

## Выявление опасных участков на основе исследования развития техногенных трещин в толще слагающих массив пород

Е.С. Жерлыгина, М.Е. Куранова, В.Н. Гусев, Е.Е. Одинцов✉

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ odintsovgeorge@gmail.com

**Резюме:** В статье приведены данные о рисках отсутствия регулярного мониторинга опасных участков по образованию техногенных трещин. Изложены особенности геологического строения массива месторождения первично и повторно подрабатываемых пород, а также закономерности развития опасных техногенных трещин. Обоснована зависимость высоты развития зоны водопроводящих трещин от суммарной мощности последовательно вынимаемых пластов свиты. Установлено, что данные параметры связаны экспоненциальной функцией, адаптируемой под особенности горно-геологических условий. Представлено, как использование данной зависимости позволяет выявлять опасные участки развития водопроводящих техногенных трещин. Разработанный подход дает возможность оперативного применения мер охраны, обеспечивает безопасное управление кровлей массива горных пород, а также позволяет прогнозировать размеры зон техногенной трещиноватости. Результаты исследования могут быть полезными при необходимости оценки высоты развития техногенных трещин и в частных случаях для уточнения необходимости соблюдения параметра безопасной глубины, требующей оставления весьма большого запаса полезного ископаемого в охранных целиках. Описанный подход по выявлению опасных участков может быть распространен на другие месторождения полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** геомеханическая безопасность, горные работы, опасные участки, зоны водопроводящих трещин, состояние массива, безопасное производство

**Для цитирования:** Жерлыгина Е.С., Куранова М.Е., Гусев В.Н., Одинцов Е.Е. Выявление опасных участков на основе исследования развития техногенных трещин в толще слагающих массив пород. *Горная промышленность*. 2025;(1):162–169. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>

## Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass

E.S. Zherlygina, M.E. Kuranova, V.N. Gusev, E.E. Odintsov✉

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ odintsovgeorge@gmail.com

**Abstract:** The article presents information on the risks of failing to have regular monitoring of areas subject to the formation of man-made fractures. Specific features in the geological structure of the primary and repeatedly undermined rock masses, as well as regularities in development of hazardous man-made fractures are described. The dependence has been justified between the height of water-conducting fracture zone and the total thickness of the successively mined formations of the geological series. It has been established that these parameters are related by an exponential function that can be adapted to the specific characteristics of the mining and geological conditions. The use of this dependence is demonstrated to help in identifying hazardous areas where man-made water-conducting fractures are developing. The developed approach makes it possible to promptly implement protection measures, provides safe management of the upper contact of the bedrock, and allows predicting the size of the man-made fracture zones. The results of the study can be useful in assessing the height of the man-made fracture development zone and in particular cases to clarify the need to comply with the safe depth parameter, which requires leaving a considerably large reserves of minerals in the safety pillars. The described approach to identifying hazardous areas can be extended to other mineral deposits.

**Keywords:** geomechanical safety, mining operations, hazardous areas, water-conducting fracture zones, rock mass condition, safe operation

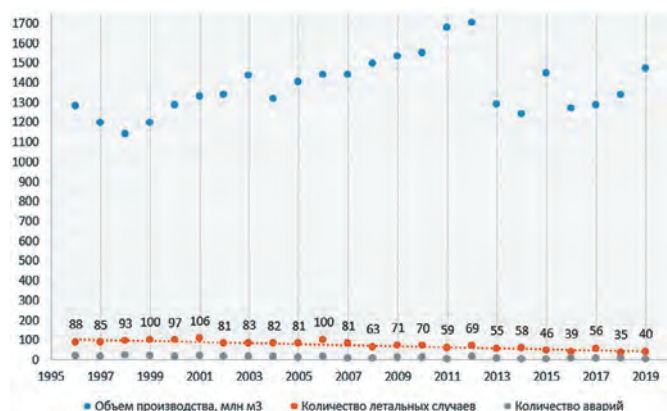
**For citation:** Zherlygina E.S., Kuranova M.E., Gusev V.N., Odintsov E.E. Identification of hazardous sites based on studying the development of man-made fractures within the rock mass. *Russian Mining Industry*. 2025;(1):162–169. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1-162-169>

## Введение

Добыча полезных ископаемых является ресурсным фундаментом государства, формирующим условия структурного формирования экономики. Отрасль горнодобывающей промышленности входит в основные экономические показатели в России и формирует около 12% ВВП. Горнодобывающий сектор России представлен более чем двадцатью тысячами месторождений. По мере отработки месторождений происходит наибольшее количество аварий и случаев травмирования персонала в результате обрушений, динамических заколообразований, горных и горнотектонических ударов. На рис. 1 приведена динамика добычи, составленная на основе годовых отчетов о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [1].

