

РЕАКЦИЯ СИСТЕМ «ПЛАСТ–СКВАЖИНА» И «ПЛАСТ–ВЫРАБОТКА» НА ПРОМЫШЛЕННЫЙ ВЗРЫВ

А.Г. Иванов¹, А.В. Караваяев¹, А.Ю. Федоров¹

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,
Москва, Россия, e-mail: ivanov.ag@idg.ras.ru

Аннотация: Разработка месторождений твердых полезных ископаемых сопровождается проведением большого объема дренажных мероприятий – осушением горных выработок и формированием техногенно-нарушенного режима подземных вод в связи с их выполнением, что, к примеру, проявляется в виде развивающихся депрессионных воронок, а также в образовании куполов растекания под хвостохранилищами. Нарушение гидрогеодинамической обстановки может приводить к неблагоприятным последствиям в виде изменения устойчивости отдельных участков массива горных пород, приуроченных к тектонически ослабленным зонам и литолого-стратиграфическим контактам. Это обуславливает необходимость и актуальность работ по организации и проведению мониторинга по измерению водопритоков, уровня подземных вод и микросейсмического фона. Целью работы является сопоставление реакции систем «пласт–скважина» и «пласт–выработка» на промышленный взрыв. В основу работы положены результаты обработки сейсмических и гидрогеологических данных, полученных при проведении постоянного мониторинга в двух стационарных пунктах наблюдения на поверхности, расположенных в пределах шахтного поля, а также в пункте наблюдения, расположенном в шахте. В рамках полевых работ в июле 2023 г. на территории шахтного поля Коробковского месторождения АО «КМАруда» впервые выполнены комплексные синхронные гидрогеологические и сейсмические наблюдения за реакцией систем «пласт–скважина» и «пласт–выработка» при промышленном взрыве.

Ключевые слова: высокоточный гидрогеологический мониторинг, рудно-кристаллический массив, водоносный комплекс, горная выработка, промышленный взрыв, приведенное расстояние, скорость смещения грунта, гидрогеологический отклик.

Благодарность: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00469, <https://rscf.ru/project/23-27-00469>.

Для цитирования: Иванов А. Г., Караваяев А. В., Федоров А. Ю. Реакция систем «пласт–скважина» и «пласт–выработка» на промышленный взрыв // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 4. – С. 135–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_135.

Response of seam–borehole and seam–stope systems to industrial blasts

A.G. Ivanov¹, A.V. Karavaev¹, A.Yu. Fedorov¹

¹ Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia, e-mail: ivanov.ag@idg.ras.ru

Abstract: Solid mineral mining involves excessive drainage–dewatering of underground openings and the related induced formation of the disturbed ground water dynamics, which shows up as growing cones of depression and domes of flowing under tailings ponds, for example. Disturbance of hydrodynamic situation can bring adverse consequences in the form of instability in some rock mass areas adjoining tectonically weak zones and lithologic and stratigraphic contacts. This defines essentiality and relevance of monitoring of water inflows, ground water table and microseismicity background. The aim of this study is to compare responses of the seam–borehole and seam–slope systems to an industrial blast. The study uses the processing results of seismic and hydrogeological data obtained from continuous monitoring at two stationary points on ground surface within a mine field and at an observation point in a mine. During field operations in the Korobkovo mine field, KMAruda, in July 2023, the integrated synchronous hydrogeological and seismic observations over the response of the seam–borehole and seam–slope systems to industrial blasts were performed.

Key words: high-precision hydrogeological monitoring, crystalline ore body, aquifer, slope, industrial blast, reduced distance, peak particle velocity, hydrogeological response.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation, Grant No. 23-27-00469, <https://rscf.ru/project/23-27-00469>.

For citation: Ivanov A. G., Karavaev A. V., Fedorov A. Yu. Response of seam–borehole and seam–slope systems to industrial blasts. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(4):135-151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_4_0_135.

Введение

Во многих горнопромышленных районах, в пределах месторождений твердых полезных ископаемых, разрабатываемых открытым способом (в карьерах) и подземным (в шахтах), сформированы области с техногенно-нарушенным режимом подземных вод. Изменение гидрогеологических условий проявляется не только в развитии локальных депрессионных воронок, но и в образовании своеобразных куполов растекания под хвостохранилищами [1]. В то же время подземные воды повсеместно используются для водоснабжения и при выполнении горнопроходческих работ. Сложный комплекс мероприятий, сопровождающий добычу полезных ископаемых, определяет необходимость постоянного контроля гидрогеодинамической обстановки и наведенной сейсмичности [2].

Режим подземных вод в зоне влияния Старооскольско-Губкинского промышленного

комплекса Белгородской области детально изучен на региональном уровне [3]. Отмечено, что в пределах Лебединского и Стойленского железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА) сформирована единая депрессионная воронка. На территории шахты имени Губкина наряду с периодическими ежемесячными измерениями в пунктах режимной сети АО «КМАруда» с июля 2019 г. проводится прецизионный гидрогеологический мониторинг с участием ИДГ РАН [4]. Оперативная обработка получаемых экспериментальных данных позволяет контролировать гидрогеологическую ситуацию и микросейсмический фон, определять амплитуды максимальных значений вариаций порового давления в системе «пласт–скважина» и скорости колебаний грунта при проведении промышленных взрывов в процессе разработки месторождения [5].

Актуальность и необходимость проводимых исследований подтверждены результатами, полученными в пределах разрабатываемых месторождений твердых полезных ископаемых [6–9]. Изменение обводненности разрабатываемых месторождений влияет на микросейсмический фон массива горных пород [10, 11] и устойчивость вскрышных пород. По данным многолетнего сейсмического мониторинга рудников Хибинского массива установлено повышение сейсмической активности в зонах интенсивного ведения горных работ и влияния разломов в паводок, в периоды инфильтрации атмосферных осадков по техногенно-нарушенным и тектонически ослабленным участкам [12, 13]. В частности, проявление микросейсмических событий может быть связано с релаксацией тектонически ослабленных зон после проведения промышленных взрывов [14], возможной активизацией и формированием новых гидрогеологически активных трещин.

Основная цель данной работы — предварительная оценка эффективности комплексного мониторинга в горной выработке, синхронного с наблюдениями, которые выполняются в опорных пунктах, расположенных на поверхности.

Краткая характеристика участка работ

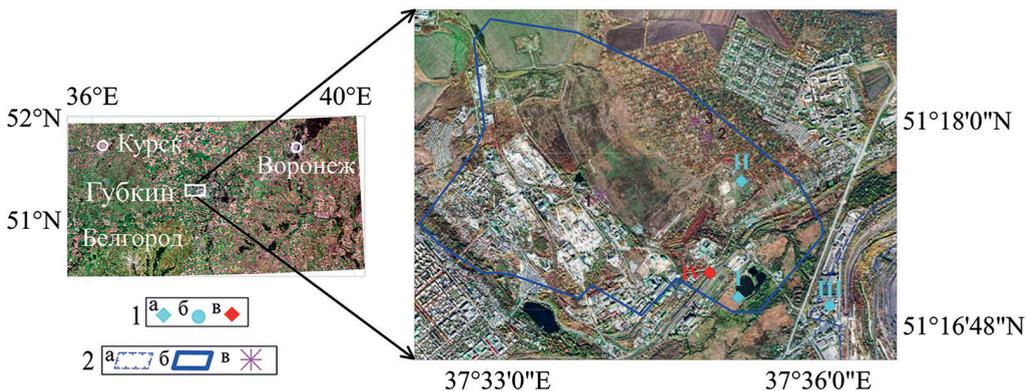
В геологическом строении Коробковского железорудного месторождения КМА выделяются два структурных этажа. Нижний структурный этаж — фундамент, представлен сложнодислоцированными образованиями архея и нижнего протерозоя (курская серия) [15]. Курская серия является рудоносной и сформирована стойленской и коробковской свитами. В составе коробковской свиты к продуктивной толще отнесены нижняя и верхняя железорудные подсвиты, разделенные и перекрытые ниж-

ней и верхней сланцевыми подсвитами соответственно. Верхний структурный этаж — осадочный чехол, сложенный толщей горизонтально залегающих отложений фанерозоя мощностью от 50 до 140 м.

