say, that during the period from 1990 to 2009 there were 30 rock bumps and 10 technogenic earthquakes at just one Estyuninskaya mine.

The cause of these phenomena lies in insufficient geomechanical substantiation of parameters of preventive measures and, first of all, in absence of calculated forecast of shock hazard, which allows to prevent dynamic phenomena at the stage of designing mining works and construction.

Thus, the calculated geomechanical forecast and determination of the initial stress state at the mines remain very relevant to date.

*Key words:* stress-strain state, observation station, stability, time-varying stresses, rock mass, physical and mechanical properties.

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

### Введение

Динамические явления во всем спектре их проявления от стреляния до техногенных землетрясений – это следствие хрупкого мгновенного разрушения правой части массива или бортов тектонического нарушения под действием высоких относительно прочности массива напряжений. Реальный логичный путь к прогнозу динамических явлений – расчет напряженного состояния и сравнение последнего с прочностными параметрами массива по известным критериям хрупкого разрушения.

Массив горных пород подземных рудников как часть земной коры является сложной гетерогенной структурой, находящейся в сложном напряженном состоянии, формирующемся из метастатического давления, тектонических сил, напряжений и гидростатического давления (в зонах развития в породах взаимосвязанной закарстованности). При этом тектонические напряжения необходимо рассматривать как изменяющиеся по амплитуде горизонтальные нагрузки с определенной периодичностью. Реальный подход к оценке напряженного состояния пород – экспериментальные натурные измерения в пространстве рудников и во времени с установлением закономерностей их роста с глубиной и изменения в пространстве [1].

#### *Методы определения изменения НДС массива горных пород*

На данный момент методы определения напряженно-деформированного состояния (НДС) делятся на 3 основных вида: геологические, геомеханические и геофизические.

Геомеханические методы обладают относительно высокой точностью определения напряжений, так как основаны на прямых измерениях деформационных процессов в области массива. Но они являются весьма трудозатратными, а их результаты имеют локальный характер. Методы можно разделить на 3 группы [2], представленные в табл. 1.

В основе деформационных методов – определение упругих деформаций и пересчет их в НДС массива.

Таблица 1

#### Геомеханические методы

Деформационные методы	Компенсационные методы	Методы полной разгрузки керна
Метод частичной разгрузки	Метод гидроразрыва	Метод ВНИМИ
Метод разности давлений	Метод плоских домкратов	Метод Хаста
Метод щелевой разгрузки	Метод компенсационной нагрузки	Метод Лимана
Метод параллельных скважин	Метод буровых скважин	
Метод упругих включений		

#### *Метод частичной разгрузки*

Метод основан на измерении деформаций в области массива, разгруженной центральным отверстием.

Этот метод имеет 3 модификации:

- метод разгрузки с наклеиванием тензодатчиков;
- метод разгрузки с использованием съемных тензометров;
- метод разгрузки на большой базе.

Погрешности данных методов зависят от погрешностей измерения исходных величин и упругих характеристик горных пород [3].

#### *Метод щелевой разгрузки*

Этот метод является одним из основных для оценки деформаций массива после нарушения его целостности. По сравнению с другими деформационными методами, метод щелевой разгрузки характеризуется меньшей зависимостью от разномодульности горных пород в зоне измерений [1].

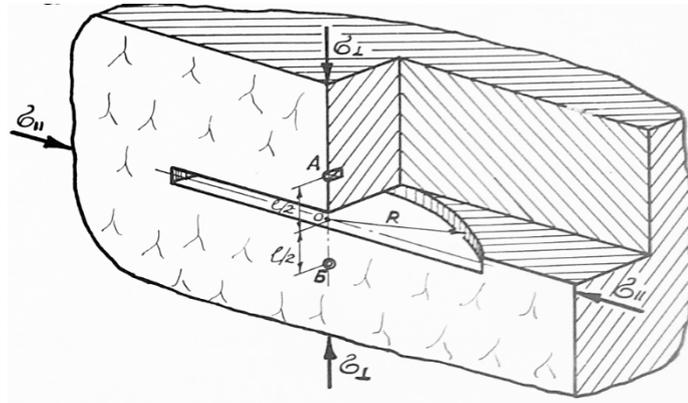


Рис. 1. Схема к измерению напряжений методом щелевой разгрузки

Методика позволяет исключить большинство ураганных значений напряжений, возникающих от влияния локальных одиночных трещин, по сравнению с измерениями деформаций в буровых скважинах; оперативно получить количественные характеристики первоначального поля напряжений в масштабе основных конструктивных элементов систем разработки (рис. 1) [1].

#### *Метод параллельных скважин*

Метод основан на измерении радиальных перемещений стенок скважины, пробуренной в массиве, при его возмущении скважиной большего диаметра, которую бурят параллельно первой [4].

#### *Метод упругих включений*

Данный метод основан на изменении степени преломления света при воздействии на него определенной нагрузки. Для это применяются фотоупругие датчики, обладающие свойством изменять степень прозрачности в поляризованном свете при воздействии на них нагрузки. При комплексном нагружении в таком датчике можно наблюдать сложную картину, обладающую двумя взаимно перпендикулярными осями симметрии, указывающими на направление главных нормальных напряжений (рис. 2) [7].

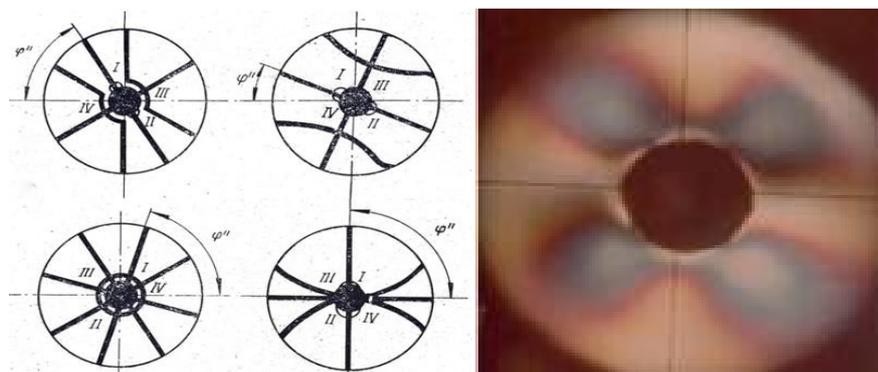


Рис. 2. Схема интерференционных полос в фотоупругом датчике

В случае, когда компоненты таких напряжений равны, в поляризованном свете на картине полос фотоупругого тензометра можно наблюдать ряд concentрических окружностей.

Для определения абсолютных напряжений в массиве данный метод должен использоваться в сочетании с другим методом разгрузки, так как напряжения определяются путем сложения первоначальных напряжений и приращенных напряжений, измеренных с помощью данного метода упругих включений [5].

Внешний диаметр датчика должен быть в 5 – 6 раз больше, чем диаметр центрального отверстия, что делает картину изохром (цветных полос) более наглядной, облегчает определение направления действия главных нормальных напряжений и повышает точность измерения разности хода.

Толщина фотоупругого датчика выбирается исходя из требуемой чувствительности, но должна быть не менее  $0,25 R_2$ ; чрезмерно завышать ее не следует. Так, датчик толщиной 10 мм при измерениях в крепких горных породах имеет чувствительность около  $1 \text{ кгс/см}^2$ .

Фотоупругий датчик, имеющий форму диска или цилиндра с центральным отверстием, изготавливают из оптически активного стекла. Наиболее приемлемыми марками стекол для датчиков при измерении напряжений в крепких горных породах являются боросиликатные кроны типа К и крон-флинт КФ 8 (табл. 2).

Таблица 2

**Оптическая постоянная  $C$ , модуль упругости  $E$  и коэффициент Пуассона  $\mu$  различных марок стекол**

Марка стекла	$C \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кгс}$	$E \cdot 10^{-6} \text{ кгс/см}^3$	$\mu$
К 2	3,20	0,72	0,21
К 20	3,10	0,74	0,22
К 14	2,90	0,78	0,20
К 18	2,90	0,77	0,20
КФ 8	2,90	0,72	0,21
К 5	2,70	0,79	0,21
К 17	2,70	0,81	0,21
К 8	2,65	0,82	0,21

Внешний диаметр датчика должен быть в 5 – 6 раз больше, чем диаметр центрального отверстия, что делает картину изохром более наглядной, облегчает определение направления действия главных нормальных напряжений и повышает точность измерения разности хода.

Толщина фотоупругого датчика выбирается исходя из требуемой чувствительности, но должна быть не менее  $0,25 R_2$ ; чрезмерно завышать их не следует. Так, датчик толщиной 10 мм при измерениях в крепких горных породах имеет чувствительность около  $1 \text{ кгс/см}^2$ .

Повышение чувствительности датчика приводит к увеличению числа полос изохром на единицу длины (особенно у отверстия). Так как разрешающая способность полярископа ограничена, то толщина датчика определяется возможностью различать полосы у отверстия. Обычно для исследования напряженного состояния в крепких поро-

дах при решении большинства горнотехнических задач достаточно иметь датчики толщиной 10 – 20 мм. При решении специальных задач, когда требуется определять напряжения с большей точностью (при малых их значениях), толщина датчика должна быть больше 20 мм (рис. 3). При применении полярископа отражающего типа заднюю сторону датчика покрывают отражающим слоем, защищенным от коррозии слоями краски и клея на основе эпоксидной смолы (рис. 3, б).

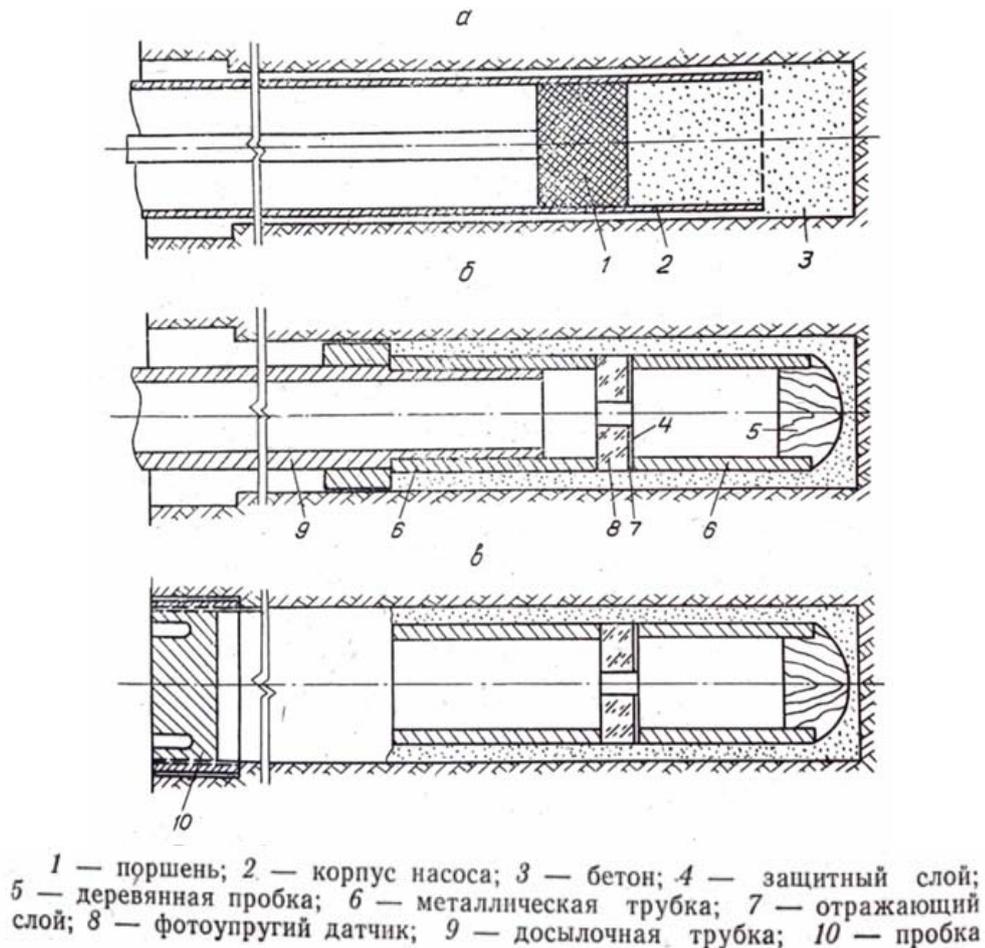


Рис. 3. Схема установки фотоупругих датчиков в скважине:  
а – досылка бетона; б – досылка датчика; в – положение датчика в скважине

Перед установкой датчика в шпур или скважину к его передней и задней стенкам приклеивают стальные трубки (см. рис. 3, б). Заднюю трубку закрывают деревянной пробкой. Стальные трубки выполняют две функции: предохраняют датчик от попадания на его свободные части цементного раствора, обеспечивают равномерность деформации скважины на всем участке установки датчика, приближая фактические условия его работы теоретическим, принятым при вводе формул. Трубки должны иметь жесткость, равную жесткости датчика, что достигается за счет толщины стенок трубок.

Трубки к датчику можно приклеить с помощью любого клея, необходимо лишь обеспечить достаточную прочность на период их досылки в шпур. Длина каждой трубки должна быть не менее  $4R_3$  ( $R_3$  – радиус скважины).

Подготовленный датчик устанавливают в скважине с помощью цементирующего материала. Основным критерием при выборе этого материала являются его упругие свойства и способность сцепления с породой и датчиком. Для установки датчиков из стекла в настоящее время применяется цементно-песчаная смесь (бетон) из цемента марки 500 – 600 и песка с размером зерен до 1 мм в соотношении 1:1. Такой раствор

хорошо сцепляется как с породой, так и со стеклом. Применение обычного бетона при цементировании датчиков возможно в случаях, когда ожидается увеличение сжимающих напряжений или уменьшение растягивающих, т.е. в случае сжатия скважины и датчика. При расширении скважины (уменьшение сжатия или увеличение растяжения в массиве) в случае применения обычного бетона даже при небольшой деформации в пределах первых десятков кгс/см<sup>2</sup> возможен разрыв связи «порода – бетон – датчик». В этом случае датчик не будет фиксировать приращения напряжений.

#### *Компенсационные методы, метод гидроразрыва*

Методы основаны на восстановлении первоначальных напряжений в массиве горных пород и дальнейшего увеличения давления до образования в массиве трещин разрыва [6].

#### *Метод плоских домкратов*

Метод является развитием метода щелевой разгрузки. Его преимущество в том, что он менее чувствителен к локальным неоднородностям массива, так как их влияние на модуль деформации нивелируется более совершенной технологией [3].

#### *Метод компенсационной нагрузки*

Суть метода заключается в восстановлении напряжений на участке исследования массива горных пород. Он объединяет в себе все компенсационные методы [8].

#### *Методы торцевых измерений*

В основе методов взяты характеристики упругого восстановления формы элемента массива при отделении его от основного массива. Но учитывают следующие допущения: массив рассматривается упругий, сплошной и изотропный.

Для метода ВНИМИ бурятся не менее трех достаточно глубоких, разнонаправленных скважин. Данная технология позволяет определить направление главных напряжений, их величину вне зоны влияния выработок и в нетронутом массиве.

В методе Н. Хаста также бурят не менее трех разнонаправленных скважин диаметром не менее 110 мм, но в дополнение бурится опережающая соосная скважина малого диаметра около 40 мм. В ней устанавливают деформометры и фиксируют изменение диаметра центральной скважины по различным направлениям.

Метод Е. Лимана схож с методом Н. Хаста. Так же бурят опережающую соосную скважину малого диаметра, но на ее стенки с помощью специального оборудования наклеивают тензодатчики. Чтобы пересчитать полученные данные в относительные деформации, дополнительно необходимо определить коэффициент Пуассона, модуль Юнга и модуль сдвига [2].

Методы почти не применяются, так как для расчетов требуются дополнительные лабораторные исследования физико-механических свойств пород, а проведение натуральных исследований – очень трудоемкий, сложный процесс.

#### *Геофизические методы*

Существует пять основных групп геофизических методов определения НДС, основанных на изменчивости естественных и искусственных физических полей в массиве с действующими в нем напряжениями. Это ультразвуковой, радиометрический, электрометрический, магнитный, сейсмоакустический группы методов [9]. Эти методы эффективны при исследовании на больших площадях и помогают определить направление и соотношения действующих сил в массиве. Но для того чтобы определить абсолютные значения напряжений, требуется дополнительное изучение исследуемого массива. Поэтому геофизические методы самостоятельно практически не применяются [9].

*Результаты определения первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями на глубоких горизонтах рудника*

В результате анализа ранее выполненных работ по исследованию земной коры выявлены знакопеременные подвижки, локализующиеся, как правило, в зонах крупных тектонических нарушений. Продолжительность этих подвижек невелика и не превышает 2 – 3 месяцев [12 – 14].

Рассмотрим условия определения природных напряжений на подземных рудниках Урала, где их измеряли методом щелевой разгрузки на различных горизонтах. Для того чтобы рассчитать напряжения в массиве в интересующий нас момент времени, нужно знать величину первоначальных напряжений  $\sigma_i^0$ . Величины первоначальных гравитационно-тектонических напряжений без учета переменных во времени напряжений представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Величины первоначальных напряжений, действующих в массиве пород месторождения**

Год проведения измерений	Глубина, $H$ , м	Субмеридиональное, $\sigma_1$ , МПа	Субширотное, $\sigma_2$ , МПа	Вертикальное, $\sigma_3$ , МПа	Переменные во времени напряжения, $\sigma_{\Delta\phi}$ , МПа
1998	-830	-19	-40	-22	-7
2004	-910	-20	-42	-25	-4
2008	-1075	-32	-49	-33	-9
2022	-1150	-37	-55	-33	-13
2020	-1230	-41	-59	-34	-15
2021	-1310	-48	-63	-35	-16
2019	-1390	-55	-67	-37	-17

По результатам измерения напряжений на различных рудниках Урала и Сибири суммарные тектонические и пульсирующие напряжения достигают нескольких десятков МПа. При анализе мировых данных переменная составляющая достигает порядка 10 МПа, что также говорит о значительной величине тектонической составляющей. Для отдельных конструкций при расчете напряженного состояния был задан режим учета собственного веса. Такой подход широко апробирован на практике и представлен в работах [14 – 17].

Таким образом, по результатам измерений природных напряжений, зная глубину залегания выработок, в которых происходили измерения, коэффициент Пуассона и объемный вес горных пород, можно определять гравитационные, тектонические и переменные во времени составляющие первоначальных напряжений.

*Выводы*

1. Одним из факторов, наиболее влияющих на проявления горного давления в динамических формах, является действие в массиве горных пород значительных гравитационно-тектонических и переменных во времени напряжений.

2. В соответствии с гипотезой формирования напряжений в массиве горных пород на месторождении величины напряжений в любое время в соответствии с графиком представлены на рис. 4.

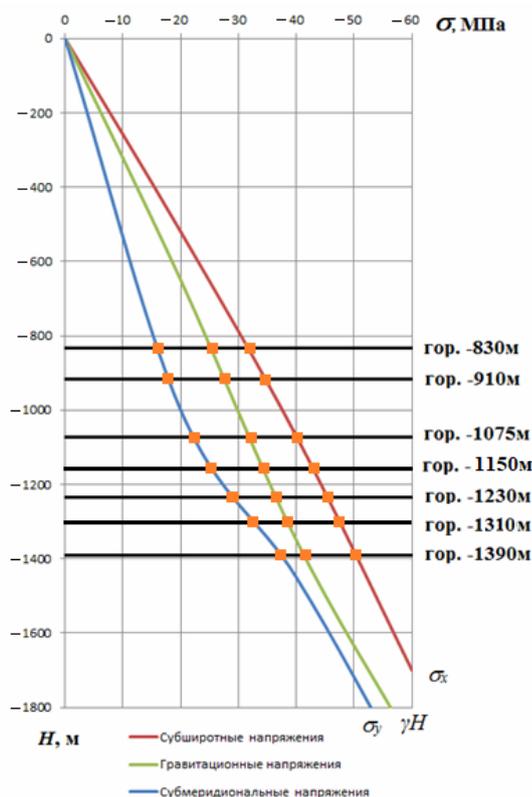


Рис. 4. График изменения гравитационно-тектонических напряжений с глубиной без учета переменных во времени напряжений

### Заключение

Комплексный анализ полученных результатов позволил выявить следующие закономерности распределения напряжений в массиве горных пород месторождения.

С увеличением глубины разработки отмечается рост напряженности шахтного поля. По отношению к весу налегающих пород, изменяющемуся с глубиной по линейному закону, горизонтальные и вертикальные напряжения определяются следующими соотношениями:

$\sigma_1 / \gamma H = 0,84;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,78;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,0;$ (на глубине -830 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 0,81;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,68;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,0;$ (на глубине -910 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,09;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,67;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,13;$ (на глубине -1070 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,19;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,78;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,06;$ (на глубине -1150 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,21;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,72;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,01;$ (на глубине -1230 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,35;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,78;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,01;$ (на глубине -1310 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,48;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,81;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,0;$ (на глубине -1390 м).

### Список литературы

1. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 333 с.
2. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., 2012. *Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс*. Москва: МГГУ, 112 с.
3. Зотеев О.В., 2003. *Геомеханика: учебное пособие для студентов ВУЗов*. Екатеринбург: УГГУ, ИГД УРО РАН, 252 с.
4. Барышников В.Д., Курленя М.В., Гахова Л.Н., 1998. Опыт применения метода параллельных скважин для оценки действующих напряжений в бетонном массиве. *Гидротехническое строительство*, № 9, С. 59.

5. Катков Т.А., 1978. *Исследование горного давления с применением фотоупругих элементов: монография*. Москва: Наука, 130 с.
6. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н., 1994. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород. *ФТПРПИ*, № 1, С. 3 – 20.
7. Криницын Р.В., 2020. Геодеформационный полигон и геомеханические исследования на шахте Магнетитовая. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 105 – 115.
8. Гребёнкин С.С., Павлыш В.Н., Самойлов В.Л., Петренко Ю.А., 2010. *Управление состоянием массива горных пород*. Донецк: «ВИК», 193 с.
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: 10.25018/02361493-2020-31-0-255-263.
10. Зубков А.В., Феклистов Ю.Г., Липин Я.И., 2016. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 41 – 49. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.041>
11. Сентябов С.В., 2022. Выбор методов управления горным давлением при освоении глубокозалегающих месторождений. *Проблемы недропользования*. DOI:10.25635/2313-1586.2022.01.007
12. Sentyabov S.V., 2021. The Influence of Time-Varying Stresses in the Rock Mass on the Stress State of Mine Workings. *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 720. p. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012013
13. Сентябов С.В., 2020. Геомеханические аспекты формирования природных напряжений в бетонной крепи шахтных стволов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 211 – 220. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207
14. Сентябов С.В., 2019. Иерархическая блочность массива при решении геомеханических задач на примере Гайского ГОКа. *SEYMARTEC MINING: сборник докладов материалов пятого международного форума "Эффективность и безопасность горнодобывающей промышленности - 2019"*, (22 – 23 октября 2019). Сеймартек. Челябинск, С. 18.
15. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y., 2019. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, pp. 406 – 417.
16. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W., 2018. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, pp. 55 – 63.
17. Rib S.V., 2018. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 206. pp. 1 – 4 (012011) (accessed: <http://library.sibsiu.ru>).

## References

1. Zubkov A.V., 2001. *Geomehanika i geotehnologiya [Geomechanics and geotechnology]*. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 333 p.
2. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., 2012. *Metody opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyh porod: nauchno-obrazovatel'nyj kurs . [Methods for determining the stress-strain state of a rock mass: a scientific and educational course]*. Moscow: MGGU, 112 p.
3. Zoteev O.V., 2003. *Geomehanika: uchebnoe posobie dlya studentov VUZov [Geomechanics: a textbook for height school students]*. Ekaterinburg: UGGU, IGD URO RAN, 252 p.