В приведенных данных – 10% от общего числа летальных исходов составляют случаи, возникшие ввиду нарушений управления кровлей массива, а также отсутствия мониторинга опасных участков по прорыву воды в горные выработки [2].

Добыча полезных ископаемых посредством подземной разработки крупных месторождений руд и угля в больших объемах вызывает изменения в геомеханическом состоянии горного массива, приводящие к развитию опасных геодинамических явлений, характеризующихся высокой скоростью протекания, значительным масштабом проявления и способностью нанести серьезный ущерб производственной инфраструктуре. Вероятность возникновения и интенсивность проявления пагубных явлений тесно связаны с характером геологического строения месторождения, горнотехническими условиями отработки, глубиной ведения работ, а также применяемыми технологиями.



**Рис. 1**  
Динамика добычи по годовым отчетам о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору 1996–2019 гг.

Источник: [1]

**Fig. 1**  
Production dynamics based on annual reports on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological, and Nuclear Supervision of the Russian Federation for 1996–2019

Source: [1]

Извлечение полезного ископаемого различными способами: подземным, открытым или комбинированным – предполагает нарушение целостности массива горных пород и влечет за собой изменение его напряженно-деформированного состояния. Деформационные процессы, протекающие в зонах ведения горных работ, повышают вероятность образования трещин в момент превышения предела прочности пород на разрыв, возникновения горно-

зонтальных деформаций при изгибе слоя залегания пород, что влечет за собой опасность возникновения процессов разрушения, вывод из строя горного оборудования, травматизм и гибель персонала. Данный факт усугубляется наличием водопритока и его неконтролируемым приростом, поэтому необходимо учитывать степень водоносности пород, мощность и число водоносных горизонтов и связь подземных вод.

При подземной отработке месторождений большой мощности существует опасность выхода зон водопроводящих трещин на поверхность. Развитие зон водопроводящих трещин связано с деформационными процессами. Выявление зависимости между геомеханическими параметрами, влияющими на безопасное ведение горных работ, является одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники согласно данным о рациональном недропользовании и соответствует критическому направлению «технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи».

Для обеспечения безопасной эксплуатации месторождения осуществляются научные исследования: геодинамические, геофизические и маркшейдерские изыскания. Кроме того, широко распространен подход, включающий мониторинг сдвижений пород массива и профильных линий поверхности путем инструментальных методов наблюдения [3–5]. По результатам изысканий вырабатывается подход к обеспечению безопасности рудников от частичного или полного затопления, а также зданий и объектов поверхности, подверженных пагубному воздействию на конструктивные и несущие способности конструкций в результате ведения горных работ.

Серьезное нарушение правил охраны и безопасности при ведении горных работ зафиксировано на месторождении калийных солей на руднике Березниковского рудоуправления №1 ОАО «Уралкалий»: отсутствие своевременных мер по предотвращению притока воды в горные выработки 17 октября 2006 г. привело к неконтролируемому притоку рассолов, который сопровождался кратным увеличением содержания сероводорода в выработках. В результате сложившейся ситуации руководством рудника принято решение полностью остановить работы на руднике данного рудоуправления и вывести людей на поверхность. Использованные способы по откачке поступивших рассолов не принесли должных результатов – приток стал неконтролируемым. Рудник был законсервирован [6]. Подобная негативная ситуация с неконтролируемым прорывом воды в горные выработки сложилась в 2021 г. на руднике «Октябрьский» [7], что подтверждает необходимость своевременной идентификации опасных по прорыву воды участков вблизи ведения горных работ.

Целью исследования является разработка способов для выявления опасных участков по прорыву воды в горные выработки на основе исследования развития трещин в первично и повторно подрабатываемом массиве горных пород.

## Материалы и методы

Для оценки горно-геологических условий залегания на примере месторождения калийных солей рассмотрим геологические разрезы, составленные по данным геотехнических скважин, представленные на рис. 2 и 3, где зеленым цветом обозначены пласты, планируемые к отработке, светло-синим контуром – нижняя граница водоносного горизонта.



Рис. 2  
Схема расположения пластов полезного ископаемого по данным скважин «well N°1» и «well N°2»

Fig. 2  
Layout of the useful mineral beds based on borehole data from “well No.1” and “well No.2”



Рис. 3  
Схема расположения пластов полезного ископаемого по данным скважин «well N°3» и «well N°4»

Fig. 3  
Layout of the useful mineral beds based on borehole data from “well No.3” and “well No.4”

Исходя из схем на рис. 2 и 3 установлена характерная структурная особенность представленных участков:

$$\sum M = \sum m_i + \sum h_i \tag{1}$$

где  $\sum M$  – сумма всех продуктивных пластов и пластов вмещающей породы;  $\sum m_i$  – сумма добычных пластов свиты;  $\sum h_i$  – сумма пластов вмещающей породы.