В осадочном чехле основной водоносный горизонт приурочен к отложениям альб-сеномана нижнего-верхнего мела. В зоне экзогенного выветривания пород фундамента преимущественное распространение получает архей-протерозойский водоносный комплекс трещинно-пластового типа. Наличие регионального водоупора — глинистых отложений юры и девона — контролирует изолированность верхнего водоносного горизонта от нижезалегающего водоносного горизонта и определяет разрыв в положении уровней.

В зонах повышенной трещиноватости пород фундамента, сопряженных с разломами и литолого-стратиграфическими контактами, распространены трещинно-жильные воды, получающие питание от вышезалегающих трещинно-пластовых вод. Гидрогеологически активные зоны водопроводящих трещин формируют фильтрационную структуру месторождения и определяют нисходящий характер движения подземных вод по направлению к горным выработкам [16]. Основные водопроявления в пределах шахтного поля выражаются в виде струйного высачивания и капеза различной интенсивности вдоль стенок и кровли выработки. Техногенная разгрузка трещинно-жильных вод также происходит через ряд разведочных скважин и шпуров, подсекающих обводненные зоны повышенной трещиноватости горных пород.

Пункты наблюдений I, II и IV расположены в первой зоне горного отвода недр Коробковского месторождения, пункт III — в первой зоне Лебединского месторождения (рис. 1). Рудно-кристаллический фундамент в пунктах I и IV

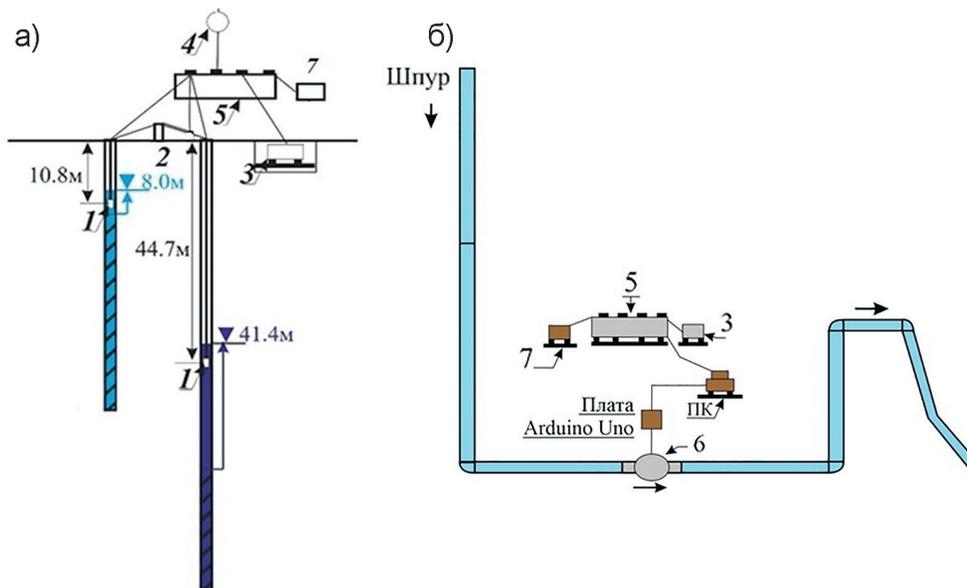


1 – пункты: а, в – комплексных измерений на поверхности и в выработке, б – сейсмических измерений;
 2 – контуры: а, б – месторождений Лебединского и Коробковского соответственно, в – расположение камер

Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений I–IV при взрыве 22.07.2023
 Fig. 1. Scheme of observation points I–IV during mass blast on July 22, 2023

сформирован метаморфическими сланцами нижней железорудной подсвиты и перекрыт осадочными отложениями мощностью 70–100 м. Пункт II приурочен к области развития железистых кварци-

тов верхней железорудной подсвиты, мощность осадочного чехла возрастает до 140 м. В пределах пункта III преимущественное распространение получают сланцы слюдястые стойленской свиты.



1, 2 – датчики: 1 – уровня воды PR-36XW, 2 – атмосферного давления PAA-33X;
 3 – сейсмометр СПВ-3К / СМ-3КВ; 4 – GPS-модуль; 5 – регистраторы REFTEK-130 (а) и Centaur CTR4-6S или ССД-3 (б); 6 – датчик расхода жидкости YF-S201; 7 – аккумуляторная батарея
 Рис. 2. Схемы аппаратурно-измерительных комплексов на поверхности (а) и в горной выработке (б)
 Fig. 2. Measuring complex schemes: above the ground (а) and underground (б)

Методика

На поверхности расположены два пункта наблюдений — I и II, в которых проводится комплексный мониторинг сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров с июля 2019 г. Дополнительно сейсмическая регистрация промышленных взрывов в процессе разработки Коробковского и Лебединского железорудных месторождений выполняется в пункте III (см. рис. 1). В состав аппаратурно-измерительных комп-

лексов в пунктах наблюдений I и II входят (см. рис. 2, а):

- датчики уровня PR-36XW, установленные в наблюдательных скважинах 1–3;
- датчик атмосферного давления PAA-33X;
- сейсмометры СПВ-3К, СМ-3КВ;
- регистраторы Reftek-130, Centaur CTR4-6S;
- GPS-модули для регистрации;
- аккумуляторные батареи.