4. Baryshnikov V.D., Kurlenya M.V., Gahova L.N., 1998. Opyt primeneniya metoda parallel'nyh skvazhin dlya ocenki deistvuyushchikh napryazhenij v betonnom massive [Experience of using of the parallel wells method to assess the operating stresses in a concrete array]. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo*, № 9, P. 59.
5. Katkov T.A., 1978. Issledovanie gornogo davleniya s primeneniem fotouprugih jelementov: monografiya [Investigation of rock pressure with the use of photoelastic elements: monograph]. Moscow: Nauka, 130 p.
6. Kurlenya M.V., Leont'ev A.V., Popov S.N., 1994. Razvitie metoda gidrorazryva dlya issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya massiva gornyh porod [Development of a hydraulic fracturing method for studying the stress state of a rock mass]. *FTPRPI*, № 1, P.3 - 20.
7. Krinicyн R.V., 2020. Geodeformacionnyj poligon i geomechanicheskie issledovaniya na shahte Magnezitovaya [Geodeformation polygon and geomechanical studies at the Magnesitovaya mine]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, № 3 – 1, P. 105 - 115.
8. Grebjonkin S.S., Pavlysh V.N., Samojlov V.L., Petrenko .A., 2010. Upravlenie sostoyaniem massiva gornyh porod [Management of the state of the rock mass]. Doneck: «VIK», 193 p.
9. Harisov T.F., Mel'nik V.V., Harisova O.D., Zamyatin A.L., 2020. Geofizicheskie issledovaniya massiva gornyh porod v usloviyah podzemnogo rudnika [Geophysical studies of the rock mass in the conditions of an underground mine]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, № 3 – 1, P. 255 – 263. DOI: 10.25018/02361493-2020-31-0-255-263.
10. Zubkov A.V., Feklistov Yu.G., Lipin Ya.I., 2016. Deformacionnye metody opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya porod na ob#ektah nedropol'zovaniya [Deformation methods for determining the stress state of rocks at subsurface use objects]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4, P. 41 – 49. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.041>
11. Sentyabov S.V., 2022. Vybor metodov upravleniya gornym davleniem pri osvoenii glubokozalegashhih mestorozhdenij [Choice of methods for managing rock pressure during the development of deep-lying deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*. DOI:10.25635/2313-1586.2022.01.007
12. Sentyabov S.V., 2021. The Influence of Time-Varying Stresses in the Rock Mass on the Stress State of Mine Workings. *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 720. p. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012013
13. Sentyabov S.V., 2020. Geomechanicheskie aspekty formirovaniya prirodnyh napryazhenij v betonnoj krep'i shahtnyh stvolov [Geomechanical aspects of the formation of natural stresses in the concrete support of mine shafts]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, № 3 – 1, P. 211 – 220. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207
14. Sentyabov S.V., 2019. Ierarhicheskaya blochnost' massiva pri reshenii geomechanicheskikh zadach na primere Gajskogo GOKa [Hierarchical blockiness of the array in solving geomechanical problems on the example of the Gaisky GOK]. *SEYMARTEC MINING: sbornik dokladov materialov pyatogo mezhdunarodnogo foruma "Jeffektivnost' i bezopasnost' gornodobyvashhej promyshlennosti - 2019"*, (22 – 23 oktyabrya 2019). Sejmartek. Chelyabinsk, P. 18.
15. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y., 2019. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, pp. 406 – 417.
16. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W., 2018. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, pp. 55 – 63.
17. Rib S.V., 2018. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 206. pp. 1 – 4 (012011) (accessed: <http://library.sibsui.ru>).

УДК 662.83:550.3

**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

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ  
ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО  
РАЙОНИРОВАНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ  
ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
РАДОНОМЕТРИИ\***

*Аннотация:*

Представлены результаты аналитических исследований с целью совершенствования методики геодинамического районирования массива горных пород с использованием радонометрии. Методика основана на положении, что современная геодинамическая активность принимает участие в формировании поля радоновых эманацій в почвенном воздухе. Но кроме современной геодинамической активности на формирование распределения значений радоновых эманацій в почвенном воздухе влияет ряд других факторов, не связанных с современными движениями блоков, слагающих массив горных пород. Для определения только геодинамической составляющей формирования значений поля радоновых эманацій используется нормирование. На основании анализа опыта выполнения экспериментальных исследований по геодинамическому районированию массива горных пород с использованием радонометрии и научных публикаций были внесены изменения в методику геодинамического районирования в части изменения состава критериев подразделения исследуемой территории на участки с характерным, выдержанным фактором формирования поля радоновых эманацій, не связанных с современной геодинамической активностью. Установлено, что основным процессом, приводящим к увеличению интенсивности выделения радона горными породами, выступает физическое и химическое выветривание, приводящее к разрушению первичных минералов, слагающих магматические и метаморфические породы, и постепенному преобразованию их в гипергенные тонкодисперсные высокопористые образования. В то же время исходя из многофакторности формирования значений коэффициента диффузии в горных породах, при выполнении геодинамического районирования с использованием радонометрии, выполнять исследования по дифференцированию исследуемого участка по данному критерию излишне трудозатратно и поэтому нецелесообразно в рассматриваемой методике.

*Ключевые слова:* массив горных пород, тектонические нарушения, радонометрия, современная геодинамическая активность, тектонические нарушения, гранулометрический состав.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.064

**Dalatkazim Timur Sh.**  
Candidate of Technical Sciences,  
Head of the Laboratory of technologies f  
or reducing the risk of catastrophes  
in subsoil use,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg, 58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [9043846175@mail.ru](mailto:9043846175@mail.ru)

**METHODOLOGICAL PROBLEMS  
OF GEODYNAMIC ZONING  
OF A ROCK MASSIF BY USING  
RADONOMETRY**

*Abstract:*

The article presents the results of analytical studies aimed at improving the methodology of geodynamic zoning of a rock mass with using radonometry. The methodology bases on the proposition that current geodynamic activity takes part in the formation of a field of radon emanations in the soil air. But in addition to current geodynamic activity, a number of other factors are involved in the formation of the distribution of the values of radon emanations in the soil air, which are not related to the modern movements of the blocks composing the rock mass. To determine only the geodynamic component of the formation of the values of the radon emanation field, normalization is used. Based on the analysis of the experience of performing experimental studies on geodynamic zoning of a rock mass using radonometry and of scientific publications, we determined changes in the methodology of geodynamic zoning in terms of modifying the criteria composition for dividing the studied territory into areas with a characteristic, sustained factor in the formation of a field of radon emanations, not related with current geodynamic activity. We established that the main process leading to an increase in the intensity of radon release by rocks is physical and chemical weathering, which leads to the destruction of primary minerals composing igneous and metamorphic rocks, and their gradual transformation into hypergenic finely dispersed highly porous formations. At the same time, based on the multifactorial nature of the formation of the values of the diffusion coefficient in rocks, when performing geodynamic zoning using radonometry, it is unnecessarily labor-intensive to carry out research on the differentiation of the studied area according to this criterion and therefore impractical in the methodology under consideration.

*Key words:* rock mass, tectonic disturbances, radonometry, current geodynamic activity, tectonic disturbances, granulometric composition.

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

## Введение

Современная геодинамическая активность массива горных пород играет одну из значимых ролей в причинах возникновения природно-техногенных катастроф на объектах недропользования. Для решения вопросов предотвращения таких катастроф требуется оценить уровень геодинамической активности тектонических нарушений, выявить геодинамически опасные зоны. Геодинамическая диагностика участков недропользования на всех стадиях – от изысканий до эксплуатации объектов – предусматривает несколько этапов, один из которых, направленный на детализацию тектонического строения массива горных пород, точное определение положения тектонических нарушений, их размеров, базируется на геофизических методах исследования. Для выявления тектонических нарушений, детализации тектонического строения, геодинамического районирования в качестве экспресс-метода используется радонометрия.

Радон в горных породах образуется за счет радиоактивного распада радия, этот процесс является постоянным и не зависит от внешних условий.

Поле радоновых эманаций в горном массиве формируется под влиянием геодинамических и не геодинамических факторов, определяемых вещественным составом горных пород и параметрами эманирования, зависящих от физического состояния материала и от среды, в которую выходит эманация.

*Геодинамические факторы формирования аномалий радоновых эманаций надразломных зон:*

- повышенная проницаемость горных пород, характерная для активных участков разломной зоны;
- влияние упругих колебаний, образующихся при геодинамических движениях, на горные породы;
- при геодинамических подвижках в трещинах формируются локальные, импульсные участки разряжения и увеличения давления, что способствует продвижению газов по порам и микротрещинам.

Таким образом, аномалии радоновых эманаций над участками тектонических разломов свидетельствуют о наличии современного геодинамического процесса, а величины радоновых эманаций непосредственно зависят от степени проявления современной геодинамической активности, независимо от глубины заложения разлома и мощности покровных отложений, что позволяет использовать результаты эманационной радоновой съемки для геодинамической диагностики горного массива.

Факторы формирования поля радоновых эманаций, не связанные с современной геодинамической активностью:

- *геохимический состав горных пород.* Наибольшая концентрация урана и радия в магматических горных породах наблюдается в кислых, а наименьшая – в ультраосновных породах [1];
- *метеорологические факторы.* К метеоусловиям, которые могут оказывать влияние на величину объемной активности радона (ОАР) в почвенном воздухе ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) относятся изменение атмосферного давления, сезонное промерзание грунта, выпадение атмосферных осадков, изменение температуры приземного слоя атмосферы [2]. Наибольшее влияние на концентрацию радона в почвенном воздухе оказывают два метеорологических фактора:
  - замерзание или сильное смачивание поверхности почвы. Увеличение влагонасыщенности почвы приводит к уменьшению выделения радона, так как поры заполняются водой, которая затрудняет его миграцию [3 – 5];
  - изменение атмосферного давления. Исследования, выполненные в Институте геофизики УрО РАН, показали, что при отборе проб при глубине шпура 0,8 – 1,0 м изменения атмосферного давления будут влиять на концентрацию радона в пробе отбираемого почвенного воздуха незначительно в пределах погрешности прибора [3];

– влияние лунно-солнечных приливов. Роль приливного фактора в эманации радона весьма значительна. Изменение проницаемости каналов миграции подземных газов в результате разуплотнения среды в приливной волне деформации приводит к характерным периодичностям и циклическостям [6 – 9];

– влияние гидрогеологических условий. Заполнение пор, капилляров, микротрещин водой значительно снижает эманирование радона из почвы, грунтов и горных пород. Изменение глубины уровня грунтовых вод оказывает влияние на процессы выделения и миграции радона.

Ранее при выполнении геодинамического районирования с использованием радонометрии анализировалось суммарное поле радоновых эманаций геодинамических и не геодинамических источников формирования [10]. Не геодинамические факторы формирования поля радоновых эманаций в почвенном воздухе приводили к искажению получаемой картины распределения современной геодинамической активности исследуемого массива горных пород.

Методика геодинамического районирования с использованием радонометрии, учитывающая не геодинамические факторы формирования поля эманаций, была разработана в ИГД УрО РАН и состоит в следующем:

1. На изучаемой площади выполняются измерения объемной активности радона ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) в почвенном воздухе радиометрами альфа-активных газов, например, РГА-500 по профильным линиям из шпуров глубиной 0,8 – 1,0 м.

2. Одновременно с измерением объемной активности радона в почвенном воздухе выполняются исследования для дифференциации изучаемой площади на участки по следующим характеристикам:

- диффузионным свойствам покровных отложений;
- вещественному составу горных пород;
- положению уровня грунтовых вод;
- влагонасыщенности почвы по площади.

3. На этапе камеральной обработки с целью определения геодинамической составляющей формирования поля радона выполняется нормирование значений объемной активности радона в почвенном воздухе [11, 12]. Для этого полученные в результате измерений значения объемной активности радона группируются по принадлежности местоположения точки измерения к однотипным участкам по вышеперечисленным характеристикам. Кроме того, для устранения влияния лунно-солнечных приливов значения группируются по времени, если промежуток времени между сериями измерений более 4-х часов [13].

Далее выполняется определение нормированных значений объемной активности радона для каждой точки измерения группы:

$$N_i = Q_i / Q_{\text{ср. группы}}$$

где  $N_i$  – нормированная объемная активность радона точки измерения  $i$ , безразмерная величина;

$Q_i$  – значение объемной активности радона в почвенном воздухе точки измерения на профильной линии,  $\text{Бк}/\text{м}^3$ ;

$Q_{\text{ср. группы}}$  – среднеарифметическое значение объемной активности радона в почвенном воздухе группы,  $\text{Бк}/\text{м}^3$ .

4. Составляется карта распределения нормированных значений объемной активности радона в почвенном воздухе изучаемой территории, на основе которой осуществляется ее геодинамическое районирование [15].

Опыт практического применения методики геодинамического районирования с использованием радонометрии показал необходимость изменения набора критериев для дифференциации территории исследований по не геодинамическим факторам.

Возможность использования критерия по диффузным свойствам для дифференциации покровных отложений определяется по литературным источникам, однако при выполнении геодинамического районирования не используется ввиду неоправданной трудоемкости определения.

Коэффициент диффузии  $D$  численно равен массе вещества, проникающего через площадь  $1 \text{ см}^2$  за  $1 \text{ с}$ , при градиенте концентрации, равном  $1 \text{ г/см}^4$ . Размерность  $D$  -  $\text{см}^2/\text{с}$ . Величина коэффициента диффузии зависит от целого ряда факторов, главными из которых являются пористость и проницаемость породы, ее влажность, структура и температурные условия, в которых происходит диффузия эманации. Проницаемость зависит от структуры пор и от их размера. Коэффициент  $D$  с уменьшением диаметра пор снижается. Именно этим объясняется тот факт, что в глинах с пористостью  $40 - 50 \%$  диффузия эманации проявляется меньше, чем в песках с более низкой пористостью. При увеличении влажности породы коэффициент эманирования в общем случае снижается. Это связано с уменьшением диффузии эманации. Изменение влажности породы  $w$  вызывает резкое изменение коэффициента диффузии. Так, увеличение  $w$  от  $3$  до  $15 \%$  приводит к уменьшению коэффициента диффузии в рыхлых отложениях почти на целый порядок. Это связано с закупоркой пор в породе водой, которая характеризуется очень низким коэффициентом диффузии [5, 14].

По результатам анализа научных публикаций было установлено, что выделение радона, образующегося в твердом веществе в результате радиоактивных превращений, происходит, главным образом, за счет радиоактивной отдачи. Эффект радиоактивной отдачи – основное явление, вызывающее эманирование. Атомы радия ( $\text{Ra}_{226}$ ), распадаясь, испускают альфа-частицу (ядро гелия), и превращаются в атомы радона ( $\text{Rn}_{222}$ ), при этом некоторая часть энергии альфа-распада передается вновь образовавшимся атомам радона (энергия отдачи). За счет энергии отдачи вновь образованные атомы радона вырываются со своих прежних позиций, в том числе в кристаллической решетке, и движутся в среде. Такие движущиеся атомы называются атомами отдачи.

Эманирование во многом определяется размером и формой пор и частиц (зерен, кристаллов), слагающих вещество среды.

Основным процессом, приводящим к увеличению интенсивности выделения радона горными породами, выступает физическое и химическое выветривание, приводящее к разрушению первичных минералов, слагающих магматические и метаморфические породы, и постепенному преобразованию их в гипергенные тонкодисперсные высокопористые образования. Эти процессы приводят к высвобождению радия из кристаллической матрицы минералов и сорбции его на дисперсных продуктах выветривания, что повышает эманирующую способность образований зоны выветривания по сравнению с глубинными породами в соответствии размерам дисперсных частиц. В однородных по литологическому составу и генезису грунтах (обладающих, соответственно, близкими физическими свойствами), коэффициент эманирования распределяется однородно [16]. Из постоянства эманирования пород, обладающих однородным составом и генезисом (историей формирования), вытекает важное практическое следствие – возможность использования в методике геодинамического районирования горного массива с использованием радонометрии критерия группирования измеренных значений ОАР в почвенном воздухе по гранулометрическому составу дисперсных отложений места измерений.

#### *Заключение*

Таким образом, на основании опыта практического применения геодинамического районирования горного массива с использованием радонометрии в качестве экспресс-метода, определена необходимость внести коррективы в методику

его выполнения – критерий «по диффузионным свойствам покровных отложений» заменен на «по гранулометрическому составу покровных отложений».

Распределение дисперсных отложений по гранулометрическому составу в пределах территории исследований определяется по фондовым материалам или в процессе выполнения полевых исследований.

### Список литературы

1. Войткевич Г.В., 1961. *Проблемы радиогеологии*. Москва: Госгеолтехиздат, 272 с.
2. Mentés G., Eper-Papai I., 2015. Investigation of temperature and barometric pressure variation effects on radon concentration in the Sopronbanfalva Geodynamic Observatory, Hungary. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 149, P. 64 – 72.
3. 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. Сборник трудов Девярых геофизических чтений им. В.В. Федьинского*. Тверь: ООО Изд-во «ГЕРС», С. 317 – 320.
4. Баранов В.И., 1955. *Радиометрия*. Москва: Изд-во АН СССР, 327 с.
5. Новиков Г.Ф., 1989. *Радиометрическая разведка: учебник для вузов*. Ленинград: Недра, 407 с.
6. Адушкин В.В., Спивак А.А., Харламов В.А., 2012. Влияние лунно-солнечного прилива на вариации геофизических полей на границе земная кора – атмосфера. *Физика земли*, № 2, С. 14 – 26.
7. Barberio M.D., Gori F., Barbieri M., Billi A., Devoti R., Doglioni C., Petitta M., Riguzzi F. and Rusi S., 2018. Diurnal and Semidiurnal Cyclicity of Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) in Groundwater, Giardino Spring, Central Apennines, Italy. *Water*. Vol. 10(9), P. 1276.
8. Mentés G., 2018. Investigation of the relationship between rock strain and radon concentration in the tidal frequency-range. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 155., P. 232 – 236.
9. Groves-Kirkby, C.J., Denman, A.R., Crockett, R.G.M., Phillips, P.S., Gillmore, G.K., 2006. Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time-series from Northamptonshire, UK. *Sci. Total Environ.* 367 (1):191 – 202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.019>.
10. Горбушина Л.В., Рябоштан Ю.С., 1975. Эманационный метод индикации геодинамических процессов при инженерно-геологических изысканиях. *Советская геология*, № 4, С. 48 – 50.
11. Давыдов Ю.Б., Талалай А.Г., Шинкарьок И.Е., 2018. *Комплексная интерпретация геофизических данных: учебное пособие*. Екатеринбург: УГГУ, 128 с.
12. Сон Зэчжан, Лобусев М.А., Дзянг Дженсюэ, 2017. Повышение эффективности прогнозирования содержания природного газа в континентальных сланцевых породах на примере бассейна Ордос. *Газовая промышленность*, № 6.
13. Козлова И.А., Юрков А.К., 2005. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях. *Уральский геофизический вестник*, № 7, С. 30 – 34.
14. Новиков Г.Ф., Капков Ю.Н., 1965. *Радиоактивные методы разведки*. Ленинград: Недра, 759 с.
15. Далатказин Т.Ш., 2015. Использование режимных наблюдений за полем радоновых эманаций в зоне техногенного воздействия при отработке южной залежи Песчанской группы месторождений. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 2, С. 162 – 167.
16. Микляев П.С., 2015. *Научные основы оценки потенциальной радоноопасности платформенных территорий: дис. ... д-ра геолого-минералогических наук*. Москва, 307 с.

## References

1. Vojtkевич G.V., 1961. Problemy radiogeologii [Problems of radiogeology]. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 272 p.
2. Mentés G., Eper-Papai I., 2015. Investigation of temperature and barometric pressure variation effects on radon concentration in the Sopronbanfalva Geodynamic Observatory, Hungary. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 149, P. 64 – 72.
3. Utkin V.I., Yurkov A.K., Kozlova I.A., 2008. Vydelenie radona iz gornyh porod pri vozdeystvii na nih uprugih kolebanij razlichnogo diapazona [Release of radon from rocks when exposed to elastic vibrations of various ranges]. *Geofizika XXI stoletiya. Sbornik trudov Devyatykh geofizicheskikh chtenij im. V.V. Fedynskogo*. Tver': OOO Izd-vo «GERS», P. 317 – 320.
4. Baranov V.I., 1955. Radiometriya [Radiometry]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 327 p.
5. Novikov G.F., 1989. Radiometricheskaya razvedka: uchebnik dlya vuzov [Radiometric exploration: a textbook for high schools]. Leningrad: Nedra, 407 p.
6. Adushkin V.V., Spivak A.A., Harlamov V.A., 2012. Vliyanie lunno-solnechnogo priliva na variacii geofizicheskikh polej na granice zemnaya kora – atmosfera [Influence of the lunar-solar tide on the variations of geophysical fields at the boundary of the earth's crust – atmosphere]. *Fizika zemli*, № 2, P. 14 – 26.
7. Barberio M.D., Gori F., Barbieri M., Billi A., Devoti R., Doglioni C., Petitta M., Riguzzi F. and Rusi S., 2018. Diurnal and Semidiurnal Cyclicity of Radon (<sup>222</sup>Rn) in Groundwater, Giardino Spring, Central Apennines, Italy. *Water*. Vol. 10(9), P. 1276.
8. Mentés G., 2018. Investigation of the relationship between rock strain and radon concentration in the tidal frequency-range. *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 155, P. 232 - 236.
9. Groves-Kirkby, C.J., Denman, A.R., Crockett, R.G.M., Phillips, P.S., Gillmore, G.K., 2006. Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time-series from Northamptonshire, UK. *Sci. Total Environ.* 367 (1):191 – 202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.11.019>.
10. Gorbushina L.V., Ryaboshtan Yu.S., 1975. Jemanacionnyj metod indikacii geodinamicheskikh processov pri inzhenerno-geologicheskikh izyskaniyah [Emanation method of indication of geodynamic processes in engineering-geological surveys]. *Sovetskaya geologiya*, № 4, P. 48 – 50.
11. Davydov Yu.B., Talalaj A.G., Shinkaryuk I.E., 2018. Kompleksnaya interpretaciya geofizicheskikh dannyh: uchebnoe posobie [Complex interpretation of geophysical data: a textbook]. Ekaterinburg: UGGU, 128 p.
12. Son Zjeczhan, Lobusev M.A., Dzjang Dzhensjuje, 2017. Povyshenie jeffektivnosti prognozirovaniya sodержaniya prirodno go gaza v kontinental'nyh slancevyh porodah na primere bassejna Ordos [Improving the forecasting efficiency of the of natural gas content in continental shale rocks on the example of the Ordos basin]. *Gazovaya promyshlennost'*, № 6.
13. Kozlova I.A., Yurkov A.K., 2005. Metodicheskie voprosy izmereniya sodержaniya radona-222 v pochvennom vozduhe pri monitoringovyh nablyudeniyah [Methodological issues of measuring radon-222 content in soil air during monitoring observations]. *Ural'skij geofizicheskij vestnik*, № 7, P. 30 – 34.
14. Novikov G.F., Kapkov Yu.N., 1965. Radioaktivnye metody razvedki [Radioactive methods of exploration]. Leningrad: Nedra, 759 p.
15. Dalatkazin T.Sh., 2015. Ispol'zovanie rezhimnyh nablyudenij za polem radonovyh jemanacij v zone tehnogenno go vozdeystviya pri otrabotke yuzhnoj zalezhi Peschanskoj gruppy mestorozhdenij [Use of regime observations of the radon emanation field in the zone of technogenic impact during the development of the southern deposit of the Peschanskaya group of deposits]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*, № 2, P. 162 – 167.
16. Mikliaev P.S., 2015. Nauchnye osnovy otsenki potentsial'noi radonoopasnosti platformennykh territorii: dis. ... d-ra geologo-mineralogicheskikh nauk [Scientific basis for assessing the potential radonic risk of platform territories: dis. ... doctor of Geological and Mineralogical Sciences]. Moscow, 307 p.

УДК 662.834:622.272

**Усанов Сергей Валерьевич**  
заведующий лабораторией  
сдвижений горных пород,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [usv@igduran.ru](mailto:usv@igduran.ru)

**АНАЛИЗ ИСТОРИЧЕСКИХ ДАННЫХ  
ПО СТАРЫМ ШАХТАМ ЗОЛОТОРУДНЫХ  
ДАЕК АННЕНСКАЯ И АНИКИНСКАЯ  
ДЛЯ ПРОГНОЗА БЕЗОПАСНОСТИ  
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ\***

*Аннотация:*

*Объектом исследования являются горные выработки Березовского золоторудного месторождения по дайкам Анненская и Аникинская, а также по россыпи золота. Цель работы – спрогнозировать на участке развитие процесса сдвижения от старых подземных горных работ и оценить безопасность строительства производственного здания нормального уровня ответственности, рекомендовать мероприятия по обеспечению безопасности эксплуатации.*

*Методы исследования: анализ исторических горно-геологических материалов по разработке золоторудных даек, геоинформационное моделирование, инструментальные исследования структуры массива горных пород, маршрутное обследование территории, поиск данных о провалах поверхности по базе данных.*

*Оценено состояние пород подработанного горного массива, сделан прогноз развития процесса сдвижения и даны рекомендации по безопасному использованию подработанного земельного участка. Результаты исследований используются на стадии планирования территории и позволяют снизить риск аварий и чрезвычайных ситуаций при эксплуатации территорий в местах залегания подземных горных выработок, повышают безопасность населения, способствуют устойчивости зданий.*

*Ключевые слова: сдвижение, старые горные выработки, шахта, геофизические исследования, безопасность, прогноз и оценка, рекомендации по застройке.*

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.070

**Usanov Sergey V.**  
Head of the Rock movement laboratory,  
Institute of Mining,  
Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [usv@igduran.ru](mailto:usv@igduran.ru)

**ANALYSIS OF HISTORICAL DATA  
ON THE OLD MINES  
OF THE ANNENSKAYA  
AND ANIKINSKAYA GOLD DIKES  
FOR PREDICTING THE SAFETY  
OF THE EARTH'S SURFACE**

*Abstract:*

*The object of the study is the mining of the Berzovsky gold deposit on the Annenskaya and the Anikinskaya dykes, as well as on the placer of gold. The purpose of this work is to forecast the development of the process of moving away from old underground mining operations at the site and to assess the safety of the construction of a production building of a normal responsibility level, as well as to recommend measures to ensure the safety of operation.*

*Research methods are: analysis of historical mining and geological materials about the development of gold ore dikes, geoinformation modeling, instrumental studies of the structure of the rock mass, route survey of the territory, and search for data about surface failures in the database.*

*The condition of the rocks of the worked-up mountain massif is assessed, a forecast of the development of the displacement process is made and recommendations are given for the safe use of the worked-up land plot. The results of the research are used at the planning stage of the territory, and they allow to reduce the risk of accidents and emergencies during the operation of territories in places of underground mining, increase the safety of the population, and contribute to the stability of buildings.*

*Key words: displacement, old mine workings, mine, geophysical research, safety, forecast and assessment, recommendations for development.*

*Введение*

На подработанных территориях происходят деформации земной поверхности, и они распространены во всем мире [1– 6]. Особенным случаем являются территории над старыми шахтами, которые разрабатывались в 18 – 19 веках [7, 8]. Важным отличием от современных шахт являются скудные сведения о геометрических и пространственных данных разработки, их низкая точность и долгое бесконтрольное пребывание в подземном пространстве. В таких случаях для оценки безопасности поверхности над старой шахтой большое значение имеет каждая деталь, которая могла бы указать на место

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПР, тема No (FUWE-2022-0003), рег. No1021062010536-3-1.5.1.