При этом геологическое строение массива в месте разреза весьма неоднородно по мощности представленных пластов, и вблизи скважины well N°4 заметна уникальная структура залегания толщи слоев породного массива, когда пласт полезного ископаемого имеет в разы большую мощность, чем мощность водозащитной толщи – расстояние между верхней границей пласта отработки и нижней границей водоносного горизонта.

Данное месторождение имеет сложные условия подработки ввиду наличия водного объекта (водоносного горизонта) в непосредственной близости от зоны ведения горных работ. В разрезе представлены свиты пластов. При выемке пласта мощностью  $m_1$  образуется высота развития зоны водопроводящих трещин  $H_{T1}$ . Зона трещин распространяется до слоя с граничной кривизной  $K_r$  [3] и запишется следующим образом:

$$K_r = \frac{4m_1}{H_{T1}^2} \tag{2}$$

При этом  $K_r = 0,8e^A \cdot 10^{-3}$ , где  $e$  – основание натурального логарифма;

$A$  – содержание пород глинистого состава.

При последующей выемке второго пласта свиты мощ-

ностью  $m_2$  слой массива, имеющий граничные значения кривизны, переместится вверх по нормали относительно зоны выемки. Значение граничной кривизны при этом возрастет:

$$K_r = \frac{4m_1}{H_{T2}^2} + \frac{4 \cdot c \cdot a_2 \cdot m_2}{(H_{T2} + h_1)^2} \tag{3}$$

где  $h_1$  – это мощность пласта вмещающей породы между первым и вторым добычным пластом свиты;  $H_{T2}$  – высота развития зоны трещин;  $m_2$  – мощность второго пласта свиты. При этом  $c$  – здесь и далее коэффициент, учитывающий влияние на распределение кривизны в слоях повторно подработанного массива (согласно [ПБ 07-269-98, стр. 69] коэффициент принимается 0,4);  $a_i = q_i/q_1$  – здесь и далее коэффициент, учитывающий активизацию процесса сдвижения при повторной подработке водного объекта, где  $q_i$  – относительное максимальное оседание при выемке  $i$ -го пласта свиты;  $q_1$  – то же, при выемке верхнего (первого) пласта свиты.

Таким образом, при выемке третьего пласта свиты слой с граничной кривизной переместится еще выше по вертикали от выемочной зоны. Значение кривизны составит:

$$K_r = \frac{4m_1}{H_{T3}^2} + \frac{4 \cdot c \cdot a_2 \cdot m_2}{(H_{T3} + h_1)^2} + \frac{4 \cdot c \cdot a_3 \cdot m_3}{(H_{T3} + h_1 + h_2)^2} \tag{4}$$

где  $h_2$  – это мощность пласта вмещающей породы между вторым и третьим добычным пластом свиты;  $H_{T3}$  – высота развития зоны трещин;  $m_3$  – мощность третьего пласта свиты.

Таким образом, при выемке четвертого пласта свиты граничная кривизна слоя составит:

$$K_r = \frac{4m_1}{H_{T4}^2} + \frac{4 \sum_{i=2}^{4-1} c \cdot a_i \cdot m_i}{(H_{T4} + \sum_{i=2}^{4-1} h_{i-1})^2} \tag{5}$$

где  $h_{i-1}$  – это мощность пласта вмещающей породы между  $i$ -м и  $i-1$ -м добычным пластом свиты;  $H_{T4}$  – высота развития зоны трещин;  $m_i$  – мощность  $i$ -го пласта свиты.

По результатам первичной обработки геотехнических данных, уточнив граничную кривизну и мощность отработки добычного пласта, возможно оценить геометрию опасной зоны трещиноватости. При этом очевидно, что главным условием безопасной подработки водозащитной толщи является соблюдение равенства  $H_T \leq H$ , где  $H_T$  – высота распространения зоны водопроводящих трещин, а  $H$  – расстояние по вертикали от разрабатываемого пласта до почвы водного объекта.

Формулы расчета высоты развития зоны водопроводящих трещин из выражений (2)–(5) составят, м:

$$H_{T1} = 2\sqrt{m_1/K_r} \tag{6}$$

$$H_{T2} = 2\sqrt{(m_1 + c \cdot a_2 \cdot m_2)/K_r} \tag{7}$$

$$H_{T3} = 2\sqrt{(m_1 + c \cdot a_2 \cdot m_2 + c \cdot a_3 \cdot m_3)/K_r} \tag{8}$$

$$H_{T4} = 2\sqrt{(m_1 + \sum_{i=2}^{4-1} c \cdot a_i \cdot h_{i-1})/K_r} \tag{9}$$

В выражениях (6)–(9) значения высоты развития зоны трещиноватости рассчитываются от кровли первого пласта свиты и откладываются вверх по вертикали.