Таблица 1

Технические характеристики аппаратурно-измерительного комплекса Technical characteristics of the measuring complex

№	Название аппаратуры	Назначение	Характеристики (чувствительность датчиков/каналов)
1	Датчик уровня PR-36XW	Высокоточная регистрация вариаций уровня воды в скважине в диапазоне 0–5 м	1 мВ/мм, основная погрешность 0,05% диапазона измерений (ДИ) (2,5 мм)
2	Датчик атмосферного давления PAA-33X	Высокоточная регистрация абсолютного атмосферного давления в диапазоне 0,8–1,2 бар	Основная погрешность 0,05% верхнего предела измерений (ВПИ) (0,0002 бар или 20 Па)
3	Сейсмометр СПВ-3К / Сейсмометр СМ-3КВ	Преобразование механических колебаний грунта в электромагнитный импульс	Рабочий диапазон 0,5–65 Гц. Номинальный коэффициент преобразования 500 В/(м/с) / Рабочий диапазон 0,5–100 Гц. Номинальный коэффициент преобразования 140 В/(м/с)
4	GPS-модуль	Синхронизация записи всех типов данных	
5а	Регистратор Reftek 130	Запись сигналов по 6 каналам	1,58 мкВ/отсчет. Частота дискретизации 200 Гц
5б	Регистратор Centaur CTR4-6S	Запись сигналов по 6 каналам	1,6 отсчет /мкВ (1–3 каналы) и 0,8 отсчет/мкВ (4–6 каналы). Частота дискретизации 200 Гц
5в	Регистратор ССД-3	Запись сигналов по 3 каналам	0,84 отсчет/мкВ Вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) ± 10 В. Разрядность 24 бита. Частота дискретизации 200 Гц
6	Датчик расхода жидкости YF-S201	Измерение объема проходящей жидкости с помощью датчика Холла	Диапазон 1–30 л. Погрешность измерений 10%
7	Аккумуляторная батарея	Автономное питание	12 В 12 А*ч / 12 В 65 А*ч

В пунктах I, II и IV установлены сейсмометры СПВ-3К, пункт III оборудован сейсмометром СМ-3КВ.

Запись осуществлялась регистраторами Reftek-130 (пункт I), Centaur CTR4-6S (пункт II) и сейсмостанцией ССД-3 (пункт III). Технические характеристики

используемой аппаратуры приведены в табл. 1.

В июле 2023 г. в одной из отработанных камер, которая планируется под организацию подземного пункта IV (см. рис. 1), была собрана и смонтирована система трубок для проведения изме-

Таблица 2

Зарегистрированные параметры промышленных взрывов
Registered parameters of mass blasts

Дата массового взрыва – расположение подрываемой камеры / блока	№ взрыва	Пункт наблюдения	Эпицентральное расстояние R, м	Максимальная масса взрывчатого вещества в группе q_{max} , кг	Приведенное расстояние R' , м/кг ^{1/3}	Массовая скорость V_m , мм/с	Гидрогеологический отклик U, гПа
22.07.2023 – шахта	1/1	I	1860	1040	184	1,4	12,3
		II	700		69	6,8	91,2
		III	2360		233	1,0	–
		IV	1560		153	0,5	–
25.10.2023 – карьер	1/3	I	3050	3560	200	2,0	13,1
		II	3260		214	1,0	4,6
		III	2000		131	2,9	–
		IV	3380		221	–	–
	2/3	I	3880	2920	271	0,5	10,5
		II	4120		288	0,4	0,5
		III	2870		201	1,7	–
		IV	4222		295	–	–
	3/3	I	2200	4290	135	5,4	68,2
		II	2270		140	3,2	16,5
		III	1280		79	7,6	–
		IV	2485		153	–	–
06.12.2023 – карьер	1/3	I	3200	4090	200	0,8	11,0
		II	2370		211	0,5	0,6
		III	2230		139	1,8	–
		IV	3530		221	–	–
	2/3	I	1180	5350	67	1,2	21,7
		II	1090		62	1,1	7,9
		III	1430		82	1,4	–
		IV	4340		248	–	–
	3/3	I	2020	3800	129	5,4	30,1
		II	2540		145	3,2	5,1
		III	890		51	6,4	–
		IV	2380		152	–	–

рений водопритока из шпура, пройденного в стенке выработки (рис. 2, б). Эта камера включена в режимную сеть наблюдений АО «Комбинат КМАруда» с использованием стандартных методов измерений — объемным способом. Для выполнения контрольных измерений применяется датчик расхода воды YF-S201 (датчик Холла). Регистрация водопритока выполняется на ноутбук через контроллер Arduino Uno.

Промышленный взрыв 22.07.2023 произведен в трех камерах, расположенных в пределах нижней железорудной подсвиты (камера 1) и верхней железорудной подсвиты (камеры 2, 3) (см. рис. 1). Основные параметры, зарегистрированные при взрыве, приведены в табл. 2.

Исходные сейсмические и гидрогеологические записи продолжительностью 24 с, полученные в горной выработке и в трех пунктах наблюдений на поверхности, были отфильтрованы в диапазоне 2–65 Гц. В каждом пункте определены максимальные значения амплитуд сейсмических параметров по трем компонентам и гидрогеологических откликов при промышленном взрыве, построены амплитудные и нормированные спектры. При расчете нормированных спектров по соотношению сигнал/шум были рассмотрены интервалы продолжительностью 12 с до и после вступления сейсмических волн в каждом из пунктов.

Для сравнения экспериментальных данных, зарегистрированных в четырех пунктах наблюдений по трем компонентам (вертикальной V_z и горизонтальным V_N , V_E), рассчитывается массовая скорость смещения грунта V_m :

$$V_m = \left| \sqrt{V_z^2 + V_N^2 + V_E^2} \right|. \quad (1)$$

Приведенное расстояние оценивается как

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{Q^2}}, \quad (2)$$

где R — эпицентральное расстояние от центра взрыва до пункта наблюдений, м; Q — максимальная масса ВВ в одной ступени замедления (или в пределах взрываемого блока в карьере), кг.

Результаты измерений и обсуждение

Режим подземных вод

Коробковского месторождения

Гидрогеологические условия Коробковского месторождения обусловлены особенностями геологического строения и зависят от степени техногенной нагрузки. Это отчетливо проявляется на диаграммах уровня разновозрастных водоносных горизонтов (см. рис. 3).

В пункте I в скважине 1 в интервале 68,1–90,1 м вскрыт напорный архей-протерозойский водоносный комплекс. Водовмещающие породы представлены амфиболовыми сланцами выветрелыми, трещиноватыми. Скважина 2 в интервале 14,5–53,5 м пройдена в обводненной толще песчаных отложений альб-сеномана нижнего-верхнего мела. В скважинах прослеживаются сезонные вариации уровня с амплитудами до 2 м в верхнем горизонте и до 0,8 м в нижнем водоносном комплексе. Весенний паводок на две недели раньше проявляется в верхнем горизонте по сравнению с нижним комплексом, вступление осеннего паводка зарегистрировано на неделю позже (см. рис. 3, а).

В пункте II в скважине 3 в интервале 110,4–140,9 м вскрыт напорный архей-протерозойский водоносный комплекс, приуроченный к железистым кварцитам слаботрещиноватым. Режим подземных вод техногенно-нарушенный, осложнен формированием локальных депрессионных мини-воронок, связанных с проведением промышленных взрывов. На про-