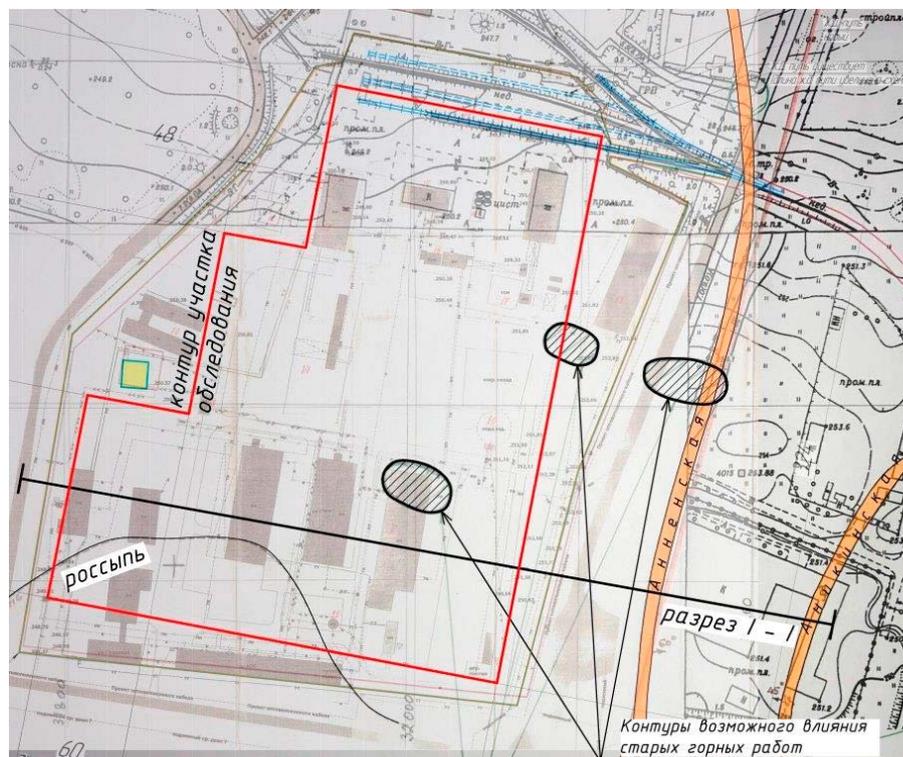
горных выработок, их влияние на поверхность, глубину разработки и др. К историческим данным, которые используются для анализа, относятся краткие текстовые сведения о старых горных разработках месторождения или конкретного фрагмента земной поверхности, географические характеристики, изображения, характеризующие горно-геологическую ситуацию, формы рельефа и др. Все эти характеристики способствуют реставрации модели подработки участка, являющейся основой для выбора инструментальных методов исследования и прогноза деформаций поверхности.

Безопасность застройки подработанных территорий необходимо оценивать на основе комплекса исследований, включающего методы геодезических и геофизических исследований [9 – 11], а также маршрутное обследование поверхности. Существуют методики прогноза процесса сдвижения на подработанных территориях, которые основаны на комплексном анализе негативных факторов и использовании специализированных инструментальных исследований, дешифрировании архивных спутниковых снимков территорий [9 – 12].

По таким методикам исследовано более 4 км<sup>2</sup> подработанных территорий в городах Свердловской и Челябинской областей, Пермского края, Республики Коми, Республики Казахстан [7 – 13]. Безаварийная эксплуатация зданий (в том числе жилых многоэтажных) и сооружений на обследованных площадях подтверждает эффективность методик.

#### Объект исследования

Земельный участок в г. Березовский Свердловской области расположен на площади Березовского золоторудного месторождения. Исторические данные предоставлены недропользователем и представляют собой текст объемом 200 слов и одно растровое изображение поверхности участка, где отмечены расположения золоторудных даек и некоторые контуры возможного распространения подземных горных работ. Вблизи участка были старые шахты, которые разрабатывали дайки Анненская, Аникинская и небольшие россыпи золота (рис. 1). В настоящее время горные работы здесь не ведутся, запасов, подлежащих отработке, не числится.



Примечание. Красным выделена граница исследований

Рис. 1. Границы влияния подземных горных работ от старых шахт даек Анненская и Аникинская

Площадка исследований находится в северо-западной части города. Со всех сторон она ограничена промышленной застройкой. На участке были построены здания 20 века. Поверхность имеет естественный рельеф. Площадь исследуемой территории составляет 0,068 км<sup>2</sup>. От всей площади Березовского месторождения [8] участок составляет 0,3 %. Однако по сравнению с размерами других участков, которые в практике строительства на подработанных территориях чаще всего исследуются на предмет безопасности и составляют 0,01 км<sup>2</sup> [7, 8, 12], площадь исследований довольно велика.

Дайка Анненская простирается в субмеридиональном направлении восточнее участка на 100 м и имеет крутое восточное падение под углом 60°. По историческим данным в районе участка дайка подверглась горным работам на глубину до 18 м. Однако достоверные данные о местах ведения горных работ и их объеме отсутствуют. В центре участка достоверно отмечено две локальные области, где были разработки. На остальной территории сведения о разработках отсутствуют. С учетом падения и простиранения дайки Анненская подземные горные выработки должны находиться за пределами участка. Возраст возможных горных разработок составляет более 100 лет.

Восточнее дайки Анненская параллельно залегает дайка Аникинская, которая имеет наклонное западное падение под углом 45°. Сведения о разработке дайки отсутствуют, но направление падения рудного тела под участок обусловило необходимость ее учета при оценке безопасности застройки.

Под южной частью участка залегает россыпь. Россыпь – почвенный пласт в виде скопления рыхлого или цементированного обломочного материала, содержащего в виде зерен, их обломков или агрегатов ценные минералы. Россыпь разрабатывалась подземным способом в период 1825 – 1838 гг. Система разработки – столбы с поверхности на глубину до 10 м. Детальные сведения о расположении столбов и разведочных шурфов отсутствуют.

О наличии подземных капитальных вертикальных (шурфы, лихты, шахты) и горизонтальных (штреки) горных выработок под участком сведения отсутствуют.

#### *Геоинформационная геомеханическая модель подработки участка*

На основе геометрических характеристик залегания золоторудных даек вблизи участка и информации о расположении россыпи сделана двумерная модель подработки участка (рис. 2). Модель представляет собой вертикальный горно-геологический разрез массива горных пород под участком исследования, на который спроецированы данные

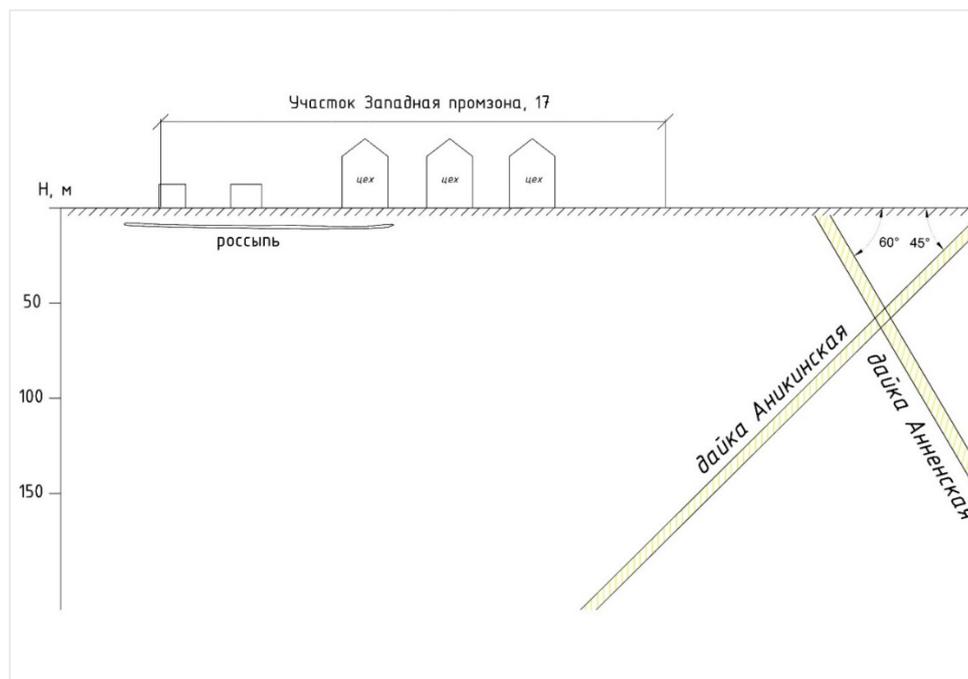


Рис. 2. Геоинформационная геомеханическая модель подработки участка подземными выработками старых шахт проходит через линию I-I на рис. 1

о подработке. Из модели очевидно, что добычные горные выработки по дайкам расположены за пределами и не могут оказывать влияние на поверхность участка. Опасность могут представлять только горные выработки по россыпи и незадокументированные разработки, которые в данном случае могут быть разведочными и/или дренажными.

Таким образом, для застройки участка наибольшую опасность представляют разработки россыпи в южной части. Разведочные и дренажные выработки теоретически не смогут принести разрушительный вред для зданий, но могут влиять на горизонтальное положение конструкций и оборудования.

#### *Маршрутное обследование поверхности*

В настоящее время на участке находятся старые производственные объекты в аварийном состоянии, построенные в XX веке. Обследование выполнено с поверхности при обходе территории и с беспилотного летающего аппарата. Внимание уделено состоянию зданий и участкам поверхности, где проявляются особенности рельефа, соответствующие проявлению влияния горных разработок.

Установлено, что здания находятся в аварийном состоянии и имеют следы деформаций стен, характерных для проседания грунтов и фундаментов. Следы современного и активного влияния подземных горных работ в виде изменений рельефа на участке в явном виде не обнаружены, но зафиксировано два локальных понижения рельефа глубиной 0,4 м и диаметром 2 м. В районе залегания россыпи признаков влияния горных работ на поверхность не обнаружено.

С беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и исторических космических снимков следов опасного влияния подземных горных работ не обнаружено.

В результате анализа «Журналов эскизов замера провалов на поверхности и обрушений в подземных выработках по территории Березовского рудника имени Кирова» за период 1957 – 2014 гг. в районе участка не зарегистрировано ни одного случая обрушения поверхности или других опасных явлений.

#### *Основные результаты анализа исторических данных*

Условия подработки участка следующие:

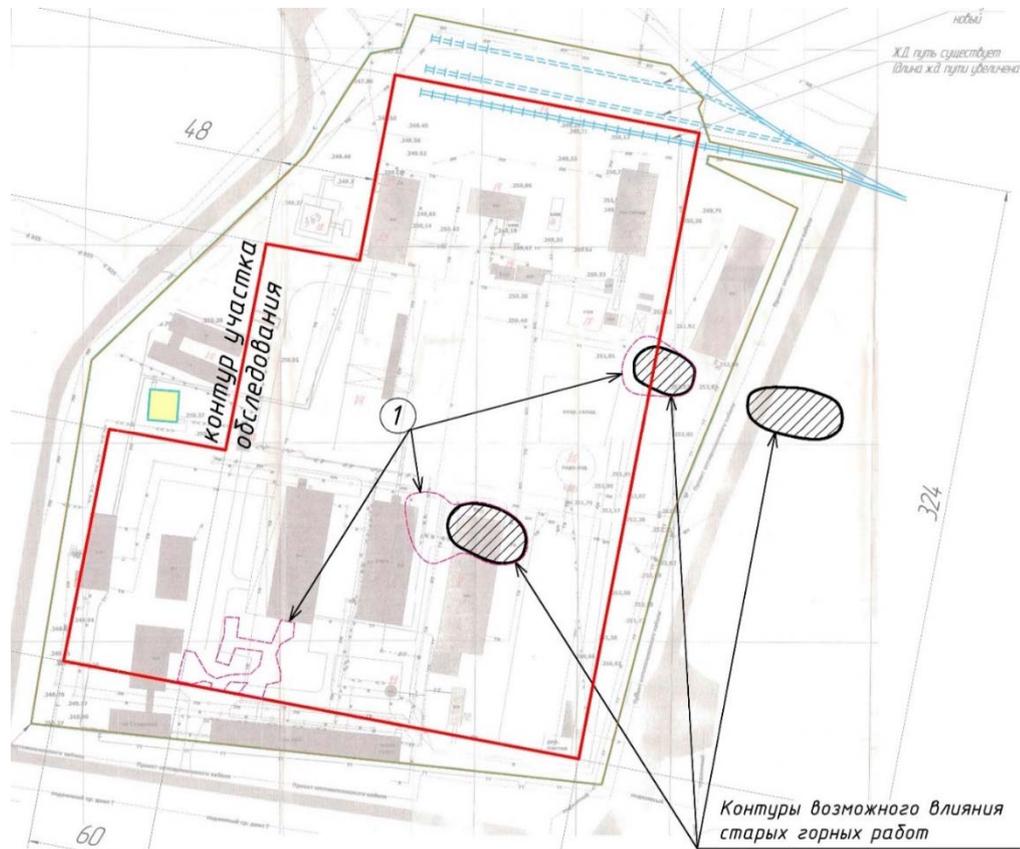
- возраст горных выработок более 100 лет;
- добычные горные работы по разработке золоторудных даек расположены за пределами участка;
- разведочные горные работы могут быть распространены по всему участку;
- максимальная глубина очистных горных выработок по разработке россыпи достигает 10 м;
- горные разработки россыпи представляют для застройки наибольшую опасность и сосредоточены в южной части;
- капитальные горные выработки не зарегистрированы;
- провалы поверхности, которые относятся к опасным проявлениям от горных работ, при натурном обследовании не обнаружены;
- на участке провалы и трещины поверхности по базе провалов города Березовский не зарегистрированы;
- режим грунтовых вод – стационарный;
- участок застроен промышленными зданиями, которые имеют следы локальных деформаций, характерных при проседании грунтов;
- наблюдения за деформациями поверхности не ведутся;
- доступ в выработанные пространства отсутствует.

#### *Поиск пустот электроразведкой методом сопротивлений в площадном варианте*

В районе россыпи электроразведкой методом сопротивлений по методике среднего градиента определено положение старательских горных работ по россыпи по аномальным значениями  $\rho_k$  70 – 110 Ом·м относительно неизменных суглинистых грунтов со значениями  $\rho_k$  15 – 55 Ом·м. Грунты, определенные как подработанные, обладают ухудшением несущей способности.

### Прогноз деформаций поверхности

В результате исследований установлено, что пустот размерами выше разрешающей способности методов исследования не обнаружено. В районе россыпи выделены контуры подземной разработки, но без наличия пустот (рис. 3). Выявленные структурные особенности не относятся к непогашенным пустотам, поэтому следует считать, что поверхность участка и горный массив под ним в настоящее время устойчивы.



Примечание. Контуры нарушенных горными разработками грунтов обозначены цифрой 1.

Рис. 3. Контуры грунтов, нарушенных подземными горными разработками

Медленные дезинтеграционные процессы от старых горных выработок способны периодически накапливаться и вызывать в обозначенных участках локальные проседания поверхности. Из возможных вредных проявлений от старой подземной разработки могут произойти локальные просадки диаметром до 2 – 3 м и глубиной до 1,5 м. Периодичность просадок для данного участка составит одно событие в 80 лет. Они развиваются чаще всего в весенний и осенний периоды, когда количество атмосферных осадков увеличивается. Эти параметры установлены из анализа базы провалов на Березовском месторождении, охватывающей более 1100 случаев за 57 лет [14]. За это время небольшие проседания под зданиями в г. Березовский проявлялись неоднократно и не вызывали аварийных разрушений конструкций при своевременном принятии восстановительных мер.

### Оценка безопасности

Строительство промышленных объектов нормального уровня ответственности не инициирует развитие опасных процессов в грунтах, так как отсутствуют пустоты. Поэтому застройка этой территории возможна без геотехнических мероприятий по укреплению грунтов и без усиления конструкции зданий. Следует исключить размещение опор технологического оборудования и/или фундаментов под оборудование в пределах

выделенных контуров старых горных работ. Чтобы обеспечить стационарный режим подземных вод в районе проектируемых объектов, необходимо соорудить отстойку с отведением воды от зданий в дождевую канализацию или на расстояние не менее 5 м.

#### Заключение

Участок в районе подземной разработки старыми шахтами золоторудных даек Анненская и Аникинская обследован комплексом специализированных методик, включающих натурное обследование поверхности, в том числе с БПЛА, анализ исторических горно-геологических материалов по подработке участка, геофизические зондирования массива горных пород, поиск сведений о деформировании поверхности по базе провалов. Экспертной оценкой геомеханической ситуации установлено, что процесс сдвигания не развивается. Полости опасных размеров инструментальными методами на участке не обнаружены. В результате исследований удалось сократить площадь риска развития опасных процессов на участке до 0,006 км<sup>2</sup>, что составляет менее 10 % от всей площади участка.

Участок пригоден для застройки производственными объектами нормального уровня ответственности. Установленных границ слабых грунтов следует избегать при посадке зданий и сооружений в границах участка. Рекомендованы общие и специальные мероприятия для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации промышленного объекта на подработанной территории.

#### Список литературы

1. Uyanga Gankhuyag and Fabrice Gregoire, 2018. *Managing mining for sustainable development: A sourcebook*. Bangkok: United Nations Development Programme. Uyanga Gankhuyag. UNDP and UN Environment, 116 p.
2. Cornelissen H., Watson I., Adam E., Malefetse T., 2019. Challenges and strategies of abandoned mine rehabilitation in South Africa: The case of asbestos mine rehabilitation. *Journal of Geochemical Exploration Publisher: Elsevier*, Vol. 205, 106354. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.106354
3. *Post-Mining Regions in Central Europe. Problems, Potentials, Possibilities*, 2012. Editors: Peter Wirth, Barbara Černič Mali, Wolfgang Fischer. München: Oekom, 274 p.
4. Peng Wen, Wenbing Guo, Yi Tan, Erhy Bai, Zhibao Ma, Dongtao Wu, Weiqiang Yang, 2022. *Paste Backfilling Longwall Mining Technology for Thick Coal Seam Extraction under Buildings and above Confined Aquifers: A Case Study*, April, *Minerals* 12(4):470. DOI: 10.3390/min12040470
5. Zhang M., Zhang Y., Ji M., Jiao P., 2019. Research on reasonable mining scheme for coal recovery in thick coal seam under buildings and other structures. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, February 67 (2):90-98
6. Denghong Chen, Hua Xinzhu, 2011. Study on Optimization of Mining Method Under Buildings December. *Procedia Engineering* 26:2400-2405. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2451.
7. Усанова А.В., Усанов С.В., 2014. Геомеханическая информационная модель влияния ликвидированного подземного рудника в городе Верхняя Пышма. *Маркшейдерия и недропользование*, № 5, С. 38 – 40.
8. Усанов С.В., Усанова А.В., 2021. Исследование обрушений грунта над неглубокой заброшенной шахтой для определения геотехнических условий индивидуального строительства. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, Т. 332, № 8, С. 168 – 176. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3315.
9. 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. – EDN NWOQQF.

10. Usanova A.V., Usanov S.V., 2018. Monitoring of Ground Surface Displacement under Mining of the Sokolovo-Sarbai Deposit by the Radar Interferometry Method. *Journal of Mining Science*, Vol. 54, № 4, P. 556 – 560. DOI: 10.1134/S1062739118044002
11. Мельник В.В., Замятин А.Л., 2005. Исследование и создание геолого-структурной и геомеханической модели участка недропользования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 4, С. 226 – 230.
12. Усанов С.В., Усанова А.В., 2020. Обоснование мер безопасности при застройке территорий над старыми горными выработками по результатам комплексных исследований. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 246 - 254. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-246-254
13. Сашурин А.Д., Мельник В.В., Балек А.Е. и др., 2022. *Геомеханические аспекты недропользования*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 256 с. DOI: 10.25635/j5035-6134-1492-n. – EDN QGEIOJ.
14. Зуев П.И., 2019. Районирование подработанных территорий в ГИС на примере г. Березовский. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № S37, С. 376 - 384. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-376-384

### References

1. Uyanga Gankhuyag and Fabrice Gregoire, 2018. *Managing mining for sustainable development: A sourcebook*. Bangkok: United Nations Development Programme. Uyanga Gankhuyag. UNDP and UN Environment, 116 p.
2. Cornelissen H., Watson I., Adam E., Malefetse T., 2019. Challenges and strategies of abandoned mine rehabilitation in South Africa: The case of asbestos mine rehabilitation. *Journal of Geochemical Exploration Publisher: Elsevier*, Vol. 205, 106354. DOI: 10.1016/j.gexplo.2019.106354
3. *Post-Mining Regions in Central Europe. Problems, Potentials, Possibilities*, 2012. Editors: Peter Wirth, Barbara Černič Mali, Wolfgang Fischer. München: Oekom, 274 p.
4. Peng Wen, Wenbing Guo, Yi Tan, Erhy Bai, Zhibao Ma, Dongtao Wu, Weiqiang Yang, 2022. *Paste Backfilling Longwall Mining Technology for Thick Coal Seam Extraction under Buildings and above Confined Aquifers: A Case Study*, April, *Minerals* 12(4):470. DOI: 10.3390/min12040470
5. Zhang M., Zhang Y., Ji M., Jiao P., 2019. Research on reasonable mining scheme for coal recovery in thick coal seam under buildings and other structures. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, February 67 (2):90-98
6. Denghong Chen, Hua Xinzhu, 2011. Study on Optimization of Mining Method Under Buildings December. *Procedia Engineering* 26:2400-2405. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2451.
7. Usanova A.V., Usanov S.V., 2014. Geomekhanicheskaya informatsionnaya model' vliyaniya likvidirovannogo podzemnogo rudnika v gorode Verkhnyaya Pyshma [Geomechanical information model of the impact of a liquidated underground mine in the city of Verkhnyaya Pyshma]. *Markshei-deriya i nedropol'zovanie*, № 5, P. 38 – 40.
8. Usanov S.V., Usanova A.V., 2021. Issledovanie obrushenii grunta nad neglubokoi zabroshennoi shakhtoi dlya opredeleniya geotekhnicheskikh uslovii individual'nogo stroitel'stva [Investigation of ground failure over a shallow abandoned mine to determine the geotechnical conditions of individual construction]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhini-ring georesurosov*, Vol. 332, № 8, P. 168 – 176. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3315 //–
9. 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 during open method development]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(31), P. 36 – 43. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.036. – EDN NWOQF.

10. Usanova A.V., Usanov S.V., 2018. Monitoring of Ground Surface Displacement under Mining of the Sokolovo-Sarbai Deposit by the Radar Interferometry Method. *Journal of Mining Science*, Vol. 54, № 4, P. 556 – 560. DOI: 10.1134/S1062739118044002

11. Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2005. Issledovanie i sozдание geologo-strukturnoi i geomekhanicheskoi modeli uchastka nedropol'zovaniya [Research and creation of a geo-structural and geomechanical model of a subsurface use area]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 4, P. 226 – 230.

12. Usanov S.V., Usanova A.V., 2020. Obosnovanie mer bezopasnosti pri zastroiike territorii nad starymi gornymi vyrabotkami po rezul'tatam kompleksnykh issledovaniy [Justification of safety measures in the construction of territories over old mining workings based on the results of comprehensive studies]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3 - 1, P. 246 – 254. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-246-254

13. Sashurin A.D., Mel'nik V.V., Balek A.E. i dr., 2022. Geomekhanicheskie aspekty nedropol'zovaniya [Geomechanical aspects of subsurface use]. Ekaterinburg: Ural'skoe otделение RAN, 256 p. DOI: 10.25635/j5035-6134-1492-n. – EDN QGEIOJ.