### Результаты

Определим зависимость высоты зоны водопроводящих трещин в данных горно-геологических условиях от мощности добычных пластов. Для этого установим значение граничной кривизны  $K_r$  верхней границы зоны трещино-

ватости из выражения (2). Учтем, что содержание пород глинистого состава согласно полученным данным геотехнического описания скважин для заданных условий залегаания составляет 0,9, тогда граничную кривизну определим следующим образом:

$$K_r = 0,8e^A \cdot 10^{-3} = 0,8 \cdot 2,71^{0,9} \cdot 10^{-3} = 1,962 \cdot 10^{-3} [1/м]. \quad (10)$$

Вычислим коэффициент, учитывающий активизацию процесса сдвижения при повторной подработке водного объекта, согласно [3]:

$$a_2 = a_3 = a_4 = \frac{q_2}{q_1} = \frac{0,9}{0,8} = 1,125. \quad (11)$$

На основе выражений (7)–(10) получим зависимость высоты распространения зоны водопроводящих трещин от мощности добычных пластов:  $m_1=5$  м,  $m_2=3,5$  м,  $m_3=30$  м,  $m_4=4,3$  м, представленную на рис. 4.

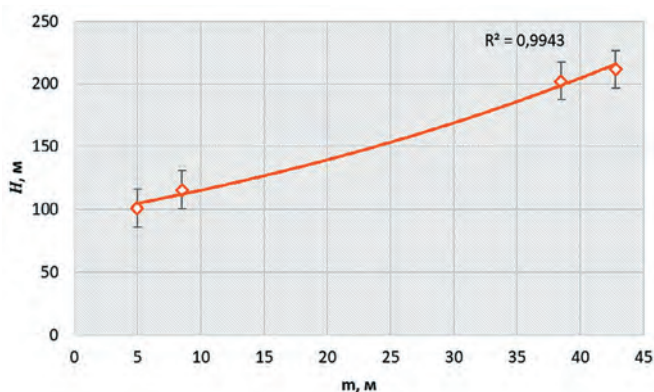


Рис. 4  
График зависимости высоты распространения ЗВТ от мощности пластов

Fig. 4  
A dependence graph between the height of the water-conducting fracture zone and the thickness of beds

В общем виде линия тренда на графике представляет собой экспоненциальную зависимость с нормальной точностью аппроксимации. Зависимость выражается следующим образом:

$$H_T = 95 \cdot e^{0,02 \cdot m}, \quad (12)$$

где  $H_T$  – высота распространения зоны водопроводящих трещин над кровлей выемочного пласта;  $m$  – суммарная мощность пластов при последовательной разработке свиты, начиная с верхнего пласта.

На рис. 4 учтена погрешность неточности расчетного местоположения зоны трещин, а также неполной изученности геологической ситуации внутри сетки скважин. Величина данной погрешности принята 15 м.

### Обсуждение результатов

Представленная закономерность (12) для данных горно-геологических условий может быть использована для прогнозирования развития высоты зон трещин и определения опасных участков по прорыву воды в горные выработки.

В дальнейшем исследование возможно произвести по участкам разрезов с различными содержаниями пород глинистого состава, выполнив расчеты по формулам

(2)–(11) для получения данных о развитии ЗВТ по всем планируемым к разработке участкам шахтного поля и зависимостей, аналогичных (12).

С учетом данных геотехнического опробования и зная мощность водозащитной толщи, путем сопоставления ее с расчетными значениями высоты зоны водопроводящих трещин возможно определить опасные участки по прорывам воды в выработки. Данные об опасных участках позволят своевременно применить горные меры охраны с возможностью закладки выработанного пространства. При частичной выемке запасов с закладкой выемочного пространства коэффициент уменьшения деформаций может достигать 0,3, то есть снизит деформации в три раза. Соответственно, на тот же порядок может снизиться высота распространения ЗВТ, поскольку ее развитие функционально связано с деформациями. Для конкретных горно-геологических условий и конкретного применения различных закладочных материалов, используя формулы (6)–(9), можно получить наиболее приемлемый вариант уменьшения высоты распространения ЗВТ, при котором обеспечиваются максимально возможные извлечение полезных ископаемых под водным объектом и безопасность ведения горных работ.

Вопросы безопасности разработки крупных месторождений под водными объектами, например, реками и озерами, а также под существенными по мощности водоносными горизонтами актуальны для многих отечественных и зарубежных горнодобывающих предприятий до сих пор.

Гидрогеологические условия оказывают значительное влияние на безопасность и технологию освоения подземных проектов, преимущественно влияя на приток воды в шахты и туннели. Месторождения богатых железных руд в районе Курской магнитной аномалии, в частности Яковлевское, расположены и разрабатываются в сложных горно-геологических условиях. Ведение горных работ в данном районе обусловлено наличием нескольких водоносных горизонтов с критично малой удаленностью над выемочным пространством.