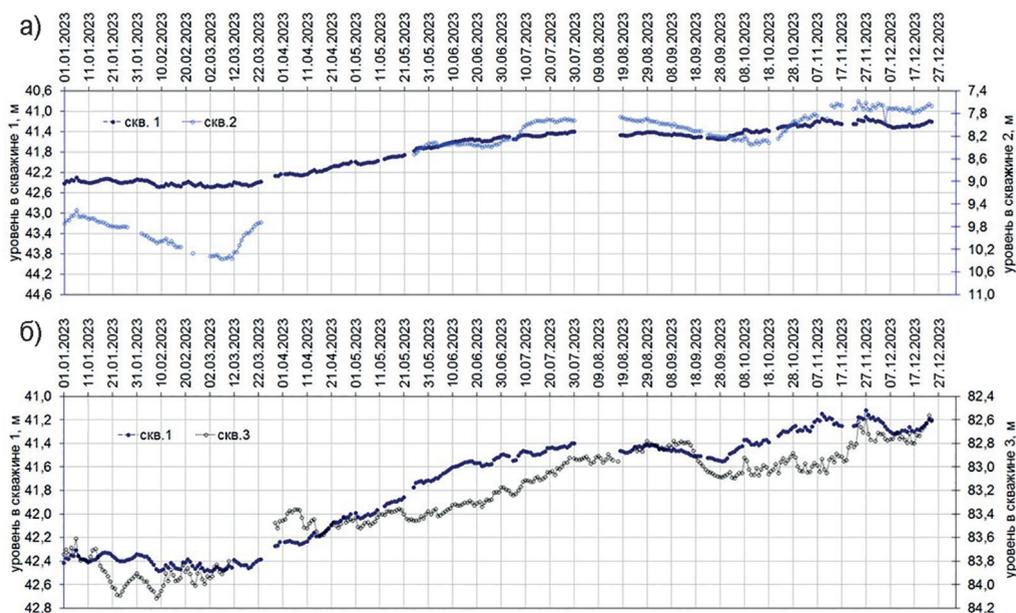


Рис. 3. Диаграммы уровня подземных вод: в скважинах 1 и 2 в пункте I (а); в скважинах 1 и 3 в пунктах I и II соответственно (б)

Fig. 3. Groundwater level diagrams: in wells 1 and 2 in point I (a); in wells 1 and 3 in points I and II, respectively (b)

тяжении 2023 г. в верхнем горизонте и нижнем комплексе прослежен подъем уровня с относительной стабилизацией в зимний период (рис. 3, б). По данным режимных наблюдений, в камере отмечено увеличение водопритока в начале года в зимний период.

В течение года расход воды относительно постоянный (рис. 4).

Результаты прецизионного гидрогеологического мониторинга в скважинах позволяют выделить влияние атмосферного давления и земных приливов на

подземные воды. В качестве примера на рис. 5 для интервала с 21 по 27 июля 2023 г. приведены вариации атмосферного давления (рис. 5, а) и уровня нижнего архей-протерозойского водоносного комплекса в скважинах 1 (рис. 5, б) и 3 (рис. 5, в), исходные и отфильтрованные от влияния атмосферного давления. В отфильтрованных данных отчетливо видны вариации порового давления, связанные с порупругой реакцией водонасыщенного коллектора на земные приливы, которые могут быть использо-

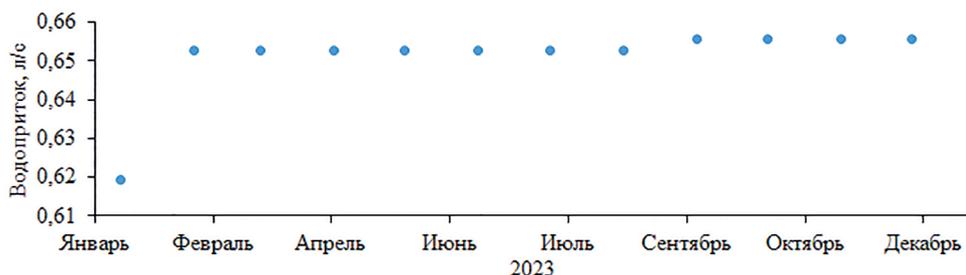


Рис. 4. Диаграмма водопритока в выработку

Fig. 4. Diagram of water inflow in the chamber

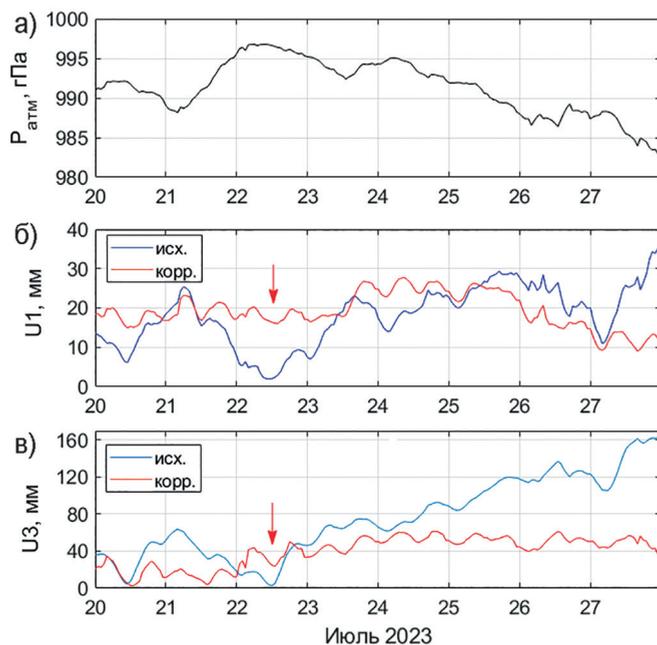


Рис. 5. Диаграммы атмосферного давления (а) и уровня подземных вод в скважине 1 в пункте I (б) и в скважине 3 в пункте II (в) (исходные показаны синим цветом, отфильтрованные от влияния атмосферного давления — красным цветом; стрелкой обозначен взрыв)

Fig. 5. Diagrams of barometric pressure (a) and groundwater level in well 1 in point I (b) and in well 3 in point II (v) (initial levels — blue, corrected from barometric pressure impact — red; the arrow indicates blast)

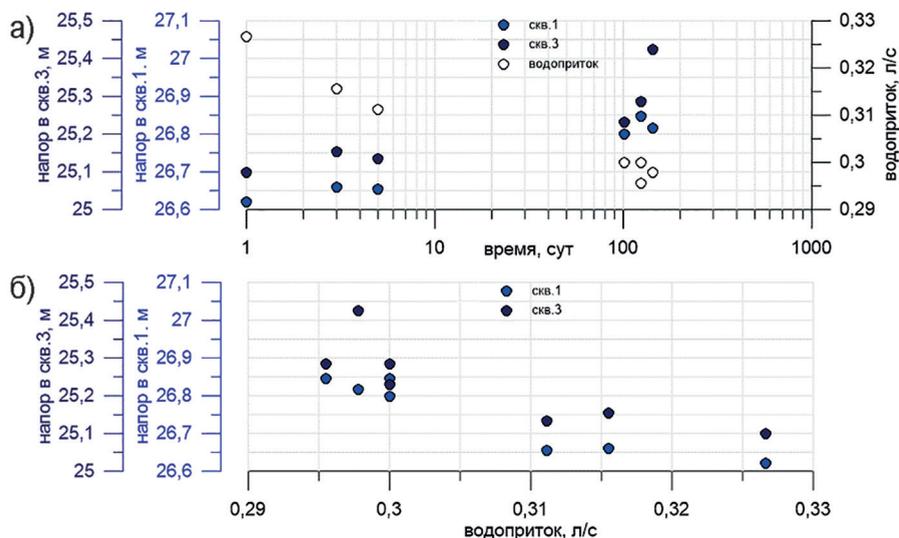


Рис. 6. Диаграммы изменения напора и водопритока архей-протерозойского водоносного комплекса (а) и зависимость вариаций водопритока от напора (б)

Fig. 6. Diagrams of pressure head and water inflow variations of the Archaean-Proterozoic aquifer complex (a) and relation between water inflow variations and pressure (b)

ваны для мониторинга фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора. В скважине 3, в которой нижний водоносный комплекс залегает более глубоко, амплитуда колебаний достигает 140 Па (14 мм), в скважине 1 — не превышает 50 Па (5 мм).