14. Zuev P.I., 2019. Raionirovanie podrobotannykh territorii v GIS na primere g. Berezovskii [Zoning of the underworked territories in GIS on the example of Berezovsky]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № S37, P. 376 – 384. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-376-384

УДК 622.235

**Зуев Павел Игоревич**

научный сотрудник,  
Институт горного дела УрО РАН,  
620075, г. Екатеринбург,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58  
e-mail: [zuev@igduran.ru](mailto:zuev@igduran.ru)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ВЗРЫВОВ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ  
ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ\****Аннотация:*

*Цель работы – уточнение и контроль уровня влияния подземных технологических взрывов на здания и сооружения с целью обеспечения безопасности промышленных и гражданских объектов. Исследование сейсмического эффекта проводится на исторически подработанной территории заводского типа. Контроль воздействия взрывов осуществляется с помощью программно-аппаратного комплекса, созданного на основе геофизического оборудования. Комплекс регистрирует параметры сейсмических волн, далее производится их интерпретация и цифровая обработка.*

*Даны краткие сведения о месторождении, разрабатываемом шахтой, и истории его развития. Описаны причины актуализации проведения повторных исследований влияния взрывных работ на здания и сооружения. Представлены экспериментальные результаты, полученные при регистрации сейсмического эффекта от технологических взрывов на железорудной шахте «Магнетитовая». Приведены расчетные значения и сравнения их с действующими допусками. Сделаны выводы о количественных размерах воздействия на исследуемые объекты. Описана методика проведения сейсмических измерений и последующая обработка полученных данных*

*Ключевые слова:* взрыв, сейсмический, скорость, смещение, волна, амплитуда, здание.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.078

**Zuev Pavel I.**

Researcher,  
Institute of Mining, UralBranch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [zuev@igduran.ru](mailto:zuev@igduran.ru)

**RESEARCH OF THE EXPLOSIONS  
EFFECTS ON BUILDINGS  
AND STRUCTURES DURING  
UNDERGROUND MINING***Abstract:*

*The purpose of this work is to control the level of the impact of technological explosions on buildings and structures in order to ensure the safety of industrial and civil facilities. The research of the seismic effect is conducted on the historically undermined territory of factory type. Control of the impact of explosions is carried out using a software and hardware complex created on the basis of geophysical equipment. The complex registers the parameters of the seismic wave, then their digital processing is performed.*

*The article provides brief information about the deposit being developed by the mine and the history of its development. The reasons for updating the repeated studies of the impact of drilling and blasting operations on buildings and structures are described. Experimental results obtained during registration of the seismic effect from technological explosions at the "Magnetitovaya" iron ore mine are presented. The calculated values and their comparison with the current tolerances are given. Conclusions are made about the size of the impact on the objects under study. A measurement technique and subsequent processing of the data obtained are described.*

*Key words:* explosion, seismic, velocity, displacement, wave, amplitude, building.

**Введение**

На Урале, где ряд месторождений обрабатывается с начала XVIII века, исторически сформировались территории заводского типа, где жилые и другие социально значимые объекты располагаются в непосредственной близости от горнодобывающих предприятий. Особенно из таких территорий выделяется г. Нижний Тагил, где жилые микрорайоны переплетены с промышленными. Рассматриваемым объектом вблизи жилого микрорайона явилась железорудная шахта «Магнетитовая». Так как извлечение руды ведется с помощью взрывных работ как под землей, так и на поверхности, остро встает вопрос о сейсмической безопасности объектов промышленной и социальной инфраструктуры от технологических взрывов.

\* Исследования выполнены в рамках Госзадания No075-00412-22 ПР, тема 3 (2022-2024), (FUWE-2022-0005), рег. No1021062010531-8-1.5.1

Железорудное месторождение «Высокогорское», разрабатываемое комбинированным способом, в том числе шахтой «Магнетитовая», упоминавшееся еще в конце 17 века, является старейшим и крупнейшим месторождением на Урале. Промышленная же его разработка началась в 1721 г. В 1725 г. был построен Нижнетагильский чугуноплавильный и железоделательный завод, на котором в этом же году была пущена крупнейшая в Европе на то время доменная печь [1].

Добываемый на месторождении минерал магнетит – природный оксид железа [2] – не содержал вредных примесей, и поэтому металл, выплавляемый из него, отличался высоким качеством, также примесь марганца и меди улучшала свойства металла: они являлись природнолегирующими компонентами.

До 1918 г. месторождение по большей части разрабатывалось открытым способом. Шахту «Магнетитовая» начали проходить в 1944 г. На промплощадке шахты располагаются сооружения промышленной инфраструктуры: административно-бытовые комбинаты, подъемные машины, компрессорная, шахтный вентилятор. Для каждого из вышеуказанных объектов имеются определенные федеральными органами допустимые скорости смещения и амплитуды этих смещений. Определение скоростей смещения и амплитуды этих смещений ведется с 60-х годов XX века.

Как известно, извлечение руды ведется с помощью буровзрывной технологии путем производства регулярных технологических и массовых взрывов как под землей, так и в бортах карьера, то есть на поверхности. Для объектов, подлежащих охране от вредного сейсмического влияния взрывов, разработаны и внедрены рекомендации по обеспечению безопасности и ослаблению этого влияния до нормативных значений и ниже, для панельных зданий нормативное значение смещения не более 1,5 см/с, для кирпичных – не более 2 см/с. Данные рекомендации не препятствовали застройке, поэтому в непосредственной близости от разрабатываемого участка месторождения были построены жилые микрорайоны с многоэтажными жилыми домами и зданиями сопутствующей социальной инфраструктуры. На территории промплощадки также были обследованы здания и сооружения, подлежащие охране, среди них – административно-бытовые комбинаты, копры шахты и прочие. Для каждого учтенного объекта были разработаны методические рекомендации.

В наши дни вновь стало актуальным проведение исследований сейсмического эффекта, негативно влияющего на конструкции зданий и сооружений, что обусловлено целым рядом факторов:

- все чаще в сфере недропользования стали применяться научно-обоснованные требования в рамках экологической безопасности ведения взрывных работ, вследствие чего сейсмическое воздействие промышленных взрывов стало привлекать внимание администрации г. Нижний Тагил и общественных организаций;

- изменились условия разработки месторождения подземным способом: нижних горизонтов стало больше, что повлекло за собой смену местоположения очага взрыва, изменились физические свойства пород в выработках, что увеличило количество линий наименьшего сопротивления, и поэтому возникла необходимость использования более мощных зарядов;

- изменились горно-геологические условия, причем не только в месте отработки, но и по пути распространения сейсмических волн, изменились геоморфологические особенности руд, а также элементы их залегания;

- в свете установившихся рыночных отношений применение ранее повсеместно используемых взрывчатых материалов стало нерентабельным;

- появились новые взрывчатые материалы, с более современными физико-химическими свойствами, поэтому взрывы возбуждали сейсмические волны с амплитудами намного большими, чем ранее, вибрация стала ощущаться гораздо сильнее в зданиях и просто на поверхности;

– в не меньшей степени перемены коснулись и процессов зарядки скважин, так как использование новых взрывчатых материалов повлекло за собой изменения технологии зарядки и соответствующих механизмов и приспособлений.

### *Методика*

Для получения полной и достоверной информации о производимом промышленными взрывами сейсмическом эффекте в первую очередь необходимо сделать правильный выбор на объекте точек регистрации. Так, например, при регистрации на жилом доме в непосредственной близости от эпицентра взрыва, на котором наблюдается вертикальная трещина, сейсмоприемники устанавливались относительно предполагаемой зоны разлома – до зоны разлома и после, если смотреть по направлению распространения сейсмических волн. На каждом из пунктов приема регистрировались все 3 компоненты колебаний (амплитуда, периоды собственных и вынужденных колебаний зданий) при помощи трехкомпонентных сейсмоприемников GS-20DX [3].

При регистрации на многоэтажном здании логичным является выбор точек регистрации на каждом из этажей одна над другой. Также для сравнительного анализа необходима установка приборов на грунте вблизи обследуемого здания. Для осуществления наблюдений на грунте сейсмоприемники устанавливались группами по 3 прибора: который ориентировался по составляющей  $X$  – с его помощью регистрировались колебания вдоль сейсмического луча, один для регистрации колебаний поперек сейсмического луча –  $Y$  и один для регистрации вертикальной составляющей колебаний –  $Z$ . При регистрации в зданиях приборы ориентировались вдоль направлений главных осей зданий. При этом составляющая  $X$  соответствовала продольным осям зданий. При установке на грунте вблизи здания в ориентации приборов для удобства приоритет обычно имеют оси здания, а не сейсмического луча [4].

На результат регистрации оказывает влияние множество одновременно действующих факторов. С целью минимизации влияния переменных факторов при исследовании соблюдался ряд условий. Внутри зданий приборы должны быть установлены на ровную твердую горизонтальную поверхность в соответствии с заданными направлениями осей регистрации. При установке на грунте сейсмоприемники устанавливаются на ровную плотную и однородную поверхность. Все приборы и соединительные провода должны размещаться в условиях, исключающих внешнее влияние на процесс регистрации, такое как ветер, дождь, случайные прохожие и т.д. [5]. Измерительная аппаратура должна быть заземлена, чтобы избежать промышленных помех (например, самой вероятной помехой является помеха от электросетей с частотой 50 Гц). После расстановки всех необходимых датчиков измерительная система запускается на регистрацию взрыва. Регистрация происходит в автоматическом режиме.

Обработка цифровых записей проводилась следующим образом [6]. Так как возможности используемой измерительной системы позволяют производить регистрацию практически неограниченной длительности, для надежности старт записи данных производился за некоторое время до назначенного момента взрыва. Следовательно, первым шагом в обработке являлось выделение из всей длины сейсмограммы только участков, несущих полезную информацию.

Далее каждый канал записи рассматривался отдельно. На втором шаге обработки необходимо было отфильтровать полученный сигнал. Чтобы получить частотный спектр сигнала, используется быстрое преобразование Фурье (БПФ) [7]. С частотного спектра снимается значение преобладающей частоты, которое затем используется в расчетах. Затем производится удаление сигнала с частотой выше некоторой заданной – чаще всего, выше 20 Гц. Так как с увеличением глубины возрастает преобладающая частота, значение фильтруемой частоты каждый раз выбирается индивидуально. После проведенной фильтрации третьим этапом обработки является непосредственное считывание значения амплитуды отклонения рабочего элемента сейсмоприемника [8]. Ам-

плитуда отклонения сигнала измерялась как разность между соседними минимумом и максимумом колебаний. Для дальнейших расчетов использовали величину максимальной амплитуды отклонения [9].

Максимальная скорость смещения в точке регистрации рассчитывалась следующим образом:

$$V = \frac{A}{K \times 100}, 10^{-2} \text{ см/с}, \quad (1)$$

где  $A$  – максимальная амплитуда отклонения;  $K$  – коэффициент преобразования.

Коэффициент преобразования  $K$  зависит от типа сейсмоприемника и берется из паспортных данных либо определяется экспериментально путем сравнения с эталонным прибором.

Максимальное смещение в точке регистрации определялось по следующей формуле:

$$S = \frac{V}{2\pi f}, \text{ мкм}, \quad (2)$$

где  $f$  – преобладающая частота.

В случае, когда регистрация на одной точке проводится по трем компонентам поля – по направлениям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ , суммарные величины максимальной скорости смещения и смещения определяются по следующим известным формулам:

$$V_{\Sigma} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}; \quad (3)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}. \quad (4)$$

При значительном удалении точек регистрации от источника колебаний дифференциация ступеней взрыва во времени в большинстве случаев не является возможной. Поэтому максимальные значения амплитуды на каждом из каналов трехкомпонентного приемника могут быть зарегистрированы и затем взяты для расчетов в разные моменты времени. В приведенной выше формуле для определения суммарных величин скорости и смещения используются максимальные значения, и результат, соответственно, также оказывается максимально возможным. В действительности же одномоментные суммарные значения скорости смещения и смещения оказываются ниже, чем рассчитанные.

#### *Результаты и обсуждение*

Сейсмический мониторинг был проведен в 3 этапа, каждый этап примерно через месяц после предыдущего.

При регистрации взрыва на первом этапе у жилого пятиэтажного дома (объект № 1) было рассчитано, что значения скоростей смещения лежат в диапазоне 0,062 - 0,413 см/с поканально или 0,148 – 0,590 см/с для суммарных значений по трем компонентам.

На втором этапе при регистрации в подъезде дома (объект № 1) значения лежат в пределах 0,062 – 0,239 см/с поканально или 0,253 – 0,312 см/с для суммарных значений по трем компонентам. При регистрации вблизи жилого дома (объект № 2) значения скоростей смещения несколько выше в связи с тем, что данный объект находится ближе к эпицентру взрыва. Значения для отдельных каналов находятся в пределах 0,051 - 0,758 см/с. Трехкомпонентные значения лежат в пределах 0,164 – 0,946 см/с.

На третьем этапе регистрации на грунте у жилого дома (объект № 1) получены следующие результаты. Поканально – 0,134 – 0,511 см/с. Суммарные по трем компонентам – 0,271 – 0,612 см/с.

Таким образом, видно, что для объекта № 1 (панельное здание) полученные значения составляют не более 41 % от нормативных значений, указанных ранее, а для объекта № 2 (кирпичное здание) – не более 48 %.

Три рассмотренных технологических взрыва регистрировались в трех различных точках. Взрывы на первом и третьем этапах были зарегистрированы вблизи объекта № 1. Взрыв на втором этапе был зарегистрирован вблизи объекта № 2 и поэтажно в одном из подъездов объекта № 1. Полученные скоростные значения не превышают нормативных для данных типов зданий, параметры взрывания и характеристики объектов указаны в итоговой табл. 1.

Таблица 1

Сводная таблица параметров взрывания

№ этапа	Наименование выемочной единицы	Горизонт	Кол-во вееров, скважин	Масса заряда, кг	Замедления по веерам или рядам скважин, мс	Точки регистрации
1	Блок 21, секция 4, панель 1	-518 м	3 веера	2896	0; 25; 50; 75; 150; 300; 500	Вблизи объекта 1 (панельное здание)
	Блок 21, секция 1, панель 1 (отр. щель)	-524 м -580 м	6 скв. 2 ряда	2856	0; 50; 100	
	Кам. 1а	-438 м -408 м	7 вееров	8929	0; 300	
2	Блок 21, секция 1, панель 1	-524 м	3 веера	2008	0; 50; 100	Подъезд №5 объекта 1 Вблизи объекта 2 (кирпичное здание)
	УЗР кам. 7-1 (отр. щель)	-438 м	9 скв. 3 ряда	2960	0; 125	
	Блок 4	-370 м -438 м	2 веера	10999	0; 500; 1000	
3	Блок 21, секция 4, панель 1	-518 м -450 м	3 веера	9608	0; 100; 200	Вблизи объекта 1 (панельное здание)
	Блок 21, секция 1, панель 1	-524 м -580 м	3 веера	19296	0; 50; 175	

### Заключение

На основе выполненных замеров можно сделать вывод, что в настоящее время производство технологических взрывов в шахте «Магнетитовая» с соблюдением всех установленных норм не оказывает опасного воздействия на здания г. Нижний Тагил, расположенные на относительно небольших расстояниях от шахты «Магнетитовая».

Максимальные скорости смещения, полученные при регистрации сейсмического эффекта от трех технологических взрывов [10], не превышают 40 – 50 % от современных допустимых значений.

Используемый модифицированный программно-аппаратный измерительный комплекс, с помощью которого выполнена регистрация практически всех взрывов, а также оперативно получены все приводимые в данной статье экспериментальные результаты, вполне соответствует своему назначению.

### Список литературы

1. Kolchina M., Konovalov V. and Kolchina N., 2019. Analyzing the state of mining towns in the Ural region. *E3S Web Conf.* Vol. 135, No. 04015, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913504015>.
2. Dresco P., Zaitsev V., Gambino R. and Chu B., 1999. Preparation and Properties of

- Magnetite and Polymer Magnetite Nanoparticles. *Langmuir*. Vol. 15, No. 6, pp. 1945 – 1951.
3. Denisenko N., Gafarov R., 2018. Analysis of Geophone Types and Grouping Parameters Tests. *European Association of Geoscientists & Engineers. Geomodel*, pp. 1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802311>.
  4. Vedernikov A., Zuev P., Grigoriev D., 2020. Geophysical surveys of rock mass status of iron ore deposit with combined deep – opencast mining zone. *E3S Web Conf*. Vol. 177, No. 02006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017702006>.
  5. Shih – Chao Wei and Ko – Fei Liu, 2020. Automatic debris flow detection using geophones. *Landslides*. Vol.17, pp. 349 – 359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01258-9>.
  6. Yue Hou, Rui Jiao, Hongyu Yu, 2020. MEMS based geophones and seismometers. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 318, No. 11249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112498>.
  7. Morioka H., Kumagai H., Maeda T., 2017. Theoretical basis of the amplitude source location method for volcano-seismic signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 122, No. 8, pp. 6538 – 6551. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017JB013997>.
  8. K. Ward and Fan-Chi Lin, 2017. On the Viability of Using Autonomous Three-Component Nodal Geophones to Calculate Teleseismic Ps Receiver Functions with an Application to Old Faithful, Yellowstone. *Seismological Research Letters*. Vol. 88, No. 5, pp. 1268 – 1278. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220170051>.
  9. Меньшиков П.В., Таранжин С.С., Флягин А.С., 2020. Исследование сейсмического воздействия на здания и сооружения города Сатки при ведении взрывных работ на карагайском карьере в стесненных условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 383 – 398. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398>.
  10. Meghanadh M., Reshma T., 2017. Blast analysis and blast resistant design of r.c.c residential building. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. Vol. 8, No. 3, pp. 761 – 770. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV7IS100002>.

### References

1. Kolchina M., Konovalov V. and Kolchina N., 2019. Analyzing the state of mining towns in the Ural region. *E3S Web Conf*. Vol. 135, No. 04015, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913504015>.
2. Dresco P., Zaitsev V., Gambino R. and Chu B., 1999. Preparation and Properties of Magnetite and Polymer Magnetite Nanoparticles. *Langmuir*. Vol. 15, No. 6, pp. 1945 – 1951.
3. Denisenko N., Gafarov R., 2018. Analysis of Geophone Types and Grouping Parameters Tests. *European Association of Geoscientists & Engineers. Geomodel*, pp. 1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201802311>.
4. Vedernikov A., Zuev P., Grigoriev D., 2020. Geophysical surveys of rock mass status of iron ore deposit with combined deep – opencast mining zone. *E3S Web Conf*. Vol. 177, No. 02006. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017702006>.
5. Shih – Chao Wei and Ko – Fei Liu, 2020. Automatic debris flow detection using geophones. *Landslides*. Vol.17, pp. 349 – 359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01258-9>.
6. Yue Hou, Rui Jiao, Hongyu Yu, 2020. MEMS based geophones and seismometers. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 318, No. 11249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112498>.
7. Morioka H., Kumagai H., Maeda T., 2017. Theoretical basis of the amplitude source location method for volcano-seismic signals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Vol. 122, No. 8, pp. 6538 – 6551. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017JB013997>.
8. K. Ward and Fan-Chi Lin, 2017. On the Viability of Using Autonomous

Three-Component Nodal Geophones to Calculate Teleseismic Ps Receiver Functions with an Application to Old Faithful, Yellowstone. *Seismological Research Letters*. Vol. 88, No. 5, pp. 1268 – 1278. DOI: <https://doi.org/10.1785/0220170051>.

9. Men'shikov P.V., Taranzhin S.S., Flyagin A.S., 2020. Issledovanie seismicheskogo vozdeistviya na zdaniya i sooruzheniya goroda Satki pri vedenii vzryvnykh rabot na karagaiskom kar'ere v stesnennykh usloviyakh [Research of seismic influence on buildings and structures of Satka town while conducting explosive works on the Karagayskiy career in constrained conditions]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, № 3 – 1, P. 383 - 398. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-383-398>.

10. Meghanadh M., Reshma T., 2017. Blast analysis and blast resistant design of r.c.c residential building. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. Vol. 8, No. 3, pp. 761 – 770. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV7IS100002>.

УДК 622.831

**Ломов Михаил Андреевич**  
младший научный сотрудник,  
ИГД ДВО РАН,  
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51  
e-mail: 9241515400@mail.ru

**АВАРИИ В ГОРНОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РОССИИ,  
ПРОИЗОШЕДШИЕ ВСЛЕДСТВИЕ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЯВЛЕНИЙ  
В ГОРНОМ МАССИВЕ.  
КОНТРОЛЬ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ  
НА МЕСТОРОЖДЕНИИ «ЮЖНОЕ»  
(ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)\***

*Аннотация:*

*В России, а также во многих странах наблюдается тенденция к усложнению условий разработки полезных ископаемых. Практически все горнодобывающие предприятия относятся к опасным производственным объектам. Россия занимает одно из лидирующих мест в мире в горной промышленности, но, к сожалению, и на ее территории происходят аварии, влекущие травмы и гибель работников. Несчастные случаи на горнодобывающем предприятии могут возникать по разным причинам, в том числе это касается изменения геомеханического и геодинамического состояния разрабатываемого массива горных пород, где в результате горных работ или горных ударов могут инициироваться динамические проявления горного давления, вследствие которых могут пострадать люди.*

*В первой части данной работы приведен анализ и сопоставление источников по авариям в горной промышленности в России за 2017 – 2022 гг., показывающий, что несчастные случаи на горнодобывающем предприятии могут возникать по разным причинам. Эта проблема присутствует в нашей стране, люди погибают, травмируются, и данная тенденция сохраняется. Более подробно рассмотрена статистика по авариям, произошедшим вследствие динамических проявлений в горном массиве.*

*В второй части описана разработка и установка измерительных средств для создания геодинамического полигона для комплексного геомеханического мониторинга удароопасности и техногенной сейсмичности в Дальнегорском рудном районе, в частности, проектирование с использованием программы «AntennaCalc» и объемной цифровой модели месторождения сети геофонов и установка на опасном по горным ударам Южном месторождении автоматизированной системы горного давления «Prognoz-ADS».*

*Ключевые слова: геомеханика, горное давление, напряженное состояние, горные удары, прогноз, методы, контроль, статистика смертности.*

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.085

**Lomov Mikhail A.**  
Junior Researcher,  
Mining Institute, Far Eastern Branch of RAS,  
680000 Khabarovsk, 51 Turgenev Str.  
e-mail: [9241515400@mail.ru](mailto:9241515400@mail.ru)

**ACCIDENTS IN THE MINING INDUSTRY IN  
RUSSIA THAT OCCURRED AS A RESULT  
OF DYNAMIC MANIFESTATIONS  
IN THE MOUNTAIN RANGE. CONTROL  
OF MOUNTAIN PRESSURE  
AT THE YUZHNOYE FIELD  
(PRIMORSKY KRAI)**

*Abstract:*

*In Russia, as well as in many countries, there is a tendency of conditions complication for the minerals development. Almost all mining enterprises are classified as hazardous production facilities. Russia occupies one of the leading places in the world in the mining industry, but, unfortunately, accidents occur on its territory, resulting in injuries and death of workers. Accidents at a mining enterprise can occur for various reasons, including changes in the geomechanical and geodynamic state of the rock mass under developing, where dynamic manifestations of rock pressure can be initiated by mining operations or rock impacts, as a result of which people may suffer.*

*The first part of this work provides an analysis and comparison of sources on accidents in the mining industry in Russia for 2017-2022, showing that accidents at a mining enterprise can occur for various reasons. This problem is present in our country, people are dying and being injured and this trend continues. Statistics on accidents that occurred as a result of dynamic manifestations in the mountain range are considered in more detail.*

*The second part of the work describes the development and installation of measuring instruments for the creation of a geodynamic polygon for complex geomechanical monitoring of impact hazard and technogenic seismicity in the Dalnegorsky ore region. In particular, it shows the design with use of the "AntennaCalc" program and a volumetric digital model of the geophone network field and the installation of an automated mountain pressure system "Prognoz-ADS" at the Southern field, which is dangerous for mountain impacts.*

*Key words: geomechanics, rock pressure, state of stress, rock bursts, prediction, methods, control, mortality statistics.*

\* Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению №075-15-2021-663

## Введение

В России, как и во многих других странах, прослеживается тенденция усложнения условий освоения месторождений по мере истощения запасов, расположенных на небольших глубинах и в благоприятной горно-геологической обстановке. Особенно это касается изменения геомеханического и геодинамического состояния разрабатываемого массива горных пород и прилегающих участков земной коры, где в результате горных работ могут инициироваться динамические проявления горного давления, катастрофические горные удары и даже техногенные землетрясения, существенно ухудшающие безопасность горных работ и их эффективность.

Несчастные случаи на горнодобывающем предприятии могут возникать по разным причинам.

В данной работе приведен анализ и сопоставление источников по авариям в горной промышленности в России за 2017 – 2022 гг., а также приведен пример работы по снижению риска удароопасности и техногенной сейсмичности в Дальнегорском рудном районе.

### *Аварии в горной промышленности в России*

Несчастные случаи на горнодобывающем предприятии могут возникать по разным причинам, включая выбросы взрывоопасных природных газов, особенно рудничного газа или метана, взрывы пыли, обрушение очистных забоев, сейсмичность, вызванную горными работами или горными ударами, наводнения или общие механические ошибки из-за неисправностей оборудования и механизмов, а также нарушение техники безопасности [1 – 5].

Россия занимает одно из лидирующих мест в мире в горной промышленности, но, к сожалению, и на ее территории происходят несчастные случаи. За последние 5 лет в нашей стране пострадало как минимум 220 человек, из них погибло 129, а 91 получили тяжелые травмы.

На рис. 1 приведен результат анализа и сопоставления источников по авариям в горной промышленности за 2017 – 2022 гг. в процентном соотношении от общего количества происшествий. Материал для сбора статистики и последующего его анализа в данной работе формировался на основе пресс-релизов и общедоступных отчетов Ростехнадзора Российской Федерации, а также публикаций различных изданий средств массовой информации.



Рис. 1. Процентное соотношение причин несчастных случаев в горной промышленности России в зависимости от общего количества за 2017 – 2022 гг.

Исходя из проделанной работы видно, что наибольшее число травм и человеческих жертв происходит по причине выбросов взрывоопасных природных газов и/или

взрыва угольной пыли. Примером такой катастрофы может служить взрыв на шахте «Листвяжная», принадлежащей компании АО ХК «СДС-Уголь» (Кемеровская область, Россия), произошедший 25 ноября 2021 г. В результате происшествия погиб 51 человек.