В Великобритании, например, разведка лавовых месторождений ведется вблизи озер, кроме того, иногда подземные выработки простираются на значительные расстояния от морского берега. Аналогичные примеры можно найти в Австралии, Канаде и Японии [8].

В СССР также было множество схожих по сложности работ, главным образом подземных, вблизи водных объектов. Большой накопленный опыт таких работ применялся в угольных бассейнах в районе Челябинска, Буланаша, Печоры, Донецка, Кузнецка, Караганды и Кизеловска [8].

Обязательным условием для безопасного ведения работ под водными объектами является необходимость точного определения значения безопасной глубины – критически важного параметра, неверное определение которого повлечет за собой непредсказуемые пагубные последствия. Изрядно завышенный запас безопасной глубины способен привести к экономически неэффективной добыче. Однако неверное определение безопасной глубины может привести к формированию потенциально опасной гидравлической связи между водным объектом и зоной подземных работ [8]. Это может привести к быстрому затоплению выработок и серьезным повреждениям самого водного объекта. Большой объем натуральных данных позволил статистически оценить безопасную глубину ведения работ, выявить связи между ней и характеристиками месторождения, а также зоной разработки исходя из извлеченной мощно-

сти. Общая зависимость представлена в виде:

$$H_{\sigma} = K_{\sigma} \cdot m, \quad (13)$$

где  $m$  – вынимаемая мощность пласта, а  $K_{\sigma}$  – коэффициент безопасности, определенный на основе статистических данных.

Основным параметром, однозначно характеризующим безопасность глубины проведения подземных горных работ под водными объектами, является высота зоны водопроводящих трещин, в которой расположены горные породы с нормальносекущими слой трещинами. Данные трещины могут являться связующим звеном между водным объектом и выемочным пространством, что способно привести к пагубным последствиям. Таким образом, параметр безопасной глубины разработки представляет собой наименьшую глубину, при которой нормальносекущие трещины ЗВТ не достигают нижней границы водного объекта.

Изучение процессов образования зон водопроводящих трещин уже долгое время является важной задачей. Работы многих авторов тому подтверждение [9–12]. Для отображения сути физико-механических явлений, происходящих в среде, используются физические модели месторождения, а также модели механики сплошных и дискретных сред [13–15]. Такой подход в том числе позволяет описать процессы распространения зоны водопроводящих трещин с учетом реологии горных пород. На основе физико-механических свойств горного массива [16–18], определенных путём проведения лабораторных испытаний, натуральных наблюдений и численного моделирования [18–20], выполняется обоснование модели среды и её параметров для рассматриваемых горно-геологических условий [21–23].

Для уточнения параметров местоположения ЗВТ на многих месторождениях применяются методы гидрогеологического [24–26] и инструментального мониторинга [27–29]. К первым относятся метод наблюдения за напорами в подработанных слоях, метод сравнения удельных водопоглощений в подработанных слоях до и после их подработки, метод расходомерического каротажа скважин в подработанном массиве, метод наблюдений за поровым давлением [30–32]. Данные методы основаны на натурном измерении свойств и давлений в массиве. К их существенным недостаткам следует отнести высокие экономические затраты, связанные с необходимостью бурения дополнительных скважин для реализации инструментального подхода к натурным наблюдениям.

Способ определения ЗВТ, приведенный в данной работе, позволяет снизить затраты на проведение геомеханиче-

ского мониторинга, а также спрогнозировать путем математического моделирования местоположение и параметры данной зоны с учетом планов развития горных работ в районах со сложной горно-геологической ситуацией, включая районы возможной близости городской черты [33–35], что является несомненным преимуществом [36]. Кроме того, обнаружение новых нестандартных горно-геологических ситуаций, в том числе приведенных в данной работе, делают подобные исследования актуальными и позволяют накопить опыт работы на месторождениях с различными характеристиками, что в дальнейшем упростит адаптацию приведенной закономерности к индивидуальным особенностям ведения горных работ.

## Выводы

Исходя из анализа данных графика, представленного на рис. 1, установлено, что почти каждый десятый случай летального травматизма вызван нарушениями управления кровлей массива, а также отсутствием мониторинга опасных участков по прорыву воды в горные выработки. В связи с этим актуальным направлением исследования является разработка способов выявления опасных участков на основе исследования механизма развития техногенных трещин, включая водопроводящие.

На основе данных о горно-геологических условиях залегания месторождения установлена зависимость (12), позволяющая оценить высоту развития зоны трещин и выявить опасные участки по прорывам воды. Данные участки идентифицируются путем сравнения высоты зоны водопроводящих трещин и мощности водозащитной толщи. В местах, где мощность водозащитной толщи меньше, чем высота ЗВТ, участки опасны по прорыву воды в горные выработки и требуют дополнительных мер охраны.