Возможно, подобные эффекты можно будет проследить и при проведении измерений водопритоков трещинно-жильных вод в горной выработке с использованием расходомеров с более высокой точностью разрешения. Пробное использование простой модели датчика расхода воды YF-S201 позволило отметить общий тренд уменьшения водопритока при проведении семи эпизодических измерений за период наблюдений с июля по декабрь 2023 г., который характеризуется относительно высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,95$) (см. рис. 6, а).

Напротив, в этот же период измерений в трещинно-пластовых водах, вскрытых в скважинах 1 и 3, установлен подъем уровня и увеличение напора.

При сопоставлении значений вариаций напора трещинно-пластовых вод с изменениями водопритока трещинно-жильных вод прослежена обратная зависимость, которая отличается более высоким значением коэффициента детерминации ($R^2 = 0,89$) для скважины 1, расположенной в пункте I в пределах одновозрастной нижней железорудной подсвиты с подземным пунктом наблюдений IV, по сравнению со скважиной 3 в пункте II, приуроченной к верхней железорудной подсвите (рис. 6, б). Отмеченная зависимость подтверждает наличие «замедленной» гидравлической взаимосвязи между различными типами архей-протерозойского водоносного комплекса.

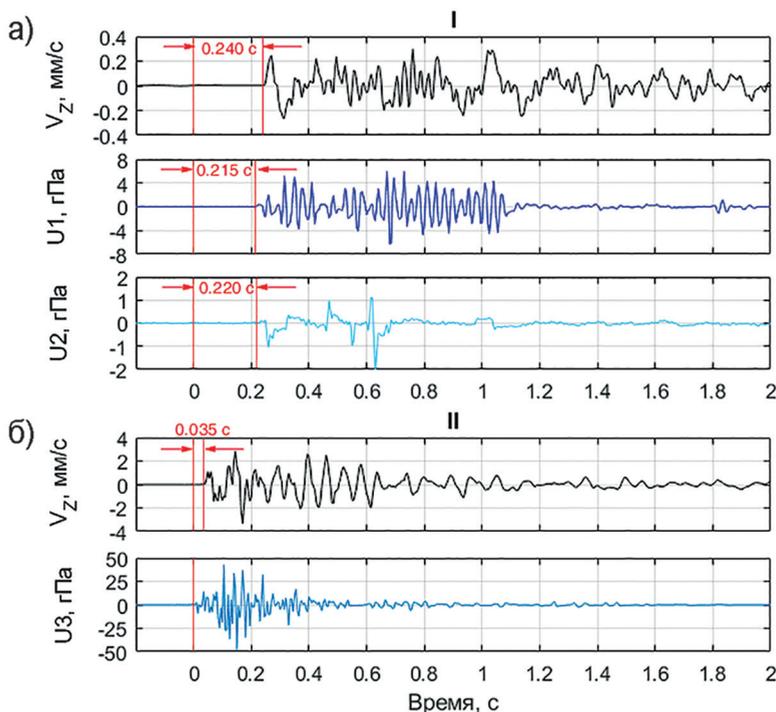


Рис. 7. Волновые формы регистрации взрыва 22.07.2023 в пунктах наблюдений I (а) и II (б)
Fig. 7. Waveforms of a mass blast on July 22, 2023 at observation points I (a) and II (b)

Реакция рудно-кристаллического массива на промышленный взрыв

При проведении взрыва 22.07.2023 максимальные значения колебаний грунта по трем компонентам установлены в пунктах II и I, расположенных на приведенных расстояниях 69 и 184 м/кг^{1/3} от камеры 3 соответственно в пределах Коробковского месторождения (см. рис. 7, табл. 2). В подземном пункте IV максимальные значения скорости смещения грунта по вертикальной и северной компонентам имеют близкие значения с данными регистрации в пункте III, который находится на поверхности, на западном борту Лебединского карьера, и удален от камеры 3 на расстояние 233 м/кг^{1/3}.

Полученные данные согласуются с результатами сейсмических измерений, выполненных на поверхности и в работе при проведении взрыва 16.03.2016 в Лебединском карьере, включающем 9 блоков, на расстоянии 1,1–3,6 км от пунктов наблюдений. Амплитуда скорости смещения грунта на поверхности в 1,5 раза выше по сравнению со значением в подземном пункте и составляет 1,5 мм/с [17].

В дальней зоне взрыва 22.07.2023 на приведенных расстояниях от 69 м/кг^{1/3} максимальные значения скорости смещения грунта по горизонтальным компонентам имеют близкие значения при

совпадении азимута направления подземного пункта IV с расположением камеры 3, в которой производится взрыв, севернее пункта наблюдений (см. рис. 1). При увеличении угла направления на источник сейсмического воздействия расхождение между амплитудами скорости смещения грунта по горизонтальным компонентам увеличивается от 0,6 до 2,5 мм/с.

При сопоставлении волновых форм сигналов от взрыва необходимо отметить, что реакция системы «пласт–скважина» опережает вступление сейсмической волны по вертикальной компоненте (рис. 8). Полученные значения могут быть использованы для предварительной оценки скорости распространения сейсмических волн между пунктами наблюдений. Разница в регистрации гидрогеологических откликов в скважинах 3 (U3) и 1 (U1) составляет 0,215 с, вступлений сейсмических волн в пунктах II и I – 0,205 с. Соответственно скорость распространения сейсмических волн на расстоянии 1,3 км изменяется в пределах 5,6–5,9 км/с в рудно-кристаллическом массиве.

Реакция верхнего водоносного горизонта в скважине 2 (U2) в пункте I на сейсмическое воздействие слабо выражена и прослеживается в виде отдельных импульсов с максимальной двойной амплитудой до 3,1 гПа, совпадающих

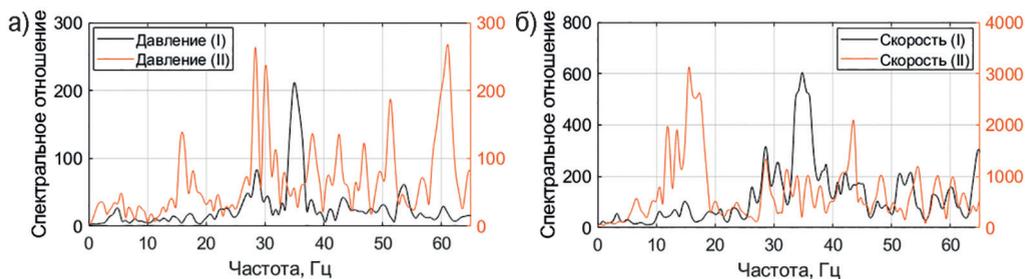


Рис. 8. Нормированные на шум спектры вариаций порового давления в системе «пласт–скважина» (а) и скорости смещения грунта (б) при регистрации взрыва 22.07.2023 в пунктах наблюдения I и II

Fig. 8. Noise-normalized spectra of pore pressure variations in the 'reservoir-well' system (a) and ground velocity (b) during a mass blast on July 22, 2023 at observation points I and II

с усилением интенсивности в нижнем водоносном комплексе. Вариации порового давления в архей-протерозойском комплексе изменяются от 91 гПа в ближней зоне до 12 гПа в дальней зоне при увеличении приведенного расстояния от 69 до 184 м/кг^{1/3} (см. табл. 2).