Далее более подробно остановимся на авариях, произошедших вследствие динамических проявлений в горном массиве.

Проблема удароопасности на подземных рудниках мира, России и Дальнего Востока становится все более актуальной с каждым годом. Горное давление часто проявляется в таких опасных формах, как сдвигание и обрушение, внезапный выброс горных пород, горно-тектоническое воздействие. Особенностью динамических проявлений горного давления, особенно горных и горно-тектонических воздействий, является их быстрое протекание и большая разрушительная сила. Они несут угрозу жизни работающим, снижают эффективность горного производства, могут причинить значительный материальный и репутационный ущерб горнодобывающим компаниям, а в некоторых случаях приводят к потере запасов полезных ископаемых из-за огромного количества разрушенных шахт и провалов на поверхности, что приводит к невозможности последующих работ на месторождении, а иногда и к экологической угрозе [6 – 7].

В России впервые горный удар был зарегистрирован в 1944 г. в Кизеловском угольном бассейне.

Результаты анализа и сопоставления источников по авариям в горной промышленности в России, произошедшим вследствие динамических проявлений в горном массиве, а также повлекшим гибель или травмы людей за 2017 – 2022 гг., представлены в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

**Аварии в горной промышленности в России,  
произошедшие вследствие динамических проявлений в горном массиве,  
а также повлекшие гибель или травмы людей за последние 5 лет**

Дата	Город/Область/Организация	Вид аварии	Последствия
1	2	3	4
23.04.2017	Россия, Челябинская область, шахта «Центральная»	обрушение	2 человека погибли, 1 человек госпитализирован
23.06.2017	Россия, Коми, шахта «Интинская»	обрушение	1 человек погиб, 2 человека госпитализировано
13.07.2017	Россия, Североуральский городской округ, шахта «Ново-Кальинская»	обрушение	1 человек погиб
20.07.2017	Россия, Коми	обрушение	2 человека госпитализировано
29.07.2017	Россия, Якутия, Рудник «Мир»	обрушение	1 человек погиб
14.09.2017	Россия, Коми	обрушение	1 человек погиб
08.12.2017	Россия, Свердловская область, Североуральск	горный удар	1 человек погиб
07.02.2018	Россия, Кемеровская область, шахта «Осинниковская»	обрушение	1 человек погиб
30.04.2018	Россия, Тандинский район	обрушение	1 человек погиб
21.05.2018	Россия, Ростовская область, шахта «Октябрьская-Южная»	обрушение	1 человек погиб

Окончание табл. 1

1	2	3	4
13.06.2018	Россия, Алтайский край, Корбалихинский рудник	обрушение	1 человек погиб, 1 человек госпитализирован
15.08.2018	Россия, Свердловская область, Краснотурьинск	обрушение	1 человек погиб
19.09.2018	Россия, Челябинская область, Пластовский район	обрушение	1 человек погиб
15.10.2018	Россия, Пермский край, пос. Сараны	обрушение	1 человек госпитализирован
28.11.2018	Россия, Якутия, шахта «Денисовская»	обрушение	1 человек погиб
12.02.2019	Россия, шахта «Талдинское- Кыргайское», Кемеровская область	обрушение	1 человек погиб, 1 человек госпитализирован
04.06.2019	Россия, Кузбасс, шахта «Распадская»	обрушение	1 человек погиб
17.07.2019	Россия, шахта «Анжерская-Южная», Кузбасс	обрушение	1 человек погиб
11.08.2019	Россия, рудник «Сарылах», Оймяконский район, Якутия	обрушение	1 человек погиб
21.08.2019	Урал, шахта «Ново-Кальинская», АО СУБР	горный удар/обрушение	1 человек погиб
30.08.2019	Рудник «Урупский», Карачаево-Черкесия	обрушение	1 человек госпитализирован
25.09.2019	Россия, Оренбургская область, руд- ник Гайский горно-обогатительный комбинат	обрушение	1 человек погиб
10.10.2019	Россия, шахта «Северная», ПАО «Коммунарковский рудник», Хакасия	обрушение	1 человек госпитализирован
30.04.2020	Россия, пос. Калья, Свердловская область	обрушение	4 человека госпитализировано
19.05.2020	Россия, Североуральск, Свердловская область	горный удар/обрушение	2 человека госпитализировано
15.08.2020	Россия, Коми, шахта «Воргашорская»	обрушение	4 человека погибло
14.09.2020	Россия, Кемеровская область, шахта «Чергинская-Коксовая»	обрушение	2 человека погибло
22.11.2020	Россия, Кемеровская область, Новокузнецкий район	обрушение	1 человек погиб
05.01.2021	Россия, Чукотка, Эгвекинот, Иуль- тинский район	обрушение	1 человек погиб
06.01.2021	Россия, Камчатка, Асачинское золо- торудное месторождение	обрушение	2 человека погибло
07.01.2021	Россия, Тува, шахта в «Лунсин»	обрушение	1 человек погиб
17.01.2021	Россия, Тува, Тоджинский район	обрушение	1 человек погиб
22.01.2021	Россия, Кемеровская область, Ленинск-Кузнецкий округ, шахта им. Тихова	обрушение	3 человека погибло
14.02.2021	Россия, Кемеровская область, Куз- басс, штрек шахты «Юбилейная»	обрушение	1 человек погиб
07.03.2021	Россия, Кемеровская область, Беловской район	обрушение	1 человек погиб
05.07.2022	Россия, Кемеровская область, г. Междуреченск, объект «шахта угольная»	горный удар	1 человек погиб, 3 человека госпитализировано

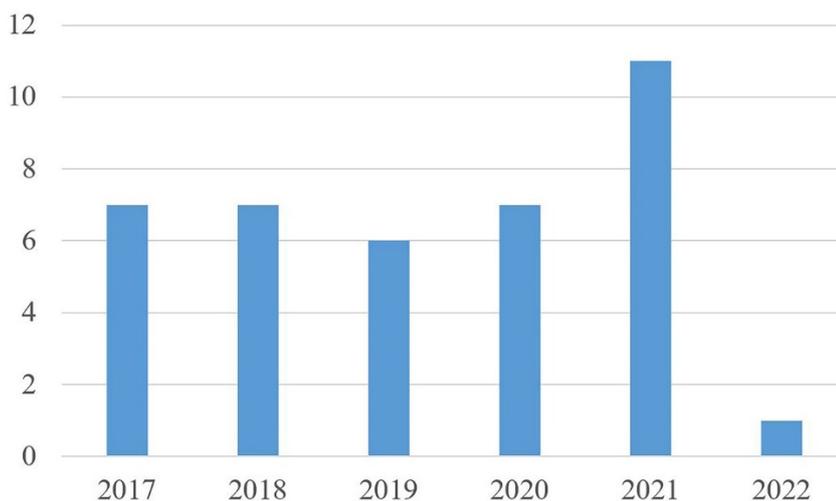


Рис. 2. Количество летальных исходов в год, произошедших из-за динамических проявлений в горном массиве

По итогам работы видно, что несчастные случаи на горнодобывающем предприятии могут возникать по разным причинам. Эта проблема присутствует в нашей стране, люди погибают, травмируются, и данная тенденция сохраняется. Следовательно, необходимость обеспечения безопасности на горнодобывающем предприятии представляется весьма актуальной, в частности в области снижения риска опасного проявления горного давления.

*Разработка и установка измерительных средств для создания геодинамического полигона для комплексного геомеханического мониторинга удароопасности и техногенной сейсмичности в Дальнегорском рудном районе*

Важным этапом создания в Дальнегорском рудном районе геодинамического полигона для комплексного геомеханического мониторинга удароопасности является установка АСКГД «Prognoz-ADS» на Южном месторождении, на котором первые горные удары с тяжелыми последствиями имели место на глубинах 150 – 170 м, и по этому показателю оно выделяется не только на Дальнем Востоке, но и в мире. На месторождении в последние годы ежегодно регистрируется до 100 и более динамических проявлений горного давления, включая толчки в глубине массива (рис. 3).

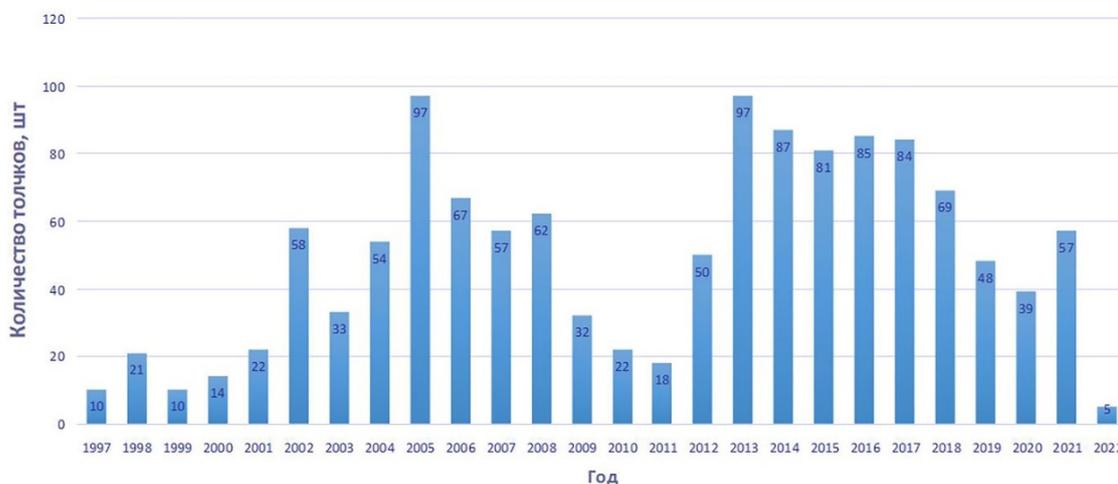


Рис. 3. Распределение количества толчков на Южном месторождении в 1997 – 2022 гг.

Установка АСКГД «Prognoz-ADS» на Южном месторождении позволит, с одной стороны, выявить закономерности формирования удароопасности и техногенной сейсмичности в его массиве, особенно в зонах разломов тектонических нарушений «Эльдорадо» и «Рудный», и, с другой стороны, свяжет эту систему с комплексом оборудования на расположенном в 20 км к юго-востоку Николаевском месторождении, давая возможность исследовать региональные предвестники опасных геодинамических процессов [8 – 10].

Оценка прогнозируемой погрешности расчета координат сейсмоакустических событий для проектируемой сети геофонов месторождения Южное была произведена с помощью разработанной в ИГД ДВО РАН программы «AntennaCalc»\*. Программа позволяет рассчитывать оптимальную конфигурацию наблюдательной сети геофонов системы «Prognoz-ADS» в массиве горных пород с учетом его геолого-тектонического строения.

По результатам расчетов и с использованием объемной цифровой модели месторождения были обоснованы число приемных преобразователей и конфигурация наблюдательной сети геофонов, позволяющих уверенно регистрировать в пределах предполагаемой зоны контроля акустические события с энергией 25 – 50 Дж. Согласно расчетам выбранная схема установки датчиков, учитывающая также горно-техническую ситуацию, должна обеспечить надежный контроль участка горного массива в этаже гор. 387... 480 м на расстоянии 200 м с западной и 170 м с восточной стороны от разлома Эльдорадо.

При увеличении энергии сейсмоакустических событий от 25 до 50 Дж объем области высокоточной локации (с ошибкой до 1 – 3 м) изменяется от 2,06 млн м<sup>3</sup> до 5,73 м<sup>3</sup>.

Более крупные сейсмоакустические события с энергией 100 Дж и более позволят лоцировать их с высокой точностью на расстоянии 200 м с западной и восточной стороны от разлома Эльдорадо, пересекающего зону контроля. При этом объем области высокоточной локации составит 11,28 млн м<sup>3</sup>.

Сформированная для условий месторождения Южное конфигурация приемной антенны АСКГД «Prognoz-ADS» на начальном этапе состоит из 16 разнесенных в пространстве геофонов, что позволяет с западной стороны от тектонически активного разлома «Эльдорадо» уверенно контролировать отработку блоков 1 и 2, а также часть блока 3 в этаже гор. 480 и 387 м, в том числе весь транспортный съезд с горизонта 480 до 387 м.

За время пусконаладочных работ в период с 3 по 8 декабря 2022 г. в зоне контроля АСКГД зарегистрировано 15 АЭ-событий с энергией от 50 до 120 Дж, не связанных с технологическими помехами. События распределяются в участке ведения горных работ в блоке 1 в этаже 450 – 427 м. Непрерывное накопление данных позволит в следующих отчетных периодах получить новые экспериментальные данные о геомеханических процессах в массиве Южного месторождения.

В дальнейшем предполагается существенно расширить наблюдательную сеть АСКГД, чтобы обеспечить контроль массива горных пород в районе очистных блоков с 4-го по 8-й западной части месторождения, отработка которых планируется на горизонтах ниже 440 м в 2023 – 2025 гг.

### *Заключение*

В процессе выполнения исследований по проблеме предотвращения горных ударов и снижения геодинамического риска при разработке месторождений получены следующие основные результаты:

1. Приведены результаты анализа и сопоставления источников по авариям в горной промышленности в России, повлекшие гибель или травмы людей за последние 5 лет. В работе показаны различные причины смерти работников и отдельно выделены происшествия, возникшие вследствие динамических проявлений в горном массиве. По

\* Программа «AntennaCalc» зарегистрирована 10.03.2021 г. Свидетельство регистрации № 2021664641.

итогах работы видно, что несчастные случаи на горнодобывающих предприятиях возникают по разным причинам. Эта проблема присутствует в нашей стране, люди погибают, травмируются, и данная тенденция сохраняется. Следовательно, необходимость обеспечения безопасности на горнодобывающем предприятии представляется весьма актуальной, в частности в области снижения риска опасного проявления горного давления.

2. На опасном по горным ударам Южном месторождении установлена АСКГД «Prognoz-ADS», обеспечивающая измерение параметров акустической активности массива горных пород в частотном диапазоне 0,5 – 12 кГц. Число приемных преобразователей и конфигурация наблюдательной сети геофонов, позволяющих уверенно регистрировать в пределах предполагаемой зоны контроля акустические события с энергией 25 – 50 Дж, были научно обоснованы по результатам расчетов с использованием программы «AntennaCalc» и объемной цифровой модели месторождения.

### Список литературы

1. Liang W.Z., Dai B., Zhao G.Y., Wu H., 2020. A scientometric review on rockburst in hard rock: two decades of review from 2000 to 2019. *Geofluids*, Vol. 17.

2. Farhadian Hadi, 2021. A new empirical chart for rockburst analysis in tunnelling: Tunnel rockburst classification (TRC). *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 31(4), P. 603 – 610.

3. Feng J., Wang E., Ding H., Huang Q., Chen X., 2020. Deterministic seismic hazard assessment of coal fractures in underground coal mine: A case study. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol. 129, P. 105921.

4. Li C., Ma M., Zhu L., Meng G. and Chen, 2017. Geomechanical types and mechanical analyses of rockbursts. *Engineering Geology*, Vol. 222, P. 72 – 83.

5. Sun F., Fan J., Guo J., Shi X., Liu X., Zhu B., Zhang H., 2021. Rockburst proneness criterion based on energy principle. *Gaoya Wuli Xuebao. Chinese Journal of High Pressure Physics*, Vol. 35(3).

6. Liang W.Z., Dai B., Zhao G.Y., Wu H., 2020. A scientometric review on rockburst in hard rock: two decades of review from 2000 to 2019. *Geofluids*, Vol. 17.

7. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В., 1989. *Основы механики горных пород*. Ленинград: Недра, 488 с.

8. Lomov M., 2020. 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the Nikolaevskoye field. *E3S Web of Conferences: 8, Khabarovsk, 08–10 сентября 2020 года*. Khabarovsk, P. 04008. DOI 10.1051/e3sconf/202019204008. – EDN PSMEBW.

9. Ломов М.А., Сидляр А.В., 2021. Оценка факторов удароопасности Николаевского месторождения с помощью системы 3D моделирования результатов сейсмоакустического мониторинга. *Проблемы недропользования*, № 1(28), С. 64 – 72. DOI 10.25635/2313-1586.2021.01.064.

10. Potapchuk M., Kursakin G., Kryukov V., Lomov M., 2018. Justification of safe and effective working conditions for pit reserves of "Pioneer" gold deposit. *Problems of Complex Development of Georesources: electronic resource, Khabarovsk, 25–27 сентября 2018 года*. Khabarovsk: EDP Sciences, P. 02013. DOI 10.1051/e3sconf/20185602013.

### References

1. Liang W.Z., Dai B., Zhao G.Y., Wu H., 2020. A scientometric review on rockburst in hard rock: two decades of review from 2000 to 2019. *Geofluids*, Vol. 17.

2. Farhadian Hadi, 2021. A new empirical chart for rockburst analysis in tunnelling: Tunnel rockburst classification (TRC). *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 31(4), P. 603 – 610.

3. Feng J., Wang E., Ding H., Huang Q., Chen X., 2020. Deterministic seismic hazard assessment of coal fractures in underground coal mine: A case study. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol. 129, P. 105921.
4. Li C., Ma M., Zhu L., Meng G. and Chen, 2017. Geomechanical types and mechanical analyses of rockbursts. *Engineering Geology*, Vol. 222, P. 72 – 83.
5. Sun F., Fan J., Guo J., Shi X., Liu X., Zhu B., Zhang H., 2021. Rockburst proneness criterion based on energy principle. Gaoya Wuli Xuebao. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, Vol. 35(3).
6. Liang W.Z., Dai B., Zhao G.Y., Wu H., 2020. A scientometric review on rockburst in hard rock: two decades of review from 2000 to 2019. *Geofluids*, Vol. 17.
7. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kaspar'ian E.V., 1989. Osnovy mekhaniki gornyx porod [Fundamentals of rock mechanics]. Leningrad: Nedra, 488 p.
8. Lomov M., 2020. 3D modeling system of seismoacoustic monitoring results at the Nikolaevskoye field. E3S Web of Conferences: 8, Khabarovsk, 08–10 sentyabrya 2020 goda. Khabarovsk, P. 04008. DOI 10.1051/e3sconf/202019204008. – EDN PSMEBW.
9. Lomov M.A., Sidlyar A.V., 2021. Otsenka faktorov udaroopasnosti Nikolaevskogo mestorozhdeniya s pomoshch'yu sistemy 3D modelirovaniya rezul'tatov seismoakusticheskogo monitoringa [Assessment of the impact hazard factors of the Nikolaevskoye field using a 3D modeling system of the results of seismic and acoustic monitoring]. Problemy nedropol'zovaniya, № 1(28), P. 64 – 72. DOI 10.25635/2313-1586.2021.01.064.
10. Potapchuk M., Kursakin G., Kryukov V., Lomov M., 2018. Justification of safe and effective working conditions for pit reserves of "Pioner" gold deposit. Problems of Complex Development of Georesources: electronic resource, Khabarovsk, 25–27 sentyabrya 2018 goda. Khabarovsk: EDP Sciences, P. 02013. DOI 10.1051/e3sconf/20185602013.



## ГЕОТЕХНИКА

УДК 662.233.53

**Плохих Вадим Валерьевич**

младший научный сотрудник,  
отдел горной и строительной геотехники,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
СО РАН,  
630091, Новосибирск,  
ул. Красный проспект, 54  
e-mail: [vadim.plohih@yandex.ru](mailto:vadim.plohih@yandex.ru)

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОГО ЗАМЫКАНИЯ УПРУГОГО КЛАПАНА И ПРИМЕНЕНИЕ ЕГО В ПНЕВМОУДАРНОЙ МАШИНЕ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ РАБОЧЕГО ЦИКЛА

*Аннотация:*

Рассматривается проблема создания новых пневматических ударных машин для повышения эффективности и безопасности горных работ. Решением этой проблемы может быть создание пневмоударных машин, позволяющих реализовать «адаптивные технологии», в которых необходимо изменение энергетических параметров машины в зависимости от свойств обрабатываемой среды, непосредственно в процессе работы. В последующем такие технологии могут быть основой «беспилотных технологических процессов», в которых управление режимами бурения осуществляется дистанционно и автоматически без присутствия оператора в месте проведения работ. Анализ существующих пневмоударных машин показал, что такие устройства не могут быть использованы для реализации упомянутых технологий из-за ограниченной возможности регулирования своих параметров. Варьирование параметров в таких машинах возможно только за счет изменения сечения питающей магистрали или давления энергоносителя. С учетом этого предложена новая принципиальная конструктивная схема пневмоударного устройства с упругим клапаном, в которой возможно регулирование параметров (энергии и частоты ударов). Для определения условий срабатывания упругого клапана в воздухораспределительной системе машины был создан стенд на основе физической модели устройства. На основе результатов экспериментальных исследований работы клапана изготовлена физическая модель пневмоударной машины. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность регулировки динамических и энергетических параметров устройства непосредственно в процессе работы. Проведена валидация имитационной модели. Дополнительные исследования, проведенные на модели, позволили увеличить диапазон изменения энергетических параметров устройства. Полученные результаты могут являться основой для создания опытного образца пневмоударного устройства.

**Ключевые слова:** адаптивные технологии, беспилотные технологии, пневмоударная машина, упругий клапан, воздухораспределение, условия срабатывания, резина.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.094

**Plokhikh Vadim V.**

Junior Researcher,  
Department of mining and  
construction geotechnics,  
Institute of Mining n.a. N.A. Chinakal,  
Siberian Branch of RAS,  
630091 Novosibirsk, 54 Krasny Prospect;  
e-mail: [vadim.plohih@yandex.ru](mailto:vadim.plohih@yandex.ru)

### RESULTS OF INVESTIGATION OF MECHANICAL CLOSING PROCESS OF ELASTIC VALVE AND ITS APPLICATION IN PNEUMATIC PERCUSSION MACHINE WITH ADJUSTABLE OPERATING CYCLE PARAMETERS

*Abstract:*

The paper considers the problem of creating new pneumatic percussion machines to improve the efficiency and safety of mining operations. The solution to this problem can be the creation of pneumatic impact machines that allow the implementation of «adaptive technologies», in which it is necessary to change the energy parameters of the machine, depending on the properties of the medium being processed, directly in the process of operation. In the future, such technologies can be the basis of «unmanned technological processes», in which drilling modes are controlled remotely and automatically without the presence of an operator at the work site. An analysis of existing pneumatic impact machines showed that such devices cannot be used to implement the mentioned technologies due to the limited ability of controlling their parameters. Variation of parameters in such machines is possible only by changing the cross section of the supply line or the pressure of the energy carrier. With this in mind, a new basic design diagram of a pneumatic percussion device with an elastic valve is proposed, in which it is possible to control the parameters (energy and frequency of impacts). To determine the conditions for the operation of a flexible valve in the air distribution system of the machine, a stand was created based on the physical model of the device. Based on the results of experimental studies of the valve operation, a physical model of a pneumatic impact machine was made. The results of experimental studies confirmed the possibility of adjusting the dynamic and energy parameters of the device directly in the process of operation. The simulation model was validated. Additional studies carried out on the model made it possible to increase the range of changes in the energy parameters of the device. The results obtained can be the basis for creating a prototype of a pneumatic percussion device.

**Key words:** adaptive technologies, unmanned technologies, pneumatic percussion machine, elastic valve, air distribution, triggering conditions, rubber.

## Введение

Бурение скважин в породном массиве является важной частью технологических процессов в горном деле, строительстве и других отраслях промышленности. Эффективными способами разрушения горных пород являются способы, основанные на ударном воздействии. Чаще всего в качестве источника удара используются пневматические ударные устройства. Пневмоударные устройства обладают такими достоинствами, как конструктивная простота, невысокая стоимость, надежность и возможность эксплуатации в неблагоприятных условиях. В горном производстве пневмоударные машины нашли широкое применение как в подземных, так и на открытых горных работах при бурении скважин, шпуров и других видах работ [1 – 5].

Одним из решений проблемы повышения эффективности и безопасности горных работ может быть создание пневматических ударных устройств, конструкции которых позволяют реализовать адаптивные технологические процессы. Смысл «адаптивных технологий» заключается в наличии обратной связи, позволяющей изменять динамические и энергетические параметры рабочего инструмента в зависимости от физических свойств обрабатываемого породного массива. Необходимо отметить, что изменение параметров устройства должно производиться непосредственно в процессе бурения. Это не только позволит снизить себестоимость производства горных работ, но и повысит их эффективность. Кроме того, появляется возможность внедрения так называемых «безлюдных технологий», в которых технологические операции бурения осуществляются без присутствия персонала в месте ведения работ [6].

## Состояние вопроса

Перспективными базовыми устройствами для решения поставленной задачи могут быть пневматические ударные машины, в системе воздухораспределения которых применяются упругие клапаны [7]. Наибольший вклад в исследование пневмоударных машин с упругими клапанами внесли следующие ученые: Гаун В.А., Червов В.В., Смоляницкий Б.Н., Петреев А.М., Примычкин А.Ю. Учеными были проведены исследования упругих клапанов, имеющих круглое и прямоугольное сечение и применяемых в воздухораспределительных системах различных пневматических ударных машин [8 – 11]. Однако в таких машинах регулирование энергетических и динамических параметров возможно путем изменения сечения питающей магистрали или давления энергоносителя. При этом уменьшение одного из регулируемых параметров, например энергии удара, одновременно приводит к уменьшению и частоты ударов, в результате значительно уменьшается ударная мощность.