Подход, рассмотренный в работе, позволяет провести независимую оценку целесообразности использования данных расчетов безопасной глубины (13) при планировании горных работ. В частности, подход представляет альтернативу данному способу, позволяя точно оценить высоту развития трещин и в частных случаях уточнить необходимость соблюдения безопасной глубины, требующей оставления весьма большого запаса полезного ископаемого в охранных целиках.

Представленная работа демонстрирует подход по выявлению опасных участков в толще пород массива в непосредственной близости от зон ведения горных работ, который может быть распространен на другие месторождения полезных ископаемых.

## Вклад авторов

**Е.С. Жерлыгина** – концептуализация статьи, подготовка методологии проверки данных, постановка задачи исследования.

**М.Е. Куранова** – анализ результатов исследования, поиск и подготовка исходных данных.

**В.Н. Гусев** – генерация идеи исследования.

**Е.Е. Одинцов** – выполнение научного обзора современных методов оценки влияния геомеханических параметров, написание и редактирование текста статьи.

## Authors' contribution

**E.S. Zherlygina** – designing the concept of the article; preparation of the methodology for data verification; setting of the research problem.

**M.E. Kuranova** – analysis of the research results; search and preparation of the initial data.

**V.N. Gusev** – generation of the research idea.

**E.E. Odintsov** – implementation of scientific review of modern methods to assess the impact of geomechanical parameters; writing and editing the text of the article.

Список литературы / References

1. Ломов М.А. Аварии в горной промышленности в России, произошедшие вследствие динамических проявлений в горном массиве. контроль горного давления на месторождении «Южное» (Приморский край). *Проблемы недропользования*. 2023;(1):85–92. <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.085>  
Lomov M.A. 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 kraj). *Problems of Subsoil Use*. 2023;(1):85–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2023.01.085>
2. Зимин И.И. Обеспечение геодинамической безопасности при реализации проектов по консервации (ликвидации) угольных шахт. *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2015;(2):327–330.  
Zimin I.I. Ensuring geodynamic safety in implementation of coal mine conservation (abandonment) projects. *Naukoemkie Tekhnologii Razrabotki i Ispolzovaniya Mineralnykh Resursov*. 2015;(2):327–330. (In Russ.)
3. Gusev V.N., Maliukhna E.M., Volohov E.M., Tulenev M.A., Gubin M.Y. Assessment of development of water conducting fractures zone in the massif over crown of arch of tunneling (construction). *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019;10(2):635–643.
4. Шабаров А.Н., Куранов А.Д. Основные направления развития горнодобывающей отрасли в усложняющихся горнотехнических условиях ведения горных работ. *Горный журнал*. 2023;(5):5–10. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.01>  
Shabarov A.N., Kuranov A.D. Basic development trends in mining sector in complicating geotechnical conditions. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(5):5–10. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.01>
5. Ju M., Wang D., Shi J., Li J., Yao Q., Li X. Physical and numerical investigations of bedding adhesion strength on stratified rock roof fracture with longwall coal mining. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2021;7:24. <https://doi.org/10.1007/s40948-020-00209-2>
6. Соловьев С.В., Кузиев Д.А. Исследование жесткостных параметров привода тягового механизма драглайна ЭШ-10/70. *Уголь*. 2017;(1):37–38. Режим доступа: <https://ugolinfo.ru/index.php?article=201701037> (дата обращения: 01.12.2024).  
Soloviev S.V., Kuziev D.A. Dragline ESH-10/70 linkage stiffness parameters study. *Ugol'*. 2017;(1):37–38. (In Russ.) Available at: <https://ugolinfo.ru/index.php?article=201701037> (accessed: 01.12.2024).
7. Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Создание закладочного композита на основе отходов угольной промышленности. *Уголь*. 2024;(10):24–27. Режим доступа: <https://ugolinfo.ru/index.php?article=202410024> (дата обращения: 01.12.2024).  
Tyulyaeva Yu.S., Khayrutdinov A.M. Creation of a backfill composite based on coal industry waste. *Ugol'*. 2024;(10):24–27. (In Russ.) Available at: <https://ugolinfo.ru/index.php?article=202410024> (accessed: 01.12.2024).
8. Илюхин Д.А. Прогноз развития зоны водопродящих трещин при разработке Яковлевского месторождения богатых железных руд: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.; 2014. 125 с.
9. Господариков А.П., Киркин А.П., Трофимов А.В., Ковалевский В.Н. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий. *Горный журнал*. 2023;(1):26–34. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.04>  
Gospodarikov A.P., Kirkin A.P., Trofimov A.V., Kovalevsky V.N. Determination of physical and mechanical properties of rocks using anti-burst destress measures. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(1):26–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.01.04>
10. Протосеня А. Г., Веселова А. В., Котиков Д. А. Оценка концентрации напряжений вблизи карстовых полостей при разработке рудных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(2):5–22. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_2\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_2_0_5)  
Protosenya A. G., Veselova A. V., Kotikov D. A. Assessment of stress concentration in neighborhood of karst voids during ore mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(2):5–22. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_2\\_0\\_5](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_2_0_5)
11. Барях А.А., Девятков С.Ю., Денкевич Э.Т. Математическое моделирование развития процесса сдвижения при разработке калийных руд длинными очистными забоями. *Записки Горного института*. 2023;259:13–20. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.11>  
Baryakh A.A., Devyatkov S.Y., Denkevich E.T. Mathematical modelling of displacement during the potash ores mining by longwall faces. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:13–20. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.11>
12. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Выемочно-погрузочный драглайн с ковшом инновационной конструкции. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(7):149–157. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-07-0-149-157>  
Klementyeva I.N., Kuziev D.A. Extracting-and-loading dragline with innovative design bucket. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(7):149–157. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-07-0-149-157>
13. Кузин А.А., Филиппов В.Г. Метод определения плановых координат и высоты рабочего репера на оползне с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения. *Геодезия и картография*. 2024;85(9):2–11. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11>  
Kuzin A.A., Filippov V.G. Method for determining the plan view coordinates and height of the working benchmark on a landslide with forced inclinations of the pole from the plumb position. *Geodesy and Cartography*. 2024;85(9):2–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11>

14. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Ковальский Е.Р. Твердеющие закладочные смеси на калийных рудниках: перспективные материалы, регулирующие напряжённо-деформированное состояние массива. *Геология и геофизика Юга России*. 2023;13(4):177–187. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>  
Kongar-Syuryun Ch.B., Kovalski E.R. Hardening backfill at potash mines: promising materials regulating stress-strain behavior of rock mass. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023;13(4):177–187. (In Russ.) <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.34.99.014>
15. Liu B., Xue J., Lehane B.M. Centrifuge investigation of soil–foundation–superstructure interaction under static loading. *Engineering Structures*. 2023;281:115779. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115779>
16. Трушко В.Л., Баева Е.К. Обоснование рациональных параметров крепи комплекса горных выработок, проводимых в сложных горно-геологических условиях. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(12):55–69. Режим доступа: <https://giab-online.ru/catalog/obosnovanie-racionalnyh-parametrov-krepi-kompleksa-gornyh-vyrabo> (дата обращения: 01.12.2024).  
Trushko V.L., Baeva E.K. Substantiation of rational parameters of mine support system for underground roadways in difficult geological conditions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(12):55–69. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/catalog/obosnovanie-racionalnyh-parametrov-krepi-kompleksa-gornyh-vyrabo> (accessed: 01.12.2024).
17. Волохов Е. М., Бритвин И. А., Кожухарова В. К. Проблемы обеспечения достоверности прогноза сдвижений поверхности при строительстве станционных комплексов метрополитена глубокого заложения. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(5):36–61. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_5\\_0\\_36](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_5_0_36)  
Volokhov E.M., Britvin I.A., Kozhukharova V.K. Reliability of ground surface movement prediction in construction of stationary facilities in deep subways. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(5):36–61. (In Russ.) [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_5\\_0\\_36](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_5_0_36)
18. Taheri S.R., Pak A., Shad S., Mehrgini B., Razifar M. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020;30(3):357–365. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.02.001>
19. Зубов В.П., Сокол Д.Г. Технологии интенсивной разработки калийных пластов длинными очистными забоями на больших глубинах: актуальные проблемы, направления совершенствования. *Записки Горного института*. 2023;264:874–885. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/14924> (дата обращения: 01.12.2024).  
Zubov V.P., Sokol D.G. Technologies of intensive development of potash seams by longwall faces at great depths: current problems, areas of improvement. *Journal of Mining Institute*. 2023;264:874–885. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/14924> (accessed: 01.12.2024).
20. Liu W.-R. Experimental and numerical study of rock stratum movement characteristics in longwall mining. *Shock and Vibration*. 2019;2019:5041536. <https://doi.org/10.1155/2019/5041536>
21. Куранов А.Д., Багаутдинов И.И., Котиков Д.А., Зуев Б.Ю. Комплексный подход к обеспечению устойчивости предохранительных столбов при отработке нарезных пластов на Яковлевском месторождении. *Горный журнал*. 2020;(1):115–119. <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.23>  
Kuranov A.D., Bagautdinov I.I., Kotikov D.A., Zuev B.Yu. Integrated approach to safety pillar stability in slice mining in the Yakovlevo deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2020;(1):115–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2020.01.23>
22. Nguyen T.T., Do N.A., Karasev M.A., van Kien D., Dias D. Influence of tunnel shape on tunnel lining behaviour. *Geotechnical Engineering*. 2021;174(4):355–371. <https://doi.org/10.1680/jgeen.20.00057>
23. Mikolas M., Mikusinec J., Abrahamovsky J., Dibdiakova J., Tyulyaeva Y., Srek J. Activities of a Mine Surveyor and a Geologist at Design Bases in a Limestone Quarry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;906:012073. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012073>
24. Bacova D., Khairutdinov A.M., Gago F. Cosmic geodesy contribution to geodynamics monitoring. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;906:012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/906/1/012074>
25. Pascariello M.N., Luciano A., Bilotta E., Acikgoz S., Mair R. Numerical modelling of the response of two heritage masonry buildings to nearby tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2023;131:104845. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104845>
26. Wang F., Tu S., Zhan C., Zhang Y., Bai Q. Evolution mechanism of water-flowing zones and control technology for longwall mining in shallow coal seams beneath gully topography. *Environmental Earth Sciences*. 2016;75:1309. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6121-4>
27. Ritter S., Giardina G., Franza A., DeJong M.J. Building deformation caused by tunneling: centrifuge modeling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020;146(5):04020017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002223](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002223)
28. Xu J., Franza A., Marshall A.M. Response of framed buildings on raft foundations to tunneling. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2020;146(11):04020120. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002376](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002376)