На нормированных спектрах (отношение спектра отрезка, содержащего сигнал, к спектру шума) вариаций порового давления в системе «пласт-скважина» отчетливо проявляется различие фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора при сейсмическом воздействии (см. рис. 8). Совпадение экстремумов вертикальной компоненты скорости смещения грунта и гидрогеологического отклика, выделенных в окрестностях частоты 35 Гц в пункте I, в пределах которого преимущественное распространение получают сланцы нижней железорудной подсвиты, подтверждает пороупругую реакцию водонасыщенного коллектора на сейсмическое воздействие. На нормированных спектрах скорости смещения грунта, зарегистрированной в области распространения железистых кварцитов верхней железорудной подсвиты в пункте II, может быть выделено несколько экстремумов на частоте 15, 29–30 Гц и слабо-

выраженный на частоте 42 Гц. Максимальное увеличение вариаций порового давления прослежено в окрестностях частоты 15 и 42 Гц и, вероятно, свидетельствует о более сложном механизме реакции системы «пласт-скважина» на сейсмическое воздействие [18].

Полученные данные не противоречат результатам численных расчетов, выполненных для одного из разрезов Коробковского железорудного месторождения. В работе [19] отмечено, что наряду с закономерным увеличением вертикального напряжения с глубиной прослежено неравномерное изменение напряжения по латерали. В частности, в породах верхней железорудной подсвиты напряжение соответствует литостатическому давлению, в пределах нижней подсвиты — уменьшается. Вероятно, подобное расхождение может быть связано с особенностями геологического строения участка исследований.

В пункте наблюдений III, приуроченном к области преимущественного распространения отложений стойленской свиты, расположенном на западном борту Лебединского карьера, экстремумы выделяются по горизонтальной восточной компоненте на частоте 26 и 30 Гц (рис. 9). По вертикальной компоненте

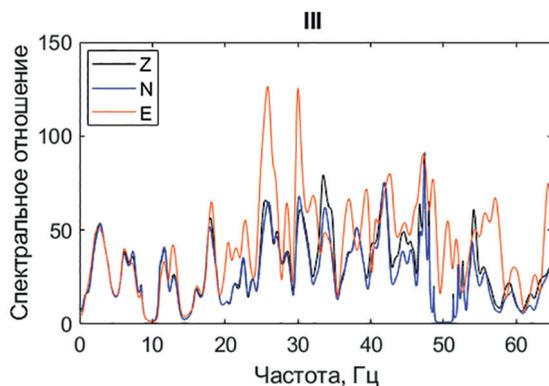


Рис. 9. Нормированные спектры скорости смещения грунта при регистрации взрыва 22.07.2023 в пункте наблюдений III

Fig. 9. Normalized spectra of ground velocity during a mass blast on July 22, 2023 at observation point III

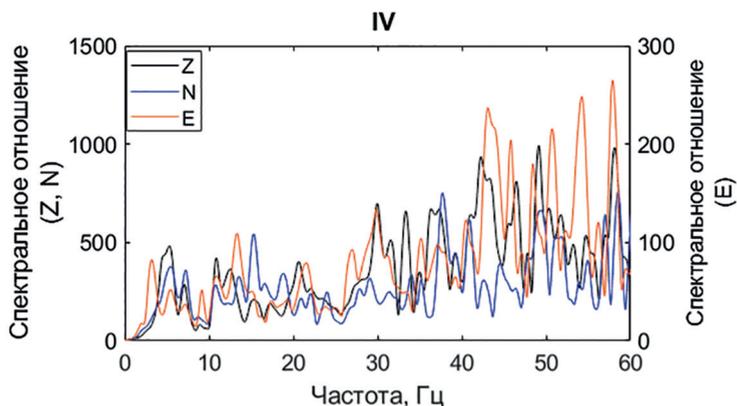


Рис. 10. Нормированные спектры скорости смещения грунта при регистрации взрыва 22.07.2023 в подземном пункте наблюдений IV

Fig. 10. Normalized spectra of ground velocity during a mass blast on July 22, 2023 at underground observation point IV

и горизонтальной, ориентированной на север, прослежен общий тренд увеличения интенсивности сейсмического шума в области высоких частот, что может быть обусловлено влиянием техногенной составляющей.

В подземном пункте IV экстремумы в окрестностях 15 и 39 Гц прослеживаются по горизонтальной компоненте, ориентированной на север по направлению, совпадающему с источником сейсмического воздействия — камерой 3 (рис. 10). По вертикальной компоненте и горизонтальной восточной на нормированных спектрах может быть выделен экстремум в окрестности частоты 42 Гц на фоне общего тренда увеличе-

ния интенсивности сигналов в области высоких частот.

По данным наблюдений за водопритоком, которые проводились в течение 0,5 ч с использованием датчика расхода воды YF-S201, как при взрыве в шахте 22.07.2023, так и в Лебединском карьере 25.10.2023 и 06.12.2023, изменений расхода не зарегистрировано (рис. 11). Промышленные взрывы (октябрь/декабрь) на Лебединском карьере инициированы на приведенных расстояниях от 152 до 292 м/кг^{1/3}. Эти значения сопоставимы с приведенным расстоянием при взрыве, произведенном 22.07.2023, и составляет ~153 м/кг^{1/3} (см. табл. 2). Соответственно уменьшения водопритока

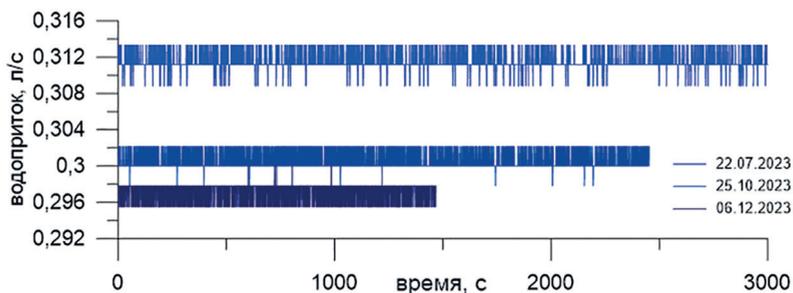


Рис. 11. Диаграммы режимных наблюдений за водопритоком из обсаженного шпура в стенке камеры в подземном пункте IV

Fig. 11. Diagrams of water inflow from a cased hole in the chamber wall at underground point IV

тока в выработку, зарегистрированные 25.10.23 и 06.12.23, не связаны с сейсмическим воздействием, которое оценивается таким параметром, как «приведенное расстояние», а может быть обусловлено сезонными вариациями обводненности горной выработки. Помимо этого, невозможность зарегистрировать изменение водопритока вследствие взрыва обусловлена низкой точностью и чувствительностью измерительного прибора. Планируемое применение высокоточного датчика — электромагнитного расходомера EM-470, возможно, позволит установить закономерности между изменением режима трещинно-жильных вод и сейсмическими колебаниями (откликами), зарегистрированными в подземном пункте и на поверхности.