Исходя из вышесказанного, в ИГД СО РАН разработана и запатентована новая принципиальная конструктивная схема пневматического устройства ударного действия на основе комбинированного воздухораспределения с упругим клапаном и подвижным патрубком [12]. Перемещение подвижного патрубка приводит к изменению рабочего хода ударника. Такое конструктивное решение позволяет в процессе бурения изменять энергию и частоту ударов разнонаправленно (то есть при уменьшении энергии частота увеличивается, и наоборот), в отличие от существующих пневмоударных машин.

Предварительное имитационное моделирование позволило определить основные конструктивные параметры пневмоударного устройства [6]. Для устойчивой работы машины необходимо исследование динамики работы упругого клапана в системе распределения энергоносителя. В частности, необходимо определить условия срабатывания упругого клапана.

## *Экспериментальные исследования динамики клапана тарельчатого типа*

Для проведения экспериментального исследования был разработан и изготовлен специальный стенд, конструкция которого показана на рис. 1.

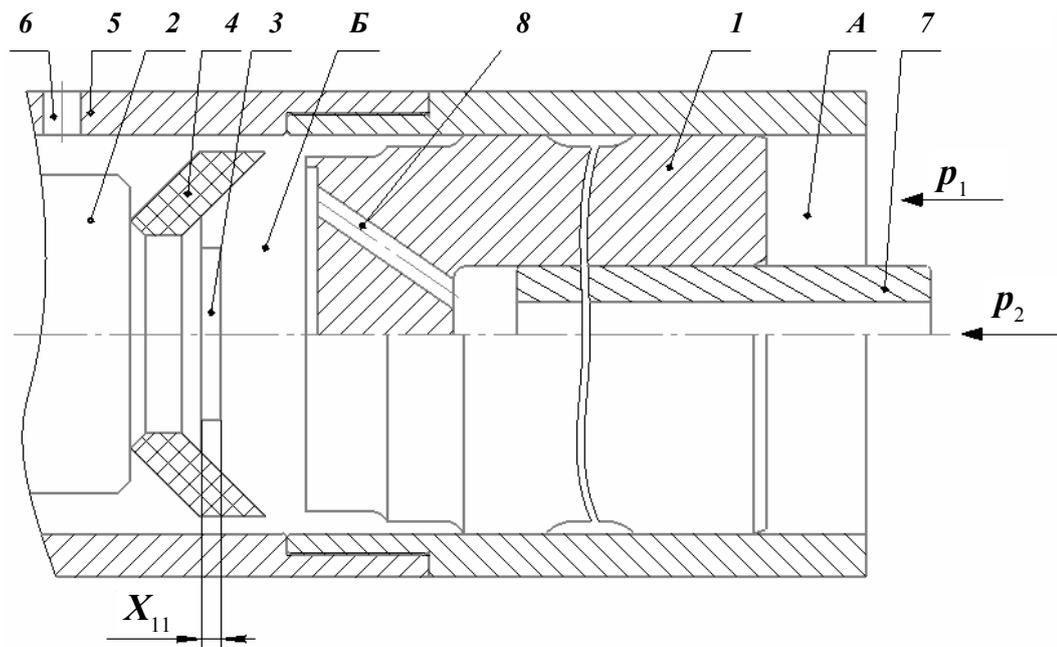


Рис. 1. Конструкция специального стенда:

- 1 – ударник; 2 – наковальня; 3 – подвижная шайба; 4 – упругий клапан; 5 – корпус;  
6 – выхлопное отверстие; 7 – трубка; 8 – канал в ударнике;  
 $X_{11}$  – величина вылета подвижной шайбы;  $p$  – магистральное давление;  
A – камера рабочего хода; B – камера холостого хода

Основными элементами стенда являются ударник 1, неподвижная наковальня 2, установленная в корпусе 5, подвижная шайба 3, с помощью которой регулировалась величина вылета  $X_{11}$ , и, соответственно, исходная величина прижатия упругого клапана к внутренней поверхности корпуса, упругий клапан 4 и трубка подачи энергоносителя 7 в камеру холостого хода B перед клапаном. Для создания необходимого давления использовался компрессор, подключенный к трубке 7 и к камере рабочего хода A.

Задача заключалась в определении усилия, необходимого для закрытия эластичного клапана. Для этого производилась подача воздуха с давлением  $p_1$  в камеру рабочего хода A. Одновременно в камеру B подавался воздух с меньшим давлением. Пока клапан не закроется, воздух из камеры B будет беспрепятственно выходить в атмосферу по кольцевому зазору между клапаном и корпусом. При достижении определенного давления воздуха  $p_1$  в камере A ударник 1 движется влево, преодолевая сопротивление деформации клапана 4 и происходит механическое закрытие упругого клапана. При этом увеличивается давление воздуха в камере B, что и является сигналом закрытия клапана. Таким образом определялось давление закрытия клапана  $P_{\text{закр.}}$ .

Далее увеличивали давление воздуха  $p_2$ , подаваемое в камеру B через трубку 7. Так как величина рабочей площади со стороны камеры B больше, чем со стороны камеры A ударника 1, последний под действием результирующей силы от давления энергоносителя движется в заднее положение (на рис. 1 вправо). Клапан 4 под действием давления воздуха находится в растянутом (закрытом) положении. После этого осуществлялось плавное снижение давления воздуха в камере B до открытия клапана и резкого падения давления энергоносителя в этой камере. Так определялось давление открытия упругого клапана  $P_{\text{сх.}}$ , фиксируемое с помощью манометра. Общий вид стенда с машиной и компрессором представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид стенда для испытания клапанов:  
1 – машина; 2 – кран подачи давления в камеру рабочего хода;  
3 – кран подачи давления в камеру холостого хода; 4 – компрессор;  
5 – манометр; 6 – выхлопное отверстие

В качестве материала для упругих клапанов тарельчатого типа использовалась резина с модулем упругости  $E = 5$  МПа, коэффициентом Пуассона  $\mu = 0,31$  [13]. Наружный диаметр клапанов –  $\varnothing 72$  мм.

Предварительная конструкция клапанов и размеры приняты из работы [14]. Конструктивные формы клапанов, с которыми проводились исследования, представлены на рис. 3а – в.

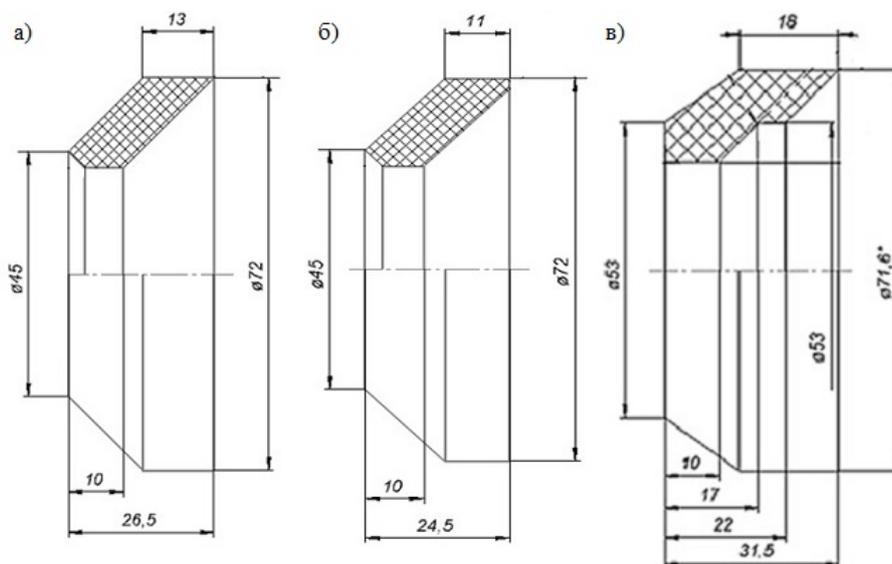


Рис. 3. Конструкции упругих клапанов:  
а – тарельчатого типа; б – тарельчатого типа без кромки;  
в – тарельчатого типа с увеличенной кромкой

По результатам экспериментов с упругими клапанами тарельчатого типа можно сделать следующие выводы:

1. Закрытие клапана, изображенного на рис. 3а, и герметизация камеры холостого хода *Б* достигнуты при величине вылета шайбы  $X_{\text{п}}=7,7$  мм (см. рис.1), после снижения давления воздуха открытие резинового клапана происходит при  $P_{\text{сх.}}=0,2$  МПа. Также определено минимально необходимое давление воздуха в камере рабочего хода для закрытия клапана ударником, составившее  $P_{\text{закр.}}=0,5$  МПа.

2. Отличием клапана, приведенного на рис. 3б является уменьшение ширины кромки, прилегающей к внутренней части поверхности корпуса, на 2 мм. Без установки подвижной шайбы ( $X_{\text{п}}=0$ ) клапан герметизировал камеру холостого хода. По мере снижения давления воздуха величина открытия резинового клапана составила  $P_{\text{сх.}}=0,1$  МПа. Минимальное давление воздуха, необходимое в камере рабочего хода для закрытия клапана ударником, составило  $P_{\text{закр.}}=0,115$  МПа.

3. При установке величины вылета подвижной шайбы  $X_{\text{п}}=8,4$  мм клапан, показанный на рис. 3в, оказался герметичным. После снижения давления воздуха открытие резинового клапана произошло при  $P_{\text{сх.}}=0,09$  МПа. Получено минимальное давление воздуха, необходимое в камере рабочего хода для закрытия клапана, равное  $P_{\text{закр.}}=0,45$  МПа.

Таким образом, из результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что наиболее приемлемым для установки в новом пневмоударном устройстве является тарельчатый клапан, изображенный на рис. 3а, с величиной давления открытия, равной  $P_{\text{сх.}}=0,2$  МПа. Такая величина давления позволит раньше переводить клапан в открытое состояние, что позволит уменьшить время задержки ударника перед началом рабочего хода и улучшить динамику рабочего цикла ударной машины.

#### *Испытания физической модели пневмоударной машины с клапаном тарельчатого типа*

Полученные результаты стендовых испытаний позволили перейти к испытаниям физической модели пневмоударной машины. Стенд с установленной машиной и оборудованием представлен на рис. 4.

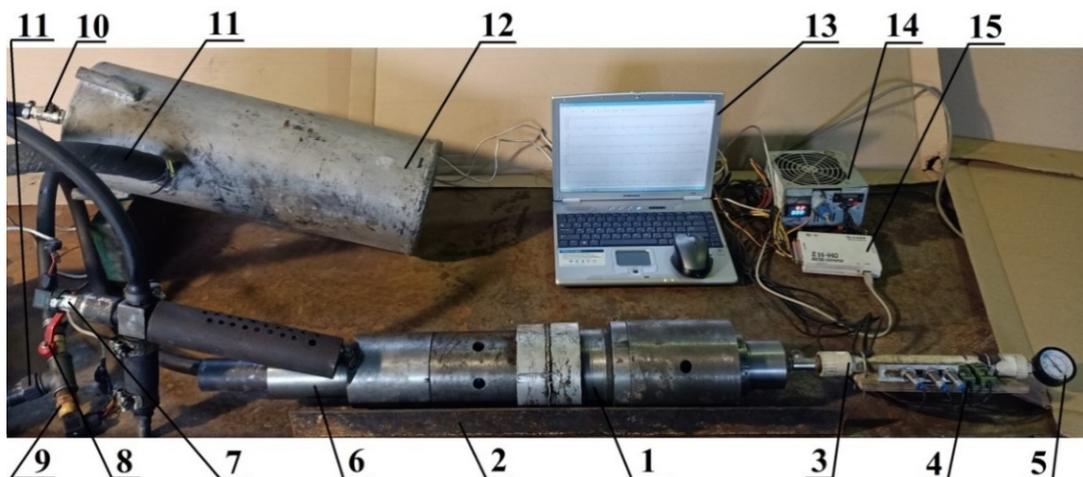


Рис. 4. Общий вид испытательного стенда:

- 1 – машина; 2 – основание; 3 – трубка; 4 – датчики перемещения; 5 – манометр;
- 6 – резьбовая втулка; 7 – датчик измерения давления в камере рабочего хода;
- 8 – кран подачи давления в камеру холостого хода; 9 – датчик измерения давления в камере холостого хода; 10 – кран подачи давления в камеру рабочего хода; 11 – магистральный шланг;
- 12 – ресивер; 13 – персональный компьютер; 14 – источник питания;
- 15 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

Пневмоударная машина 1 была установлена на неподвижном основании 2. В ударник был ввернут стержень с металлическим поршнем на конце, позволяющий отслеживать его положение в корпусе. Поршень был установлен в герметичную пластиковую трубку 3, присоединенную к передней части машины. Вблизи пластиковой трубки были установлены индуктивные датчики 4, отслеживающие положение ударника. Подача энергоносителя в машину осуществлялась от компрессора с номинальным давлением 0,4 МПа. Подача воздуха в камеры машины происходила следующим образом. Сжатый воздух от компрессора через магистральный шланг 11, шаровой кран 8 поступал в камеру холостого хода. Одновременно воздух поступал через шланг 11, ресивер 12, шаровой кран 10 и далее через датчик измерения давления 7 в камеру рабочего хода машины. Ресивер 12 необходим для восполнения утечек воздуха в камере рабочего хода. Наличие крана 10 позволяет регулировать подачу энергоносителя из ресивера 12 в камеру рабочего хода. С помощью крана 8 осуществляется регулировка подачи сжатого воздуха в камеру холостого хода. Для измерения давления в камере холостого хода установлен датчик 9. Калибровка измеряемого давления осуществлялась с помощью манометра 5, установленного на пластиковой трубке 3. Перемещение центрального патрубка относительно корпуса машины, регулирование рабочего хода ударника, а также динамических параметров пневмоударной машины (энергии и частоты ударов), осуществлялось за счет вращения резьбовой втулки 6. Площади проходных сечений всех указанных кранов взяты из предварительного расчета, проведенного с помощью имитационного моделирования в программном комплексе ITISimX [15].

Питание индуктивных датчиков 4, датчиков давления 7, 9 и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 15 осуществлялось с помощью источника питания 14. После выхода машины на устойчивый режим работы датчики 4 фиксировали положение ударника, а датчики 7, 9 – изменение давлений в рабочих камерах машины. Далее сигналы с датчиков поступали на АЦП 15. Первоначальная обработка поступающих данных с АЦП производилась с помощью программы LGraph на персональном компьютере 13 [16]. Последующая обработка и представление полученных результатов в графическом виде производилась в программе Microsoft Excel.

Результаты экспериментального исследования отражены в виде графиков изменения энергетических и динамических параметров от величины рабочего хода  $X$  пневмоударной машины, приведенных на рис. 5.

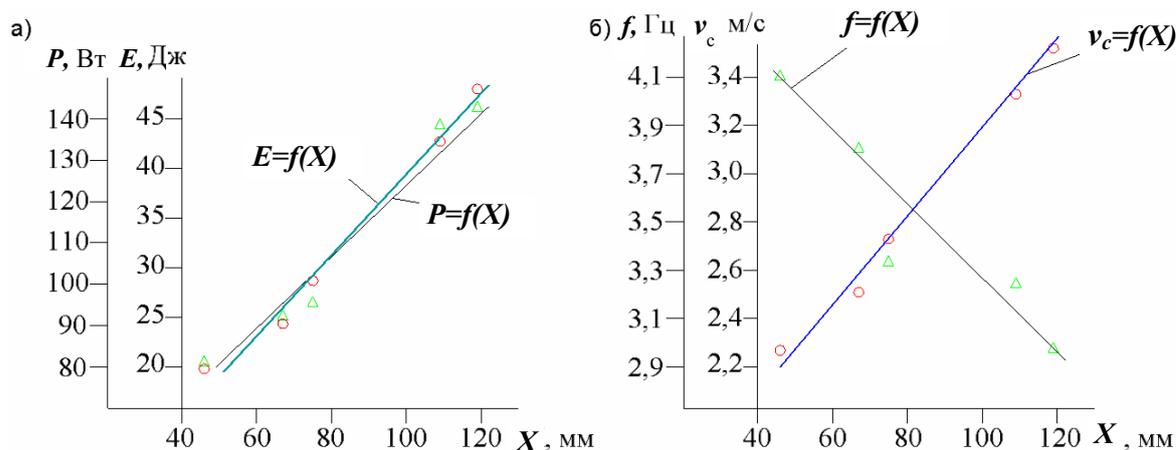


Рис. 5. Изменение ударной мощности  $P$  и энергии удара  $E$  (а), частоты  $f$  и скорости соударения  $v_c$  (б) от величины рабочего хода  $X$  пневмоударной машины

Графики на рис. 5а показывают, что рост величины перемещения центрального патрубка  $H_p$  от 40 до 95 мм приводит к повышению энергии удара примерно в 2,4 раза, а ударной мощности – примерно в 1,7 раз. Графики, представленные на рис. 5б, ото-

бражают снижение частоты ударов примерно в 1,4 раза и повышение скорости соударения – в 1,5 раза. По результатам экспериментальных исследований была проведена валидация имитационной модели.

Решением проблемы увеличения диапазона изменения параметров машины может являться увеличение рабочего хода ударника. В связи с этим было проведено исследование изменения параметров устройства в увеличенном диапазоне перемещения центрального патрубка от 40 до 180 мм на имитационной модели в программе ITISimX [13].

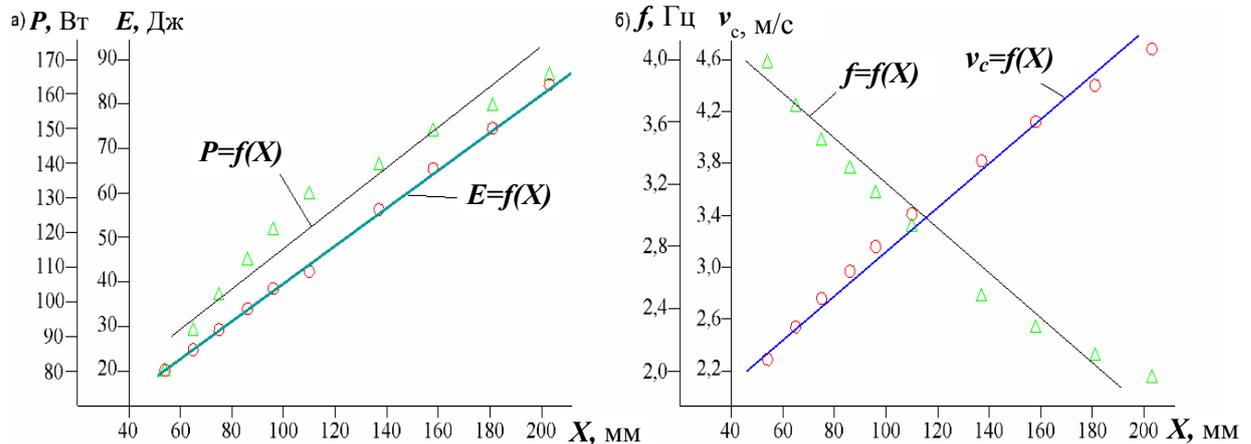


Рис. 6. Изменение мощности  $P$  и энергии удара  $E$  (а), частоты  $f$  и скорости удара  $v_c$  (б) от величины рабочего хода  $X$  пневмоударной машины при имитационном моделировании

Из графиков на рис. 6а видно, что изменение величины перемещения центрального патрубка в увеличенном диапазоне  $H_p=40-180$  мм приводит к повышению энергии удара примерно в 4,2 раза, а ударной мощности – примерно в 2 раза. Графики на рис. 6б отображают снижение частоты ударов в 2 раза и повышение скорости соударения примерно в 2 раза.

На графике ударной мощности (рис. 6а) можно выделить два диапазона. В первом диапазоне  $X=54-110$  мм изменение ударной мощности составляет  $\delta P=51$  Вт. Во втором диапазоне  $X=110-203$  мм –  $\delta P=35$  Вт. С большой долей вероятности можно предполагать, что при увеличении диапазона перемещения подвижного патрубка более  $H_p=180$  мм изменение ударной мощности будет снижаться и дальнейшая зависимость  $P=f(X)$  получит более пологий линейный характер. Это обстоятельство позволит создать конструкцию опытного образца пневмоударной машины, в которой изменение величины энергии будет осуществляться с минимальными потерями ударной мощности.

### Выводы

Проведенные экспериментальные исследования условий срабатывания упругих клапанов тарельчатого типа на физической модели пневмоударной машины позволили определить их величину давления открытия и закрытия. Вследствие этого для дальнейшей работы был выбран клапан тарельчатого типа, имеющий наибольшую величину давления открытия.

Экспериментальные исследования физической модели пневмоударной машины позволили получить графики, показывающие, что изменение динамических и энергетических параметров происходит в малом диапазоне. Последующая валидация имитационной модели и проведение дополнительных исследований позволили увеличить диапазон изменения параметров до значений, необходимых для создания опытного образца пневматической ударной машины. Такую пневмоударную машину можно применить для реализации адаптивных технологических процессов, а в перспективе и для ре-

ализации «безлюдных технологий», в которых технологические операции бурения осуществляются автономно, без нахождения персонала в месте ведения горных работ.

### Список литературы

1. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К., 1985. *Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия*. Новосибирск: Наука, 135 с.
2. Rakhmangulov A., Burmostrov K., Osintsev N., 2021. Sustainable pen pit mining and technical systems: concept, principles, and indicators. *Sustainability*, vol. 13, no. 3, article 1101. DOI: 10.3390/su13031101.
3. Марданов В.А., Ткаченко Д.Г., 2021. Об использовании робототехники при ведении горнопроходческих работ. *Проблемы горного дела. Сборник научных трудов II Международного Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященного 100-летию ДонНТУ*. Донецк, С. 89 – 93.
4. Шевченко А.Н., Храмовских В.А., 2019. О перспективах автоматизированных способов добычи полезных ископаемых. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка полезных ископаемых*. Т. 42, № 1. С. 104 – 111. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111.
5. Atkinson R.D., 2019. Robotics and the future of production and work. Information Technology and Innovation Foundation. URL: <https://itif.org/publications/2019/10/15/robotics-and-future-production-and-work/> (дата обращения 20.02.2023)
6. Плохих В.В., Данилов Б.Б., Чешин Д.О., 2022. Создание и исследование имитационной модели пневматической ударной машины с изменяемой структурой ударной мощности. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, Т. 2, № 3, С. 270 – 278. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-270-278
7. Плохих В.В., 2022. Создание пневматической ударной машины для реализации адаптивных технологических процессов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 91 – 103.
8. Гаун В.А., 1978. *Разработка и исследование погружных пневмоударников с комбинированным воздухораспределением*: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.06. Новосибирск, 19 с.
9. Червов В.В., 2009. *Теория и практика создания пневматических молотов с переменной структурой мощности для реализации бестраншейных технологий прокладки коммуникаций*: дис. ... докт. техн. наук: 05.05.04. Новосибирск, 289 с.
10. Петреев А.М., Смоляницкий Б.Н., 1999. Согласование параметров пневмомолота с производительностью источника питания. *ФТПРПИ*, № 2, С. 86 – 90.
11. Примычкин А.Ю., 2017. *Обоснование параметров кольцевого упругого клапана системы воздухораспределения при создании пневмоударных машин*: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.06. Новосибирск, 22 с.
12. Пат. 208325 РФ, МПК E21B 1/00 (2006.01). *Устройство ударного действия*. Б.Б. Данилов, В.В. Плохих, А.А. Речкин, Д.О. Чешин; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН. № 2021118386; заявл. 24.06.2021, опублик. 14.12.2021, Бюл. № 35 – 7 с.
13. Потураев В.Н., Дырда В.И., 1977. *Резиновые детали машин*. Москва: Машиностроение, 216 с.
14. Данилов Б.Б., Речкин А.А., 2022. Зависимость изменения энергии боя от формы сечения стационарно установленного упругого клапана при их взаимодействии в ударной машине. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*, Т. 9, № 2, С. 128 – 133. DOI: 10.15372/FPVGN2022090219
15. SimulationX. *Официальный сайт компании ESI Group*. URL: <https://www.esigroup.com/products/system-simulation> (дата обращения: 22.01.2023).
16. АЦП E14-440. *Официальный сайт компании L-CARD*. URL: <http://www.lcard.ru/> (дата обращения 22.01.2023).