29. Каунг П.А., Семикин А.А., Хайрутдинов А.М., Дехтяренко А.А. Вовлечение техногенных отходов в переработку – парадигма ресурсного обеспечения устойчивого развития. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):385–397.  
Kaung P.F., Semikin A.A., Khayrutdinov A.M., Dekhtyarenko A.A. Recycling of industrial waste is a paradigm of resource provision for sustainable development. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):385–397. (In Russ.)
30. Wang J., Li S., Li L., Shi S., Zhou Z., Song S. Mechanism of water inrush in fractures and block collapse under hydraulic pressure. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2020;177:625–642. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2020.05.028>
31. Кузиев Д.А., Пятова И.Ю., Клементьева И.Н., Пихторинский Д. Алгоритм определения максимальной мощности привода подачи карьерного бурового станка. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(1):128–133.  
Kuziev D.A., Pyatova I.Yu., Klement'eva I.N., Pikhtorinsky D. Algorithm for the determination of maximum feed drive power of drilling rigs in open pit mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(1):128–133. (In Russ.)
32. Guo J., Wu W., Liu X., Huang X., Zhu Z. Theoretical analysis on safety thickness of the water-resistant rock mass of karst tunnel face taking into account seepage effect. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022;40:697–709. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01916-7>
33. Huang F., Zhao L.-H., Ling T.-H., Yang X.-L. Rock mass collapse mechanism of concealed karst cave beneath deep tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2017;91:133–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2016.11.017>
34. Zhang Q., Wang J., Feng L. Mechanical mechanism of hydraulic fracturing effect caused by water inrush in tunnel excavation by blasting. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021;2021:9919260. <https://doi.org/10.1155/2021/9919260>
35. Zhao C., Schmüdderich C., Barciaga N., Röchter R. Response of building to shallow tunnel excavation in different types of soil. *Computers and Geotechnics*. 2019;115:103165. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103165>
36. Jian Y., Leung C.F., Maosong H., Tan J.Q.W. Assessment of settlement-based strain in masonry building facade due to tunneling. *Computers and Geotechnics*. 2022;144:104658. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104658>

#### Информация об авторах

**Жерлыгина Екатерина Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3404-0863>; e-mail: zherlygina\_ES@pers.spmi.ru

**Куранова Милитина Евгеньевна** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8198-0252>; e-mail: melnitskaya.prmpi@mail.ru

**Гусев Владимир Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой маркшейдерского дела, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3148-9729>; e-mail: kmd@spmi.ru

**Одинцов Егор Евгеньевич** – аспирант, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0008-3424-0148>; e-mail: odintsovgeorge@gmail.com

#### Information about the authors

**Ekatereina S. Zherlygina** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Research Associate, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3404-0863>; e-mail: zherlygina\_ES@pers.spmi.ru

**Militina E. Kuranova** – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8198-0252>; e-mail: melnitskaya.prmpi@mail.ru

**Vladimir N. Gusev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Mine Surveying Department, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3148-9729>; e-mail: kmd@spmi.ru

**Egor E. Odintsov** – Postgraduate Student, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0008-3424-0148>; e-mail: odintsovgeorge@gmail.com

#### Article info

Received: 02.11.2024

Revised: 09.01.2025

Accepted: 15.01.2025

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.11.2024

Поступила после рецензирования: 09.01.2025

Принята к публикации: 15.01.2025