Например, ранее при проведении взрывов в камерах, близких к участку заправки отходов производства — пастообразной пульпы, было прослежено уменьшение напора жидкости в заполняемой камере, напротив, в нижерасположенной камере установлен подъем уровня [20]. Отмеченные эффекты перетоков подтверждают единую фильтрационную структуру шахтного поля Коробковского месторождения КМА, разрабатываемого с использованием взрывных технологий.

Заключение

Высокие темпы эксплуатации железорудных месторождений определяют необходимость организации локальных сетей мониторинга, оборудованных современными аппаратурно-измерительными комплексами для контроля гидрогеодинамической обстановки в режиме реального времени.

Особую значимость приобретает создание подземного пункта наблюдений, который позволит определить степень гидравлической взаимосвязи между тре-

щинно-пластовыми и трещинно-жильными водами. Первые шаги исследований в данном направлении проводятся на территории разрабатываемого Коробковского месторождения КМА и отражены в данной статье.

Важным фактором контроля состояния массива горных пород в процессе добычных работ является мониторинг водопритоков в горную выработку и микросейсмического фона.

В результате проведенных эпизодических измерений в подземном пункте наблюдений с использованием датчика расхода воды YF-S201 установлен общий тренд уменьшения водопритока в выработку за период с июля по декабрь 2023 г.

Установлено наличие обратной зависимости между водопритоком в выработку и напором в скважине, расположенной в наземном пункте наблюдений в пределах одновозрастной нижней железорудной подсвиты с подземным пунктом наблюдений. Это подтверждает, что между различными типами архей-протерозойского водоносного комплекса присутствует «замедленная» гидравлическая взаимосвязь.

Кратковременных изменений водопритока во время проведения массовых взрывов с применением датчика YF-S201 не зарегистрировано.

Планируемая замена датчика на высокоточный электромагнитный расходомер, вероятно, позволит установить закономерности между изменением режима трещинно-жильных вод и сейсмическими колебаниями (откликами), зарегистрированными в подземном пункте и на поверхности.

Авторы выражают признательность в.н.с. ИДГ РАН к.ф.-м.н. В.И. Куликову, а также с.н.с. ИДГ РАН С.Г. Волосову за помощь и консультирование во время выполнения работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Житинская О. М. Влияние компонентов инженерно-геологических условий на устойчивость бортов железорудных карьеров при длительной их разработке: Автореф... дис. канд. геол.-мин. наук. — М.: РГГРУ, 2018. — 26 с.
2. Козырев А. А., Онуприенко В. С., Жукова С. А., Журавлева О. Г. Развитие инструментального и методического обеспечения контроля наведенной сейсмичности на Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях // Горный журнал. — 2020. — № 9. — С. 19–26. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.02.
3. Петин А. Н., Крамчанинов Н. Н., Погорельцев И. А., Уколов И. М. Оценка техногенного воздействия на подземные воды в зоне влияния Старооскольско-Губкинского промышленного комплекса // Известия Самарского научного центра РАН. — 2013. — Т. 15. — № 3(3). — С. 949–953.
4. Горбунова Э. М., Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Батухтин И. В., Петухова С. М. Прецизионный гидрогеологический мониторинг в техногенно-нарушенных условиях: организация, проведение и обработка экспериментальных данных // Сейсмические приборы. — 2021. — Т. 57. — № 2. — С. 62–80. DOI: 10.21455/si2021.2-4.
5. Горбунова Э. М., Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Батухтин И. В., Петухова С. М. Реакция водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие (по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод) // Физика Земли. — 2021. — № 5. — С. 74–90. DOI: 10.31857/S0002333721050070.
6. Батугин А. С. Геодинамические эффекты предельно напряженного состояния земной коры // Горная промышленность. — 2023. — № S1. — С. 14–21. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21.
7. Башков В. И., Штирц В. А., Еременко А. А., Конуринов А. И. Оценка геомеханического состояния массива горных пород при производстве массовых взрывов на удароопасном рудном месторождении Горной Шории // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2015. — Т. 2. — № 2. — С. 205–213.
8. Тяньвэй Л., Хунвэй Ч., Шэн Л., Батугин А. С., Вэйго Ч., Цян Л., Цзючжэн С. Применение и развитие метода геодинамического районирования по прогнозу геодинамической опасности на угольных шахтах Китая // Известия вузов. Геология и разведка. — 2018. — № 6. — С. 71–76. DOI: 10.32454/0016-7762-2018-6-71-76.
9. Gorbunova E., Besedina A., Petukhova S., Pavlov D. Reaction of the underground water to seismic impact from industrial explosions // Water. 2023, vol. 15, article 1358. DOI: 10.3390/w15071358.
10. Huang L., Xu Y., Liu S., Gai Q., Miao W., Li Y., Zhao L. Research on the development law of pre-mining microseisms and risk assessment of floor water inrush: A case study of the wutongzhuang coal mine in China // Sustainability. 2022, vol. 14, article 9774. DOI: 10.3390/su14159774.
11. Lai X., Dai J., Xu H., Chen X. Multifield environmental analysis and hazards prevention of steeply inclined deep coal mining // Advances in Civil Engineering. 2021, vol. 2021, article 6651088. DOI: 10.1155/2021/6651088.
12. Козырев А. А., Батугин А. С., Жукова С. А. О влиянии обводненности массива на его сейсмическую активность при разработке апатитовых месторождений Хибин // Горный журнал. — 2021. — № 1. — С. 31–36. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.06.
13. Журавлева О. Г., Жукова С. А. Выявление периодов неустойчивости при формировании обрушений подработанной толщи пород в тектонически напряженном Хибинском массиве // Горная промышленность. — 2023. — № S5. — С. 100–106.
14. Беседина А. Н., Кишкина С. Б., Кочарян Г. Г., Куликов В. И., Павлов Д. В. Характеристики слабой сейсмичности, индуцированной горными работами на Коробковском месторождении Курской магнитной аномалии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2020. — Т. 3. — С. 12–24. DOI: 10.15372/FTPRP120200302.
15. Железные руды КМА: монография / Под ред. В. П. Орлова, И. А. Шевырева, Н. А. Соколова. — М.: Геоинформмарк, 2001. — 616 с.
16. Мохов А. В. Гидродинамический режим подземных вод горных отводов угольных и сланцевых шахт // Доклады Академии наук. — 2018. — Т. 483. — № 1. — С. 68. DOI: 10.31857/S086956520003414-8.
17. Кочарян Г. Г., Куликов В. И., Павлов Д. В. О влиянии массовых взрывов на устойчивость тектонических разломов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2019. — № 6. — С. 49–58. DOI: 10.15372/FTPRP120190605.

18. Петухова С. М., Горбунова Э. М. Режимы деформирования флюидонасыщенных коллекторов при сейсмическом воздействии по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга (обзор исследований) // Динамические процессы в геосферах. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 44–59. DOI: 10.26006/29490995_2023_15_4_44.

19. Кочарян Г. Г., Золотухин С. Р., Калинин Э. В., Панасьян Л. Л., Спунгин Л. Л. Напряженно-деформированное состояние массива горных пород Коробковского железорудного месторождения на участке зоны тектонических нарушений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2018. — № 1. — С. 1–9. DOI: 10.15372/FTPRPI20180102.