## References

1. Sudnishnikov B.V., Esin N.N., Tupitsyn K.K., 1985. Issledovanie i konstruirovaniye pnevmaticheskikh mashin udarnogo deistviya [Research and design of pneumatic impact machines]. Novosibirsk: Nauka, 135 p.
2. Rakhmangulov A., Burmostrov K., Osintsev N., 2021. Sustainable pen pit mining and technical systems: concept, principles, and indicators. Sustainability, vol. 13, no. 3, article 1101. DOI: 10.3390/su13031101.
3. Mardanov V.A., Tkachenko D.G., 2021. Ob ispol'zovanii robototekhniki pri vedenii gornoprokhodcheskikh rabot. Problemy gornogo dela [About the use of robotics in mining operations]. Sbornik nauchnykh trudov II Mezhdunarodnogo Foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh-gornyakov, po-svyashchennogo 100-letiyu DonNTU. Donetsk, P. 89 - 93.
4. Shevchenko A.N., Khramovskikh V.A., 2019. O perspektivakh avtomatizirovannykh sposobov dobychi poleznykh iskopaemykh [On the prospects of automated methods of mining]. Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka poleznykh iskopaemykh. Vol. 42, № 1. P. 104 - 111. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111.
5. Atkinson R.D., 2019. Robotics and the future of production and work. Information Technology and Innovation Foundation. URL: <https://itif.org/publications/2019/10/15/robotics-and-future-production-and-work/> (дата обращения 20.02.2023)
6. Plokhikh V.V., Danilov B.B., Cheshchin D.O., 2022. Sozdanie i issledovanie imitatsionnoi modeli pnevmaticheskoi udarnoi mashiny s izmenyaemoi strukturoi udarnoi moshchnosti [Creation and research of a simulation model of a pneumatic impact machine with a variable structure of impact power]. Interekspo Geo-Sibir', Vol. 2, № 3, P. 270 – 278. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-3-270-278
7. Plokhikh V.V., 2022. Sozdanie pnevmaticheskoi udarnoi mashiny dlya realizatsii adaptivnykh tekhnologicheskikh protsessov [Creation of a pneumatic impact machine for the implementation of adaptive technological processes]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten', № 7, P. 91 – 103.
8. Gaun V.A., 1978. Razrabotka i issledovanie pogrzhnykh pnevmoudarnikov s kombinirovannym vozdukhoraspredeleniem [Development and research of submersible pneumatic strikers with combined air distribution]: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.05.06. Novosibirsk, 19 p.
9. Chervov V.V., 2009. Teoriya i praktika sozdaniya pnevmaticheskikh molotov s peremennoi strukturoi moshchnosti dlya realizatsii bestransheinykh tekhnologii prokladki kommunikatsii kommunikatsii [Theory and practice of creating pneumatic hammers with a variable power structure for the implementation of borderless technologies for laying communications]: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.05.04. Novosibirsk, 289 p.
10. Petreev A.M., Smolyanitskii B.N., 1999. Soglasovanie parametrov pnevmomolota s proizvoditel'nost'yu istochnika pitaniya [Matching the parameters of the pneumatic hammer with the performance of the power source]. FTPRPI, № 2, P. 86 – 90.
11. Primychkin A.Yu., 2017. Obosnovanie parametrov kol'tseвого uprugogo klapana sistemy vozdukhoraspredeleniya pri sozdanii pnevmoudarnykh mashin [Substantiation of the parameters for the annular elastic valve of the air distribution system when creating pneumatic impact machines]: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.05.06. Novosibirsk, 22 p.
12. Pat. 208325 RF, MPK E21V 1/00 (2006.01). Ustroistvo udarnogo deistviya [Pat. 208325 RF, IPC E21B 1/00 (2006.01). Shock-action device]. B.B. Danilov, V.V. Plokhikh, A.A. Rechkin, D.O. Cheshchin; zayavitel' i patentoobladatel' IGD SO RAN. № 2021118386; zayavl. 24.06.2021, opubl. 14.12.2021, Byul. № 35 – 7 p.
13. Poturaev V.N., Dyrda V.I., 1977. Rezinovye detali mashin [Rubber machine parts]. Moscow: Mashi-nostroenie, 216 p.

---

14. Danilov B.B., Rechkin A.A., 2022. Zavisimost' izmeneniya energii boika ot formy secheniya statsionarno ustanovlennogo uprugogo klapana pri ikh vzaimodeistvii v udarnoi mashine [Dependence of the change in the striker energy on the cross-section shape of a stationary elastic valve during their interaction in the shock machine]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk*, Vol. 9, № 2, P. 128 – 133. DOI: 10.15372/FPVGN 2022090219

15. SimulationX. *Официальный сайт компании ESI Group* [The official website of the ESI Group]. URL: <https://www.esi-group.com/products/system-simulation> (дата обращения: 22.01.2023).

16. ATsP E14-440. *Ofitsial'nyi sait kompanii L-CARD* [The official website of the L-CARD company]. URL: <http://www.lcard.ru/> (data obrashcheniya 22.01.2023).



## ГЕОФИЗИКА

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: [sevcenkomaksim625@gmail.com](mailto:sevcenkomaksim625@gmail.com)

**Мельник Виталий Вячеславович**

кандидат технических наук,  
заведующий отделом геомеханики,  
Институт горного дела УрО РАН  
e-mail: [melnikvv74@mail.ru](mailto:melnikvv74@mail.ru)

**Замятин Алексей Леонидович**

научный сотрудник,  
лаборатория технологий снижения риска ката-  
строф при недропользовании,  
Институт горного дела УрО РАН,  
e-mail: [a.zamyatin@mail.ru](mailto:a.zamyatin@mail.ru)

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НА УЧАСТКАХ СТРОИТЕЛЬСТВА  
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ  
РУДНИКОВ\****Аннотация:*

*Представлен опыт применения современных геофизических методов для исследования подработанной территории на строительной площадке шахтного ствола. Актуальность выполнения данных исследований вызвана широкой распространенностью природно-техногенных аварий, связанных с нарушением массива горных пород при строительстве и эксплуатации горных выработок. Цель исследований заключалась в проведении геофизических исследований, нацеленных на получение необходимой информации о структурном строении массива горных пород для определения причин произошедшего провала земной поверхности на площадке строительства надшахтного здания.*

*Объектом исследований является массив горных пород, вмещающих горные выработки, находящийся в основании объектов капитального строительства, расположенных на поверхности.*

*Основная решаемая задача заключается в определении участков структурного нарушения породного массива на территории исследования, определение причин развития аварийных ситуаций для принятия решений по стабилизации ситуации.*

*При исследовании породного массива используется метод георадиолокации, основанный на*

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.105

**Shevchenko Maxim D.**

Junior Researcher,  
Laboratory of technologies for reducing  
the risk of catastrophes in subsoil use,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,  
620075 Ekaterinburg,  
58 Mamina-Sibiryaka Str.  
e-mail: [sevcenkomaksim625@gmail.com](mailto:sevcenkomaksim625@gmail.com)

**Melnik Vitaliy V.**

Candidate of Technical Sciences,  
Head of the Department of geomechanics,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [melnikvv74@mail.ru](mailto:melnikvv74@mail.ru)

**Zamyatin Aleksey L.**

Researcher,  
Laboratory of technologies for reducing  
the risk of catastrophes in subsoil use,  
Institute of Mining, Ural Branch of RAS  
e-mail: [a.zamyatin@mail.ru](mailto:a.zamyatin@mail.ru)

**GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS  
AT CONSTRUCTION AND OPERATION  
SITES OF UNDERGROUND MINES***Abstract:*

*The paper presents the experience of using modern geophysical methods to study the undermined area at the construction site of a mineshaft. The relevance of these investigations is due to the wide prevalence of natural and man-made accidents associated with the violation of the rock mass during the construction and operation of mine workings. The purpose of the work was to study geophysical researches related to the obtaining of information about the structure composition of rock mass in order to determine the causes of destruction of the earth's surface in the building area of a mine construction.*

*The object of research is the rock mass lying at the base of capital construction objects located on the surface enclosing mine workings.*

*The main task to be solved is to determine the areas of structural disturbance of the rock mass in the studied area, to determine the causes of the development of hazard situations in order to make decisions on stabilizing the situation.*

*When investigating the rock mass the GPR method is used, based on the study of electromagnetic wave impulses and registration of signals reflected from various objects of the probed environment, as well as the spectral seismic profiling method, based on the use of the relationship between the spectral composition of the oscillatory process that occurs during impact on the exposed surface of the array,*

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

изучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от различных объектов зондируемой среды, и метод спектрального сейсмопрофилирования, основанный на использовании зависимости между спектральным составом колебательного процесса, возникающего при ударном воздействии на обнаженную поверхность массива, и структурным строением этого массива.

По результатам представленных исследований выявлены причины возникновения провала земной поверхности и особенности структурного строения территории. Установлено, что в результате техногенного воздействия (строительства шахтного ствола) на массив горных пород произошли изменения в геологической среде, что привело к возникновению провала на земной поверхности.

Комплексирование представленных методов геофизических исследований показало высокую эффективность при решении поставленной задачи, достоверность получаемой информации подтверждается по результатам буровых и проходческих работ, выполненных на данной площадке.

*Ключевые слова:* геофизические исследования, подработанные территории, георадарное зондирование, спектральное сейсмопрофилирование, природно-техногенные катастрофы, геологические процессы, провалы земной поверхности, деформация зданий и сооружений.

and the structural composition of this array.

According to the results of the presented studies, we revealed the causes for the occurrence of the sinkhole of the earth's surface and the features of the whole structure of the territory. It has been established that, because of the man-made impact (construction of a mine shaft) on the rock mass, changes occurred in the geological environment, which led to the occurrence of a failure on the earth's surface.

The integration of the presented methods of geophysical research showed high efficiency in solving the problem; the reliability of the information obtained is confirmed by the results of drilling and tunneling operations performed at this site.

*Key words:* geophysical surveys, undermined territories, georadar sounding, spectral seismic profiling, natural and man-made disasters, geological processes, failures of the earth's surface, deformation of buildings and structures.

## Введение

На современном этапе развития горнопромышленной отрасли одной из актуальных задач является обеспечение безопасного ведения горных работ. Особую важность данная задача приобретает, когда речь идет о строительстве и эксплуатации объектов, расположенных на территориях подземной отработки месторождений, где обеспечение безопасности требует знаний о физических свойствах грунтов, не только подстилающих фундамент, но и распространяющихся до глубины выработанного пространства, о том, что приводит к деформации земной поверхности и, следовательно, к природно-техногенным катастрофам.

Основной причиной возникновения катастроф является деформация земной коры, вызванная природными или техногенными причинами [1 – 5], напрямую влияющая на целостность построек.

Как в мировой, так и в отечественной горной практике известно множество случаев возникновения аварий, связанных с деформацией земной поверхности. К примеру, в конце мая 2008 г. на территории заброшенного рудника «Моокеук» в Корее образовался провал, из-за которого были разрушены хозяйственные постройки [6]. В 2021 г. постройки на территории шахты «10-летия независимости Казахстана» были подвержены деформации и частичному разрушению в результате влияния подземных выработок [7]. Здание, находящееся на территории старых подземных выработок Березовского золоторудного месторождения, подвергается постоянным деформациям с образованием трещин в стенах здания и провалов на прилегающих территориях [8]. Образовались провалы в жилых массивах, в районе города Соликамска: провал в 2014 г. образовался на расстоянии 1,3 км от магистрали газопровода, и за два года его размер увеличился в 25 раз [9].

Перечисленные аварии, случившиеся на объектах, расположенных на подработанных территориях, показали, что территории над подземными выработками являются объектами повышенной опасности и требуют более детального изучения для предотвращения негативных последствий. Таким образом, можно сделать вывод, что проведение геофизических исследований на подработанных территориях является актуальным при решении задач обеспечения безопасного строительства и эксплуатации зданий и сооружений на данных территориях.

Цель настоящих исследований заключалась в проведении геофизических исследований, нацеленных на получение необходимой информации о структурном строении массива горных пород для определения причин произошедшего провала земной поверхности на площадке строительства надшахтного здания подземного рудника.

#### *Краткая характеристика объекта исследования*

Участок изысканий находится в Российской Федерации, в Республике Башкортостан.

На участке исследований массив скальных горных пород начинается с глубины 106 м. В верхней части массив выполнен глинизированными галечниковыми и валунно-гравийно-галечниковыми отложениями. Фильтрация подземных вод происходит в основном по небольшим по мощности валунно-галечным отложениям. Уровень подземных вод залегает на глубинах 37 – 57 м. Техногенное воздействие на геологическую среду привело к ее изменению и активизации процесса механического выноса частиц грунта в шахтный ствол – суффозии, в результате чего образовался провал земной поверхности, повлекший за собой трещины в конструктивных элементах построек (рис. 1).



Рис. 1. Фотографии трещин шахтного эксплуатационного копра

Во избежание аварийных последствий было принято решение о проведении геофизических исследований для получения информации о структурных условиях массива горных пород и прогноза дальнейшего развития деформационных процессов.

#### *Методика проведения геофизических исследований*

Методика проведения исследования включает следующие методы.

*Метод георадиолокации* относится к группе электромагнитных методов геофизического исследования массива горных пород. Принцип работы заключается в определении расстояния до границы раздела различных сред по скорости и времени перемещения отраженных волн. В проведении исследований использовался георадар «Око – 2» с антенным блоком АБ – 150 с центральной частотой 150 МГц. Обработка полученных данных проводилась в ПО Geoscan32.

*Метод спектрального сейсмопрофилирования (ССП)* значительным образом отличается от традиционной лучевой сейсморазведки. В СПП среда представляется как

совокупность колебательных систем, а не как слоистая система. Исследование проводилось с использованием аппаратно-программного ССП комплекса с отдельно запатентованным сейсмоприемником. Каждый записанный сейсмосигнал подвергается преобразованию Фурье, с помощью которого изменяющийся процесс может быть изображен на оси частот (т.е. в спектральном виде). В результате обработанные данные представляют собой изображения спектров сигналов и одновременно изображение различного рода геологических объектов в геомеханическом аспекте.

Многолетний опыт применения приведенных выше методов показал свою эффективность как на поверхности, так и в подземных условиях [10 – 14]. Часто при использовании метода георадарного зондирования возникают переотражения и помехи (от опор сети, подземных коммуникаций, металлических конструкций и т.п.). В этой связи для обеспечения максимальной достоверности получаемых результатов в условиях нарушенных горными работами территорий лучше всего использовать комплекс вышеуказанных методов.

#### *Результаты исследований*

Исследования методами спектрального сеймопрофилирования и георадарного зондирования проводились на территории, прилегающей к основному зданию и внутри помещений. На рис. 2 представлен спутниковый снимок площадки изысканий.

На рис. 3 и 4 представлены ССП-разрезы по одному профилю с разницей измерений в 10 лет (во время строительства ствола и после произошедшего инцидента с провалом грунта).

На рис. 3, 4 хорошо заметны изменения структуры горного массива за десять прошедших лет, связанные с выносом песчаной фракции и образованием суффозионной полости за счет откачки воды из ствола при строительстве. Глубина развития суффозии по данным гидродинамического анализа разреза и полученных геофизическими методами данных составляет порядка 60 – 65 м, а нарушенный участок хорошо виден на границе гравийно-галечниковых отложений с глинистым прослоем (глубина порядка 30 м).

Сам провал произошел в непосредственной близости от данного профиля, но ближе к стволу, в районе воздействия гидродинамических нагрузок. Расположение профильных линий в статье не приводится в связи с необходимостью соблюдения обязательств перед контрагентами.



Рис. 2. Вид строительной площадки шахтного ствола (Гугл Земля)

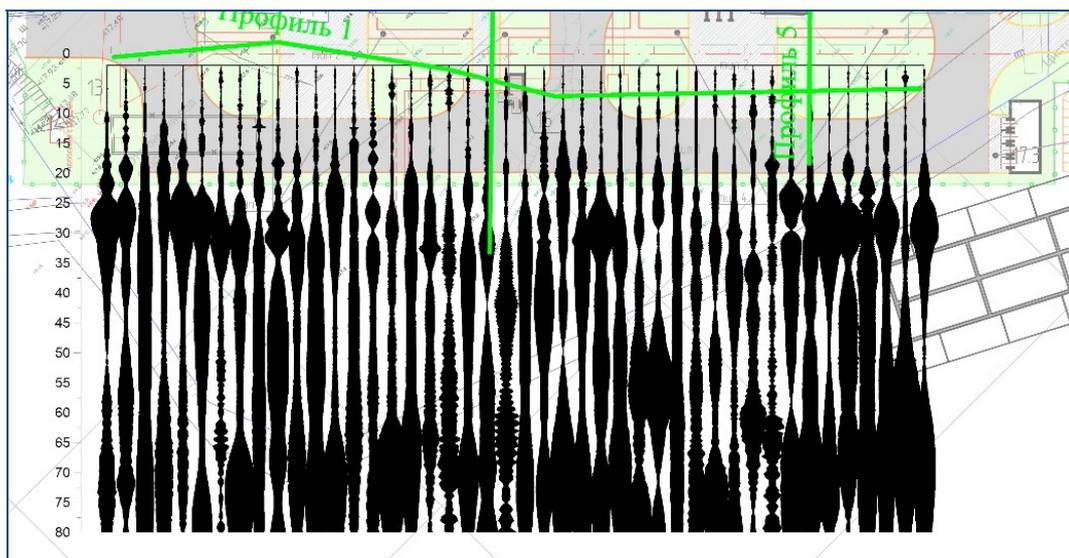


Рис. 3. ССП - разрез при измерениях 2012 г.

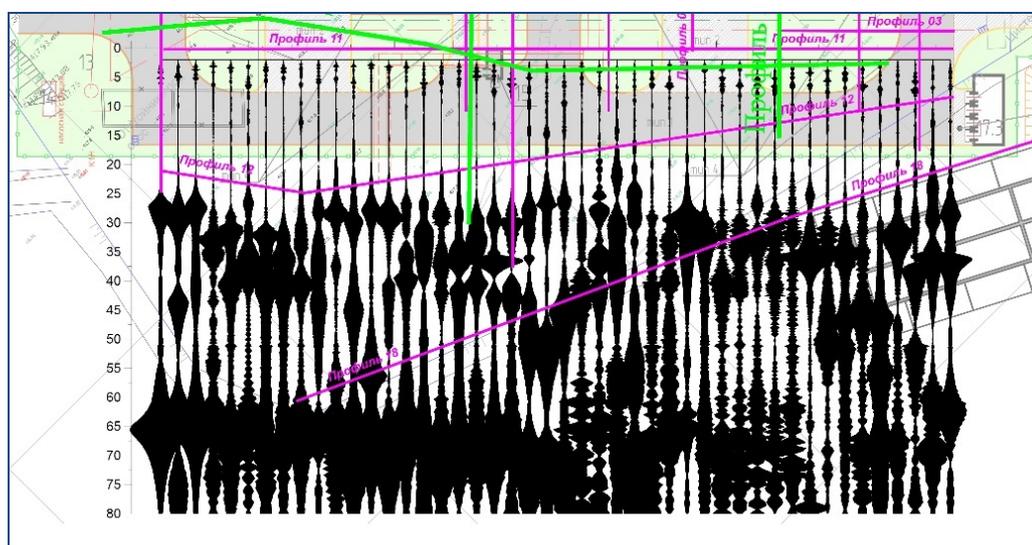


Рис. 4. ССП разрез при измерениях 2022 г.

Исследования методом георадарного зондирования на данном участке проводились больше для определения возможного зависания грунтов в непосредственной близости от фундамента здания на глубину до 16 м (рис. 5).

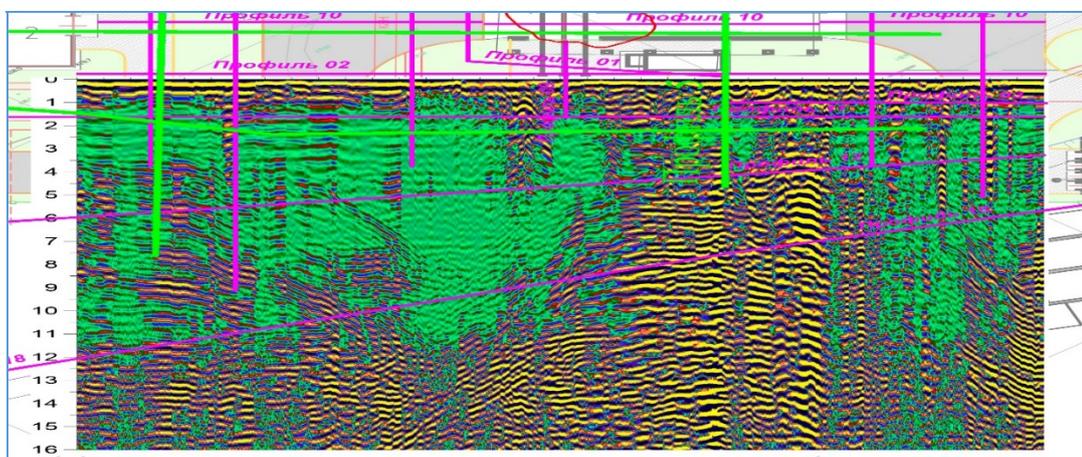


Рис. 5. Радиограмма в непосредственной близости от провала

Участок провала по георадару обозначился нарушением структуры, хорошо совпал по простиранию с результатами спектрального сейсмопрофилирования, однако дополнительных участков нарушения сплошности массива на площадке изысканий и в здании не было обнаружено. Можно констатировать, что процесс образования воронки обрушения закончился.

### Заключение

Увеличение добычи минерального сырья приводит к возрастанию площадей подработанных территорий, из-за чего увеличивается риск возникновения природно-техногенных катастроф. Изменение геологической среды при антропогенном воздействии приводит к изменению ее геомеханических условий и проявлению современных геологических процессов, напрямую влияющих на безопасность ведения работ и безопасную эксплуатацию построек. Поэтому исследование подработанных горными работами территорий является актуальной задачей на современном этапе развития мировой цивилизации.

Установлено, что на участке исследования в результате изменения гидродинамического режима произошел механический вынос частиц грунта в шахтный ствол с последующей откачкой дренажными насосами, что привело к возникновению открытой полости и, соответственно, к образованию провала на земной поверхности. По результатам исследований хорошо проявляются изменения структуры породного массива за последние 10 лет. Процесс суффозии, развивавшийся на глубине 55 – 65 м, спровоцировал формирование дренажных поверхностей, о чем свидетельствует сравнение разрезов 2012 и 2022 г. Нарушенный участок хорошо проявляется на границе гравийно-галечниковых отложений с глинистым прослоем, соответствующая глубине 30 м. Георадарные исследования позволили подтвердить сформировавшуюся область развития просадочных процессов и проследить структурные нарушения по всей площадке строительства до глубины 16 м. Пустот, зависших под фундаментом здания, обнаружено не было.

Комплексирование различных методов геофизических исследований позволяет получать подробную информацию о структурном строении территории, проводить мониторинг его изменения с течением времени и прогнозировать дальнейшее развитие современных геологических процессов. Своевременное выявление развития процесса сдвижения при горных работах на объектах недропользования позволяет принимать меры для его предотвращения либо сведения к минимуму последствий. Геофизические методы для этих целей подходят больше всего.

### Список литературы

1. Далатказин Т.Ш., Ведерников А.С., Григорьев Д.В., 2022. Исследования возможности применения методики срединного градиента при изучении современной геодинамической активности. *Проблемы недропользования*, № 4(35), С. 132 – 138. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.132.
2. Мельник В.В., 2021. Научные основы создания системы осушения обводненных месторождений с учетом структурно-тектонического строения и современной геодинамической активности участка недропользования. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 – 2, С. 111 – 120. DOI 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_111.
3. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Berger M.G., 2021. Endogenous and Exogenous Manifestations of Geodynamic Activity in the Central Caucasus. *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere*. Switzerland: Springer Nature, P. 499 – 532. DOI 10.1007/978-3-030-63571-8\_30.
4. Cabral J., Cabral M.C., Dias R.P., Cunha P.P., 2019. Quaternary tectonic activity of the São Marcos–Quarteira fault (Algarve, southern Portugal): a case study for the characteri-

zation of the active geodynamic setting of SW Iberia. *Journal of Iberian Geology*, Vol. 45, No 3, P. 427 – 442. DOI 10.1007/s41513-019-00102-2.

5. Мельник В.В., 2010. Диагностика карстопоявлений при проведении инженерно-геологических изысканий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 7, С. 275 – 278.

6. Tony Waltham, Hyeong-Dong Park, Jangwon Suh, 2011. Collapses of old mines in Korea. *Engineering Geology*, 118, P. 29–36 Publisher: Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.11.007>. (дата обращения 10.02.1023)

7. Шевченко М.Д., 2021. Изучение изменений массива горных пород в области влияния подземных горных выработок. *Проблемы недропользования*, № 4(31), С. 55 – 60. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.055.

8. Усанов С.В., Харисов Т.Ф., Григорьев Д.В., Прошин В.А., 2021. Факторы деформаций здания, построенного в районе старых неглубоких подземных разработок. *Проблемы недропользования*, № 4(31), С. 44 – 54. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.044.

9. Гордеев В.Ф., Малышков С.Ю., Поливач В.И., 2019. Геофизический мониторинг опасных техногенных проявлений на подрабатываемых территориях. *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ)*, Т. 24, № 2, С. 35 – 44. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-35-44.

10. Дьяков А.Ю., 2019. Георадар как инструмент для решения горных задач. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*, № 12 – 1(39), С. 64 – 68. DOI 10.24411/2500-1000-2019-11846.

11. Рассказчикова Н.И., Курилович А.Э., Аузин А.А., 2019. Оценка физических свойств песчаных грунтов при помощи георадара. *Инженерные изыскания в строительстве: материалы третьей Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов, Москва, 26 апреля 2019 года*. Москва: Геомаркетинг, С. 94 – 98.

12. Едемский Д.Е., Петров Н.Ф., Прокопович И.В., 2021. Применение низкочастотных георадаров для изучения и контроля экзогенных геологических процессов. *Разведка и охрана недр*, № 9, С. 14 – 23.

13. Харисов Т.Ф., Мельник В.В., Замятин А.Л., 2020. Геофизические поисково-оценочные исследования в условиях подземного рудника. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, № 7, С. 49 – 55. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-49-55.

14. 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.

## References

1. Dalatkazin T.Sh., Vedernikov A.S., Grigor'ev D.V., 2022. Issledovaniya vozmozhnosti primeneniya metodiki sredinnogo gradienta pri izuchenii sovremennoi geodinamicheskoi aktivnosti [Study of the possibility of using the median gradient technique in the research of modern geodynamic activity]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(35), P. 132 - 138. DOI 10.25635/2313-1586.2022.04.132.

2. Mel'nik V.V., 2021. Nauchnye osnovy sozdaniya sistemy osusheniya obvodnennykh mestorozhdenii s uchetom strukturno-tektonicheskogo stroeniya i sovremennoi geodinamicheskoi aktivnosti uchastka nedropol'zovaniya [Scientific foundations for the creation of a drainage system for flooded deposits, taking into account the composition and tectonic structure and current geodynamic activity of the subsoil use site]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 2, P. 111 – 120. DOI 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_111.

3. Zaalishvili V.B., Chotchaev Kh.O., Berger M.G., 2021. Endogenous and Exogenous Manifestations of Geodynamic Activity in the Central Caucasus. *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere*. Switzerland: Springer Nature, P. 499 – 532. DOI 10.1007/978-3-030-63571-8\_30.

4. Cabral J., Cabral M.C., Dias R.P., Cunha P.P., 2019. Quaternary tectonic activity of the São Marcos–Quarteira fault (Algarve, southern Portugal): a case study for the characterization of the active geodynamic setting of SW Iberia. *Journal of Iberian Geology*, Vol. 45, No 3, P. 427 – 442. DOI 10.1007/s41513-019-00102-2.
5. Mel'nik V.V., 2010. Diagnostika karstoproyavlenii pri provedenii inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy [Diagnostics of karst phenomena during engineering and geological surveys]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 7, P. 275 – 278.
6. Tony Waltham, Hyeong-Dong Park, Jangwon Suh, 2011. Collapses of old mines in Korea. *Engineering Geology*, 118, P. 29–36 Publisher: Elsevier. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.11.007>. (data obrashcheniya 10.02.1023)
7. Shevchenko M.D., 2021. Izuchenie izmenenii massiva gornyykh porod v oblasti vliyaniya podzemnykh gornyykh vyrabotok [Study of changes in the rock mass in the area of influence of underground mining]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(31), P. 55 – 60. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.055.
8. Usanov S.V., Kharisov T.F., Grigor'ev D.V., Proshin V.A., 2021. Faktory deformatsii zdaniya, postroennogo v raione starykh neglubokikh podzemnykh razrabotok [Factors of deformations of a building constructed in the area of old shallow underground developments]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(31), P. 44 – 54. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.04.044.
9. Gordeev V.F., Malyshev S.Yu., Polivach V.I., 2019. Geofizicheskii monitoring opasnykh tekhnogennykh proyavlenii na podrabatyvaemykh territoriyakh [Geophysical monitoring of dangerous technogenic manifestations in the territories under development]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii (SGUGiT)*, T. 24, № 2, P. 35 – 44. DOI: 10.33764/2411-1759-2019-24-2-35-44.
10. D'yakov A.Yu., 2019. Georadar kak instrument dlya resheniya gornyykh zadach [Georadar as a tool for solving mining problems]. *Mezhdunarodnyi zhurnal gumanitarnyykh i estestvennykh nauk*, № 12 – 1(39), P. 64 – 68. DOI 10.24411/2500-1000-2019-11846.
11. Rasskazchikova N.I., Kurilovich A.E., Auzin A.A., 2019. Otsenka fizicheskikh svoystv peschanykh gruntov pri pomoshchi georadara [Assessment of the physical properties of sandy soils using georadar]. *Inzhenernye izyskaniya v stroitel'stve: materialy tret'ei Obshcherossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh spetsialistov*, Moscow, 26 aprelya 2019 goda. Moscow: Geomarketing, P. 94 – 98.
12. Edemskii D.E., Petrov N.F., Prokopovich I.V., 2021. Primenenie nizkochastotnykh georadarov dlya izucheniya i kontrolya ekzogennykh geologicheskikh protsessov [Application of low-frequency georadars for the study and control of exogenous geological processes]. *Razvedka i okhrana neдр*, № 9, P. 14 – 23.
13. Kharisov T.F., Mel'nik V.V., Zamyatin A.L., 2020. Geofizicheskie poiskovo-otsenochnye issledovaniya v usloviyakh podzemnogo rudnika [Geophysical prospecting and evaluation studies in the conditions of an underground mine]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, № 7, P. 49 – 55. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-7-49-55.
14. Mel'nik V.V., Dalatkazin T.Sh., Zamyatin A.L., 2022. Reshenie zadach bezopasnosti vedeniya podzemnykh gornyykh rabot pri otrabotke ugol'nykh lav s ispol'zovaniem sovremennykh metodov geofiziki [Solving the safety problems for conducting underground mining operations during the mining of coal lavas using modern methods of geophysics]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4(35), P. 122 – 131. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.04.122.

УДК 551.521.9

**Глазачев Иван Вадимович**

магистрант,  
Уральский государственный  
горный университет,  
620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30  
e-mail: [giv-20@mail.ru](mailto:giv-20@mail.ru)

**ОЦЕНКА МЕХАНИЗМОВ  
ПОСТУПЛЕНИЯ РАДОНА В ЗДАНИЯ***Аннотация:*

Радон – радиоактивный газ без цвета, вкуса и запаха. Попадая в организм человека, производит облучение и, как следствие, вызывает лейкемию и рак. Теоретические многолетние исследования позволяют говорить о путях поступления радона в здания, местах его скопления и миграции. Наличие грунтов с высоким содержанием радия под зданием, месторождения природного газа, воды, прошедшей через радийсодержащие породы, загрязненные строительные материалы, деятельность человека – все это усугубляет радоновую проблему. Рассмотрение основных механизмов поступления радона в здание позволяет прогнозировать поведение и распространение данного газа в толще воздуха здания, грунтах основания фундамента, предотвращать проникновение радона. Выделение основных механизмов поступления (диффузионный и конвективный) позволяют в дальнейшем проводить более точные исследования, связанные с радоном, выделять локальные радоновые аномалии.

*Ключевые слова:* радон, радиация, здание, поступление, облучение, строительные материалы, грунты, конвекция, диффузия.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.113

**Glazachev Ivan V.**

graduate student,  
Ural State Mining University,  
620144 Ekaterinburg,  
30 Kuibysheva Str.;  
e-mail: [giv-20@mail.ru](mailto:giv-20@mail.ru)

**ASSESSMENT OF MECHANISMS  
OF RADON INTAKE IN BUILDINGS***Abstract:*

Radon is a colorless, tasteless and odorless radioactive gas. Getting inside of the organism it can be dangerous to human health, since radiation may result in leukemia and cancer. Theoretical long-term studies allow us to say about the ways of radon income ways into buildings, places of gas accumulation and its migration routes. Consideration of the main mechanisms of radon ways of receipt inside buildings makes it possible to predict the gas behavior and distribution of radon in the building column air and in the foundation, and thus to prevent the penetration of radon. The revealing of the main receipt mechanisms (the diffusive one and the convective one) will enable conducting in the future more accurate studies, related to radon and its local anomalies.

*Key words:* radon, radiation, building, intake, irradiation, building materials, soils, convection, diffusion.

*Введение*

Радон – радиоактивный газ, не имеющий цвета и запаха. Радон в тех или иных количествах неизбежно присутствует в воздухе любого здания независимо от конструктивного типа, причем его объемная активность в атмосферном воздухе составляет около  $10 \text{ Бк/м}^3$  [1]. Плотность радона в 7,5 раз выше плотности воздуха. По данным Научного комитета по действию атомной радиации ООН, радон и его дочерние продукты распада обуславливают до 90 % дозовой нагрузки на население от естественных источников облучения. Радон вызывает рак легкого и лейкемию.

Подстилающий горный массив, на котором построено здание, является основным источником радона, объемная активность которого в грунтовой среде составляет десятки  $\text{кБк/м}^3$ . При повышенном содержании радия в грунте под зданием, при наличии глубже расположенных радийсодержащих образований, тектонических нарушений, разломов и т.п. объемная активность радона в грунтовой среде и, как следствие, в здании может серьезно возрасти.

*Изложение рассматриваемых вопросов*

В нашей стране проблеме радоноопасности в настоящее время не уделяют должного внимания, тогда как во многих развитых странах она рассматривается на вы-

соком уровне. Вопросами контроля и мониторинга радона в России занимаются сравнительно недавно, а конкретными мероприятиями, обеспечивающими снижение дозовых нагрузок от радона и его дочерних продуктов распада (ДПР), не интересуются вообще.

Радон неизбежно присутствует в воздухе любого здания. Объемная активность радона вне здания составляет около  $10 \text{ Бк/м}^3$ , а в зданиях она обычно выше, чем в атмосферном воздухе. Такое изменение обуславливается рядом причин:

- наличием источника радона в здании или около него;
- наличием путей проникновения радона в здание;
- наличием движущих сил, под действием которых радон поступает в здание;
- наличием путей миграции радона между источником радона и зданием.

Также поступление радона в здание будет обусловлено процессами воздухообмена с внешней средой.

Приведенная на рис. 1 схема показывает возможные источники радона, а также основные пути его поступления в здания вследствие существующих механизмов.

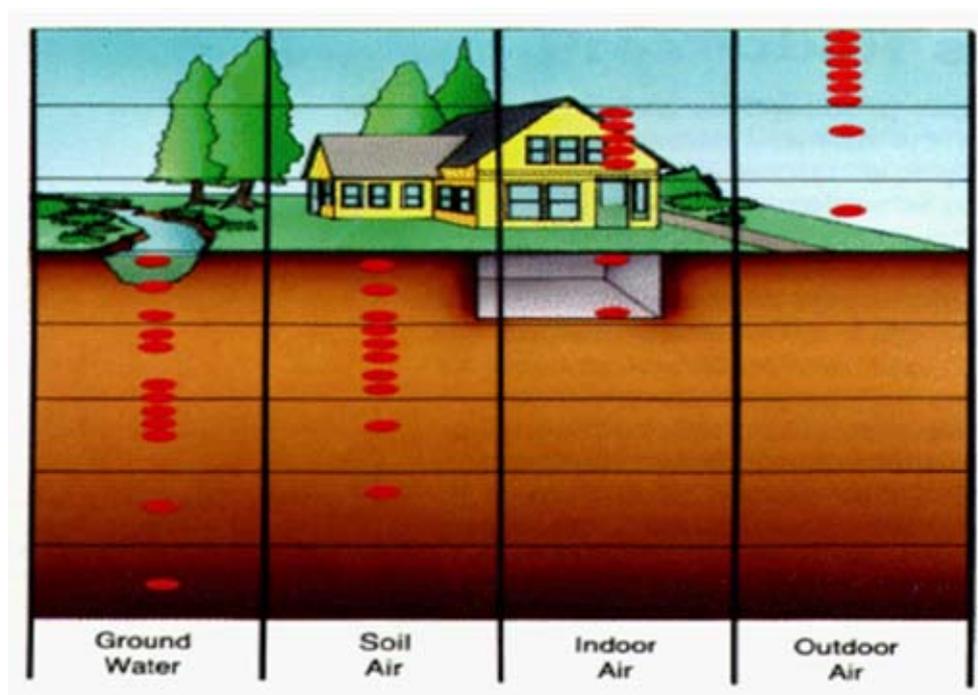


Рис. 1. Основные источники радона [3]

Основным источником радона является массив горных пород, на котором расположено здание. Объемная активность радона в грунтовом воздухе обычно достигает десятков и сотен  $\text{кБк/м}^3$ , причем активность радона на поверхности может расти, если под зданием расположены радийсодержащие рудные образования. Параметры потенциальной радоноопасности устанавливают при проведении инженерных изысканий [4].

Другим источником радона являются строительные материалы, из которых построено здание. Данный источник обычно является менее существенным и доминирует лишь в исключительных случаях. В качестве примера можно назвать случай использования в Швеции пенобетона, изготовленного на основе кварцевых сланцев с высоким содержанием радия [1].

Источником радона также является вода из артезианских скважин. При контакте воды с атмосферой происходит выделение растворенного радона в воздух помещения. Особенно это наблюдается при разбрызгивании воды. По данным Агентства по охране окружающей среды США, удельной активности радона в воде в  $10 \text{ Бк/кг}$  соответствует увеличение объемной активности радона в воздухе на  $1 \text{ Бк/м}^3$ . При этом следует отме-

туть, что, согласно действующим в России Нормам радиационной безопасности НРБ-99, допустимая удельная активность радона в источниках питьевого водоснабжения не должна превышать 60 Бк/кг. Выделение радона из воды происходит тем интенсивнее, чем больше площадь контакта воды с атмосферой и чем выше температура воды, т.е. при использовании душа, существенно меньшее – при стирке, уборке помещений и приготовлении пищи [1].

Из массива горных пород под зданием и строительных материалов радон мигрирует по порам и трещинам. Происходящие при этом процессы могут быть описаны несколькими механизмами:

1) диффузионным, т.е. наличием градиента концентраций радона в среде (скорость переноса радона при этом в основном определяется значением эффективного коэффициента диффузии радона в данной среде);

2) конвективным, т.е. вызванным наличием разности давлений между внутренним объемом здания и внешней атмосферой, различными частями здания и т.д.;

3) смешанным (конвективно-диффузионным), с доминирующим вкладом одного и существенным вкладом другого механизма [10, 11].

Принципиальное различие между механизмами поступления радона в здание приводит к необходимости создания различных подходов для описания данных процессов, а также к применению ряда мер по снижению влияния радона.

Пути проникновения радона в здание могут стать практически любые разуплотнения в оболочке здания, расположенные ниже уровня земли: трещины в перекрытиях, открытые участки массива горных пород в подвальном помещении или подпольном пространстве, вводы труб и коммуникаций, стыки между плитами и блоками и т.д. Поэтому можно утверждать, что при проектировании против радоновой защиты нужно учитывать все факторы и подходить к выбору метода исходя из требований и условий каждого здания в отдельности [2].

При рассмотрении диффузионного механизма поступления радона в помещение и его эманаций из строительных материалов [5] использовалась более простая модель описания механизма поступления, но в [1] указывается на то, что прямое применение соотношений, предложенных в [5] затруднено в случае оценки комплексного поступления радона в здание. Для описания диффузионного механизма поступления радона рассмотрим модель, предлагаемую в [1].

По данным [1] предположим равномерное распределение  $^{226}\text{Ra}$  или  $^{224}\text{Ra}$  в материале строительной конструкции (стене, плите перекрытия), а также однородность ее структуры. Для описания процессов диффузионного поступления радона из горных пород в здание необходимо адекватно представлять модель, отражающую распределение концентрации радона в грунтовой атмосфере около фундамента здания и под ним. Для оценки распределения концентрации радона в массиве горных пород под зданием вся область фундамента разделяется на две области (рис. 2) [6].



Рис. 2. Диффузионное поступление радона [6]

*Область 1* включает в себя массив горных пород, непосредственно примыкающий к боковой стене фундамента здания. К *Области 2* относится плита фундамента и расположенный под ней грунт. Для каждой из этих областей предполагается, что

- массив горных пород однороден;
- перенос радона через горный массив осуществляется только в вертикальном направлении;
- перенос радона обусловлен только диффузией;
- концентрация радона в грунтовом воздухе не зависит от времени.

Так как твердый бетон практически непроницаем для газов, проникновение газа происходит через трещины, промежутки и другие разуплотнения. Наибольшие промежутки наблюдаются возле мест контакта с инженерными коммуникациями, сервисных отверстий и по периметру монолитной плиты. Важность снижения количества и размеров трещин приводит к уменьшению поступления радона [7].

Основными причинами, оказывающими влияние на конвективный механизм поступления радона в здания, являются следующие:

- погодные эффекты [8];
- особенности конструкции здания;
- деятельность лиц, проживающих в здании.

Низкая температура наружного воздуха является одной из важнейших причин, приводящих к возникновению отрицательной разности давлений между зданием и наружной атмосферой. Поскольку температура воздуха в помещении выше, чем снаружи, возникает подъемная сила, приводящая к движению воздуха в верхнюю часть здания. Чем ниже температура вне здания, тем выше подъемная сила воздуха внутри. Теплый воздух утекает из здания (происходит эксфильтрация) через открытые участки в верхней части оболочки здания – окна, щели, необогреваемое чердачное помещение. Чтобы компенсировать эту потерю воздуха, наружный воздух натекает (происходит инфильтрация) в здание через окна и двери, расположенные в нижней части здания. Отчасти эксфильтрация теплого воздуха из здания компенсируется и натеканием почвенного воздуха через неплотности в фундаменте. Объем почвенного воздуха в общем объеме, поступающем в результате инфильтрации, относительно невелик, но именно с ним и проникает основное количество радона.

Поэтому закрытое здание можно рассмотреть как печную трубу.

Полностью исключить стек-эффект невозможно, но уменьшить его можно. Так, например, уменьшение эксфильтрации теплого воздуха из здания приводит к уменьшению инфильтрации воздуха из массива горных пород, обогащенного радоном.

Другой вариант борьбы со стек-эффектом – это уменьшение количества отверстий здания, расположенных выше нейтрального уровня.

Нейтральный уровень (плоскость) – это уровень, на котором давление снаружи здания и внутри него равны [1].

Максимальное сокращение таких отверстий и их площади также приводит к уменьшению стек-эффекта. В частности, внешняя герметизация здания позволяет практически полностью исключить данный эффект.

Герметизация оболочки здания также способствует уменьшению разности давлений, создаваемых ветровыми потоками.

Уменьшению восходящих потоков воздуха в здании может также способствовать уменьшение воздушных потоков между этажами. Установка дверей на лестничных пролетах или даже устройств для автоматического закрывания дверей может заметно повлиять на радоновую обстановку, например, в двухэтажном коттедже. Для многоэтажных зданий, имеющих сплошные лестничные пролеты и зачастую лифтовые шахты, создание внутренних барьеров, препятствующих конвективному движению воздуха внутри здания, затруднительно.

Деятельность лиц, проживающих непосредственно в здании, также влияет на его радоновую безопасность. Использование различных отопительных и вентиляционных устройств приводит к созданию отрицательной разности давлений. Бытовые кухонные вытяжные системы работают только в вытяжном режиме, что также приводит к дополнительной инфильтрации грунтового воздуха, обогащенного радоном. Все бытовые причины носят временный характер, поэтому учесть их чрезвычайно трудно.

#### Заключение

Присутствие радона в жилых и служебных помещениях представляет серьезную проблему, так как существенный ущерб коллективному здоровью населения достигается крайне малыми концентрациями этого радиоактивного газа. Содержание радона в воздухе помещений ограничивается на законодательном уровне. Рекомендациями международных организаций (МАГАТЭ, ВОЗ, Международная комиссия по радиологической защите) устанавливаются приемлемые дозы облучения радоном, на основании которых каждое государство утверждает собственные национальные контрольные уровни. Обеспечение непревышения законодательно закрепленных уровней радона в воздухе помещений возможно только за счет ограничения его поступления из основного источника. В подавляющем большинстве случаев таким источником выступает грунт под зданием. Уровни радона в помещениях нижнего этажа на 90 % формируются за счет его поступления из грунта в основании здания [9].

На основе упрощенной диффузионной модели исследован процесс переноса радона сквозь конструкции посредством диффузии. По результатам исследований диффузионный механизм является доминирующим. А в зданиях для определения поступления радона в конструкции с малым сопротивлением радона прониканию необходима конвективно-диффузионная модель, при проницаемости слоев  $10^{-10}$  м диффузионной составляющей пренебрегают [12].

#### Список литературы

1. Жуковский М.В., Кружалов А.В., Гурвич В.Б., Ярмошенко И.В., 2000. *Радоновая безопасность зданий*. Екатеринбург: УрО РАН, Институт промышленной экологии, 179 с.
2. Климшин А. В., Глазачев И. В., 2011. *Автоматизированная система снижения уровня радона в помещении*. Патент на полезную модель. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0000111661\\_20111220\\_U1\\_RU/?ysclid=lef639jb6e511553498](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000111661_20111220_U1_RU/?ysclid=lef639jb6e511553498) (дата обращения 22.02.2023)
3. *Radon research in multi disciplines: A REVIEW*, Session 2, January 18, 2007 URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.208.4232&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 12.02.2023)
4. *Инженерно-экологические изыскания для строительства*. СП 11-102-97. М., 1997. URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001220?ysclid=le6rv2lelf993688229> (дата обращения 11.02.2023)
5. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В., 1997. *Радон: измерение, дозы, оценка риска*. Екатеринбург: УрО РАН, Институт промышленной экологии, 230 с.
6. Riley W.J., Robinson A.L., Gadgil A.J., Nazaro W.W., 1998. *Effects of variable wind speed and direction on radon transport from soil into buildings: model development and exploratory results*, Received 9 June 1998; accepted 14 October
7. Allen L. Robinson and Richard G. Sextro, 1995. *The influence of a subslab layer and open area on soil-gas and radon entry into two experimental basements*, September.
8. Robert K., Paul N., 2009. *A living radon reference manual*, US, September. URL: [https://aarst.org/proceedings/2009/A\\_LIVING\\_RADON\\_REFERENCE\\_MANUAL.pdf](https://aarst.org/proceedings/2009/A_LIVING_RADON_REFERENCE_MANUAL.pdf) (дата обращения 8.02.2023)
9. Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н., 2021. Оценка вкладов диффузионного и конвективного поступления радона в здания. *Жилищное строительство*, № 7, С. 48 – 54.

10. Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н., 2021. Обеспечение приемлемых уровней облучения радоном в зданиях пассивными радонозащитными технологиями. *БСТ: Бюллетень строительной техники*, № 6 (1042), С. 20 – 22.

11. Матецкая Л.С., Конев И.Н., 2017. Радиация и здоровье. *Избранные доклады 63-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых учёных, Томск, 20 апреля 2017 года*. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, С. 697 – 700.

12. Бакаева Н.В., Калайдо А.В., 2017. Условия диффузионного поступления радона в здания и сооружения. *Современная наука и инновации*, № 2(18), С. 141 – 145.

### References

1. Zhukovskij M.V., Kruzhalov A.V., Gurvich V.B., Yarmoshenko I.V., 2000. Radonovaya bezopasnost' zdaniy [Radon safety of buildings]. Ekaterinburg: UrO RAN, Institut promyshlennoj jekologii, 179 p.

2. Klimshin A.V., Glazachev I.V., 2011. Avtomatizirovannaya sistema snizheniya urovnya radona v pomeshhenii [Automated radon reduction system in the room]. Patent na poleznu model'. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0000111661\\_20111220\\_U1\\_RU/?ysclid=lef639jb6e511553498](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000111661_20111220_U1_RU/?ysclid=lef639jb6e511553498) (data obrashheniya 22.02.2023)

3. *Radon research in multi disciplines: A REVIEW*, Session 2, January 18, 2007 URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.208.4232&rep=rep1&type=pdf> (data obrashheniya 12.02.2023)

4. Inzhenerno-jekologicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva [Engineering and environmental surveys for construction]. SP 11-102-97. M., 1997. URL: <https://docs.cntd.ru/document/871001220?ysclid=le6rv21elf993688229> (data obrashheniya 11.02.2023)

5. Zhukovskij M.V., Yarmoshenko I.V., 1997. Radon: izmerenie, dozy, ocenka riska [Radon: measurement, dose, risk assessment]. Ekaterinburg: UrO RAN, Institut promyshlennoj jekologii, 230 p.

6. Riley W.J., Robinson A.L., Gadgil A.J., Nazaro W.W., 1998. *Effects of variable wind speed and direction on radon transport from soil into buildings: model development and exploratory results*, Received 9 June 1998; accepted 14 October

7. Allen L. Robinson and Richard G. Sextro, 1995. *The influence of a subslab layer and open area on soil-gas and radon entry into two experimental basement*, September.

8. Robert K., Paul N., 2009. *A living radon reference manual*, US, September. URL: [https://aarst.org/proceedings/2009/A\\_LIVING\\_RADON\\_REFERENCE\\_MANUAL.pdf](https://aarst.org/proceedings/2009/A_LIVING_RADON_REFERENCE_MANUAL.pdf) (data obrashheniya 8.02.2023)

9. Kalajdo A.V., Rimshin V.I., Semenova M.N., 2021. Ocenka vkladov diffuzionnogo i konvektivnogo postupleniya radona v zdaniya [Assessment of the contributions of diffusive and convective radon intake into buildings]. *Zhilishhnoe stroitel'stvo*, № 7, P. 48 – 54.

10. Kalajdo A.V. Rimshin V.I., Semenova M.N., 2021. Obespechenie priemlemyh urovnej oblucheniya radonom v zdaniyah passivnymi radonozashhitnymi tehnologiyami [Ensuring acceptable levels of radon irradiation in buildings with passive radon-protective technologies]. *BST: Blliten' stroitel'noj tehniki*, № 6 (1042), P. 20 – 22.

11. Mатецкая Л.С., Конев И.Н., 2017. Радиация и здорov'e [Radiation and health]. *Избранные доклады 63-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых учюных* [Ensuring acceptable levels of radon irradiation in buildings with passive radon-protective technologies], Томск, 20 апреля 2017 года. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, P. 697 – 700.

12. Бакаева Н.В., Калайдо А.В., 2017. Usloviia diffuzionnogo postupleniia radona v zdaniia i sooruzheniia [Conditions for the diffusion of radon into buildings and structures]. *Sovremennaia nauka i innovatsii*, № 2(18), P. 141 – 145.