20. Лейзерович С. Г., Помельников И. И., Сидорчук В. В., Томаев В. К. Ресурсовоспроизводящая безотходная геотехнология комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / Под ред. Д. Р. Каплунова. — М.: Изд-во «Горная книга», 2012. — 547 с. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Zhitinskaya O. M. *Vliyanie komponentov inzhenerno-geologicheskikh usloviy na ustoychivost' bortov zhelezorudnykh kar'erov pri dlitel'noy ikh razrabotke* [The influence of the components of engineering-geological conditions on the stability of the sides of iron ore quarries during their long-term development], Candidate's thesis, Moscow, RGGRU, 2018, 26 p.

2. Kozыrev A. A., Onuprienko V. S., Zhukova S. A., Zhuravleva O. G. Induced seismicity of rock mass: development of instrumental and methodological support to control seismicity at the Khibiny apatite-nepheline deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 9, pp. 19–26. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2020.09.02.

3. Petin A. N., Kramchaninov N. N., Pogorel'tsev I. A., Ukolov I. M. Assessment of anthropogenic impact on groundwater in the area of influence of Stary Oskol Gubkin industrial complex. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013, vol. 15, no. 3(3), pp. 949–953. [In Russ].

4. Gorbunova E. M., Besedina A. N., Kabychenko N. V., Batukhtin I. V., Petukhova S. M. Precision hydrogeological monitoring in technogenically disturbed conditions: organization, execution, and processing of experimental data. *Seismic Instruments*. 2021, vol. 57, no. 2, pp. 62–80. [In Russ]. DOI: 10.21455/si2021.2-4.

5. Gorbunova E. M., Besedina A. N., Kabychenko N. V., Batukhtin I. V., Petukhova S. M. Response of water-saturated reservoirs to a dynamic impact based on the data of groundwater-level monitoring by precision measurements. *Physics of the Earth*. 2021, no. 5, pp. 74–90. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002333721050070.

6. Batugin A. S. Geodynamic effects of the critically stressed state of the Earth's crust. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. S1, pp. 14–21. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-S1-14-21.

7. Bashkov V. I., Shtirts V. A., Eremenko A. A., Konurin A. I. Assessment of the geomechanical state of a rock mass during mass explosions at the rock burst hazardous ore deposit of Gornaya Shoria. *Fundamentalnie i prikladnie voprosy gornykh nauk*. 2015, vol. 2, no. 2, pp. 205–213. [In Russ].

8. Tianwei L., Hongwei Zh., Sheng L., Batugin A. S., Wiguo Zh., Qiang L., Sujun S. Application and development of the method of geodynamic zoning for forecasting the geodynamical danger at coal mines of China. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2018, no. 6, pp. 71–76. [In Russ]. DOI: 10.32454/0016-7762-2018-6-71-76.

9. Gorbunova E., Besedina A., Petukhova S., Pavlov D. Reaction of the underground water to seismic impact from industrial explosions. *Water*. 2023, vol. 15, article 1358. DOI: 10.3390/w15071358.

10. Huang L., Xu Y., Liu S., Gai Q., Miao W., Li Y., Zhao L. Research on the development law of pre-mining microseisms and risk assessment of floor water inrush: A case study of the wutongzhuang coal mine in China. *Sustainability*. 2022, vol. 14, article 9774. DOI: 10.3390/su14159774.

11. Lai X., Dai J., Xu H., Chen X. Multifield environmental analysis and hazards prevention of steeply inclined deep coal mining. *Advances in Civil Engineering*. 2021, vol. 2021, article 6651088. DOI: 10.1155/2021/6651088.

12. Kozыrev A. A., Batugin A. S., Zhukova S. A. Influence of water content on seismic activity of rocks mass in apatite mining in Khibiny. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 1, pp. 31–36. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.01.06.

13. Zhuravleva O. G., Zhukova S. A. Identification of instability periods during formation of undermined rock cavings in the tectonically stressed Khibiny massif. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. S5, pp. 100–106. [In Russ].

14. Besedina A. N., Kishkina S. B., Kocharyan G. G., Kulikov V. I., Pavlov D. V. Weak induced seismicity in the Korobkov iron ore field of the Kursk Magnetic Anomaly. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2020, vol. 3, pp. 12–24. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPR-PI20200302.

15. *Zheleznye rudy KMA: monografiya*. Pod red. V. P. Orlova, I. A. Shevyreva, N. A. Sokolova [Iron ores of KMA: monograph. Orlov V. P., Shevyrev I. A., Sokolov N. A. (eds.)], Moscow, Geoinformmark, 2001, 616 p.

16. Mokhov A. V. Hydrodynamic regime of groundwater in mining allotments of coal and shale mines. *Doklady Akademii nauk*. 2018, vol. 483, no. 1, pp. 68. [In Russ]. DOI: 10.31857/S086956520003414-8.

17. Kocharyan G. G., Kulikov V. I., Pavlov D. V. On the influence of massive explosions on the stability of tectonic faults. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2019, no. 6, pp. 49–58. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20190605.

18. Petukhova S. M., Gorbunova E. M. Deformation regimes of fluid-saturated reservoirs under seismic impact according to precision hydrogeological monitoring data (a review). *Dynamic Processes in Geospheres*. 2023, vol. 15, no. 4, pp. 44–59. [In Russ]. DOI: 10.26006/29490995_2023_15_4_44.

19. Kocharyan G. G., Zolotukhin S. R., Kalinin E. V., Panasyan L. L., Spungin L. L. Stress-strain state of the rock mass of the Korobkovsky iron ore deposit in the area of the zone of tectonic disturbances. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2018, no. 1, pp. 1–9. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20180102.

20. Leyzerovich S. G., Pomel'nikov I. I., Sidorchuk V. V., Tomaev V. K. *Resursovosproizvodnyashchaya bezotkhodnaya geotekhnologiya kompleksnogo osvoeniya mestorozhdeniy Kurskoy magnitnoy anomalii*. [Resource-reproducing waste-free geotechnology for the integrated development of deposits of the Kursk magnetic anomaly], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, 547 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Алексей Григорьевич¹ — аспирант,
младший научный сотрудник,

e-mail: ivanov.ag@idg.ras.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8051-4735,

Караваяв Артем Витальевич¹ — аспирант,
e-mail: karavaev.av@idg.ras.ru,

Федоров Андрей Юрьевич¹ — аспирант,
e-mail: fedorov.ayu@idg.ras.ru,

¹ Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского.

Для контактов: Иванов А.Г., e-mail: ivanov.ag@idg.ras.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.G. Ivanov¹, Graduate Student,
Junior Researcher,

e-mail: ivanov.ag@idg.ras.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8051-4735,

A.V. Karavaev¹, Graduate Student,
e-mail: karavaev.av@idg.ras.ru,

A.Yu. Fedorov¹, Graduate Student,
e-mail: fedorov.ayu@idg.ras.ru,

¹ Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics
of Russian Academy of Sciences, 119334, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.G. Ivanov, e-mail: ivanov.ag@idg.ras.ru.

Получена редакцией 27.06.2024; получена после рецензии 30.10.2024; принята к печати 10.03.2025.

Received by the editors 27.06.2024; received after the review 30.10.2024; accepted for printing 10.03.2025.