

УДК 550.8.05

ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ МАССОВЫХ ВЗРЫВОВ, ВЫДЕЛЕННЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КМА

© 2022 г. Э. М. Горбунова^{1,*}, А. Н. Беседина¹, Н. В. Кабыченко¹,
И. В. Батухтин¹, С. М. Петухова^{1,**}

¹Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

*E-mail: emgorbunova@bk.ru

**E-mail: softya.petukhova@gmail.com

Для оценки геодинамической и геоэкологической безопасности эксплуатации месторождений особую значимость приобретают работы, связанные с изучением влияния массовых взрывов на фильтрационные свойства водонасыщенного коллектора. Использование высокоточных датчиков давления, установленных в наблюдательных скважинах, способствует переходу на новый уровень научно-методического сопровождения горных работ и обеспечивает мониторинг техногенно-нарушенного режима подземных вод. С июля 2019 г. в зоне горного отвода Коробковского и Лебединского железорудных месторождений Курской магнитной аномалии, разрабатываемых в районе г. Губкин Белгородской области, выполняются высокоточные наблюдения за реакцией системы «пласт-скважина» при взрывном воздействии. Наряду с гидрогеологическими откликами на проведение массовых взрывов в шахте и карьере прослежено снижение уровня надрудного водоносного горизонта в течение первых суток после взрывов, произведенных вблизи наблюдательной скважины. Отмеченный эффект обусловлен формированием техногенной трещиноватости, подновлением существующих систем трещин и заполнением зон наведенной трещиноватости водой. Результаты повторных откачек и геофизических исследований в скважинах, проведенные в октябре 2021 г., свидетельствуют о неоднозначном изменении фильтрационных свойств водонасыщенных коллекторов под влиянием массовых взрывов. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для разработки методики прогнозной оценки постсейсмических гидрогеологических эффектов, которая позволит минимизировать риски возможных аварий в процессе эксплуатации месторождений твердых полезных ископаемых с использованием взрывных технологий.

Ключевые слова: железорудное месторождение, массовые взрывы, сейсмическое воздействие, гидрогеологический отклик, водонасыщенный коллектор, система «пласт-скважина», постсейсмические эффекты, фильтрационные параметры.

Для цитирования: Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Кабыченко Н.В., Батухтин И.В., Петухова С.М. Постсейсмические эффекты массовых взрывов, выделенные при разработке железорудных месторождений КМА // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14. № 1. С. 51–68. http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_51.

Введение

Эксплуатация месторождений твердых полезных ископаемых сопровождается большим объемом дренажных работ, направленных на уменьшение водопритокков в горные выработки и карьеры. Интенсивный водоотбор приводит к изменениям скорости, направления и уклонов подземного потока, формированию локальных и региональных депрессионных воронок в разновозрастных водоносных горизонтах [Информационный..., 2021]. Одной из задач мониторинга месторождений твердых полезных ископаемых является разработка мероприятий по предотвращению негативных последствий влияния буровзрывных работ на массив горных пород и подземные воды [Требования..., 2000]. Повсеместно в пределах горнодобывающих предприятий выполняется контроль сейсмического воздействия на геологическую среду и окружающую инфраструктуру [Козырев, 1998; Жариков, Шеменев, 2013; Гриб

и др., 2015; Куликов, Павлов, 2016 и др.]. Однако влияние массовых взрывов на возможные изменения фильтрационных свойств водонасыщенных коллекторов не оценивалось. Вместе с тем по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод в различных регионах мира прослежено значительное количество гидрогеологических эффектов, вызванных прохождением сейсмических волн от землетрясений [Копылова, Болдина, 2020; Lai et al., 2014; Liao et al., 2015; Sun et al., 2015 и др.]. В опубликованных работах предложены различные механизмы постсейсмических вариаций уровня подземных вод, к которым может быть отнесена кольматация и декольматация магистральных трещин, трещинообразование, изменение газонасыщенности подземных вод в результате вибрационных эффектов и другие.

Оценка возможного изменения фильтрационных свойств коллекторов преимущественно основана на косвенном методе – приливном анализе. Рассматривается изменение значений фазового сдвига между приливными волнами, выделенными в смещении грунта и вариациях уровня подземных вод [Elkhoury et al., 2006; Xue et al., 2013 и др.]. Геолого-геофизические исследования, направленные на прямые измерения изменений основных параметров, выполняются в ограниченном объеме из-за сложности и высокой стоимости проведения работ. По комплексным направлениям исследований имеются единичные публикации [Allegre et al., 2016; Burbey et al., 2012]. Вместе с тем результаты работ, которые проводились в пределах месторождений твердых полезных ископаемых, разрабатываемых с использованием различных технологий, свидетельствуют о взаимосвязи между сейсмическим фоном и изменением гидрогеологических условий [Баранов и др., 2022; Lai et al., 2021]. В частности, по данным многолетнего сейсмического мониторинга, проводимого на рудниках Хибинского массива, активизация сейсмического режима удароопасных месторождений в весенние периоды может быть обусловлена увеличением обводненности массива горных пород из-за интенсивного снеготаяния и обильного выпадения осадков [Жукова и др., 2022]. На угольных месторождениях Китая также отмечен высокий коэффициент корреляции между вариациями водопритоков в горные выработки, напором подземных вод и сейсмичностью. Изменение интенсивности микросейсмического фона может рассматриваться в качестве одного из показателей потенциальной опасности прорыва подземной воды [Huang et al., 2022]. Соответственно, в пределах зон горного отвода недр необходимо наряду со стандартными методами наблюдений за техногенно-нарушенным режимом подземных вод предусматривать организацию высокоточных измерений вариаций уровня в наблюдательных скважинах и водопритоков в горных выработках.

Объектом исследований в рамках данной статьи является обводненная толща пород, залегающая в кровле рудовмещающего массива – архей-протерозойский водоносный комплекс Коробковского и Лебединского железорудных месторождений Курской магнитной аномалии (КМА). Основная цель исследований заключается в анализе механизмов постсейсмического снижения уровня подземных вод, приуроченных к надрудной толще, прослеженного при проведении взрывов в камерах Коробковского месторождения и блоках Лебединского карьера.

Геолого-гидрогеологические условия объекта исследований и характеристика пунктов наблюдений

Гидрогеологические условия Коробковского и Лебединского железорудных месторождений обусловлены особенностями геологического строения рудно-кристаллического массива. Над шахтным полем преимущественно распространены два водоносных горизонта, разделенные региональным водоупором – юрскими глинами мощностью до 30 м. Верхний водоносный горизонт приурочен к песчаным отложениям мела мощностью до 40 м. Нижний водоносный комплекс развит в породах архей-протерозоя, представленных железистыми кварцитами верхней железорудной подсвиты нижнего протерозоя (PR_1kr_3) и метаморфическими сланцами нижней железорудной подсвиты нижнего протерозоя (PR_1kr_1), прорванными интрузивными образованиями архея (AR_{1-2}) (рис. 1). В пределах кристаллического фундамента выделены разломы северо-западного и северо-восточного простирания разного ранга.

В рудовмещающем массиве распространены два типа подземных вод. Первый тип – трещинно-пластовые воды (приурочены к зоне экзогенного выветривания надрудной толщи мощностью 40–60 м).

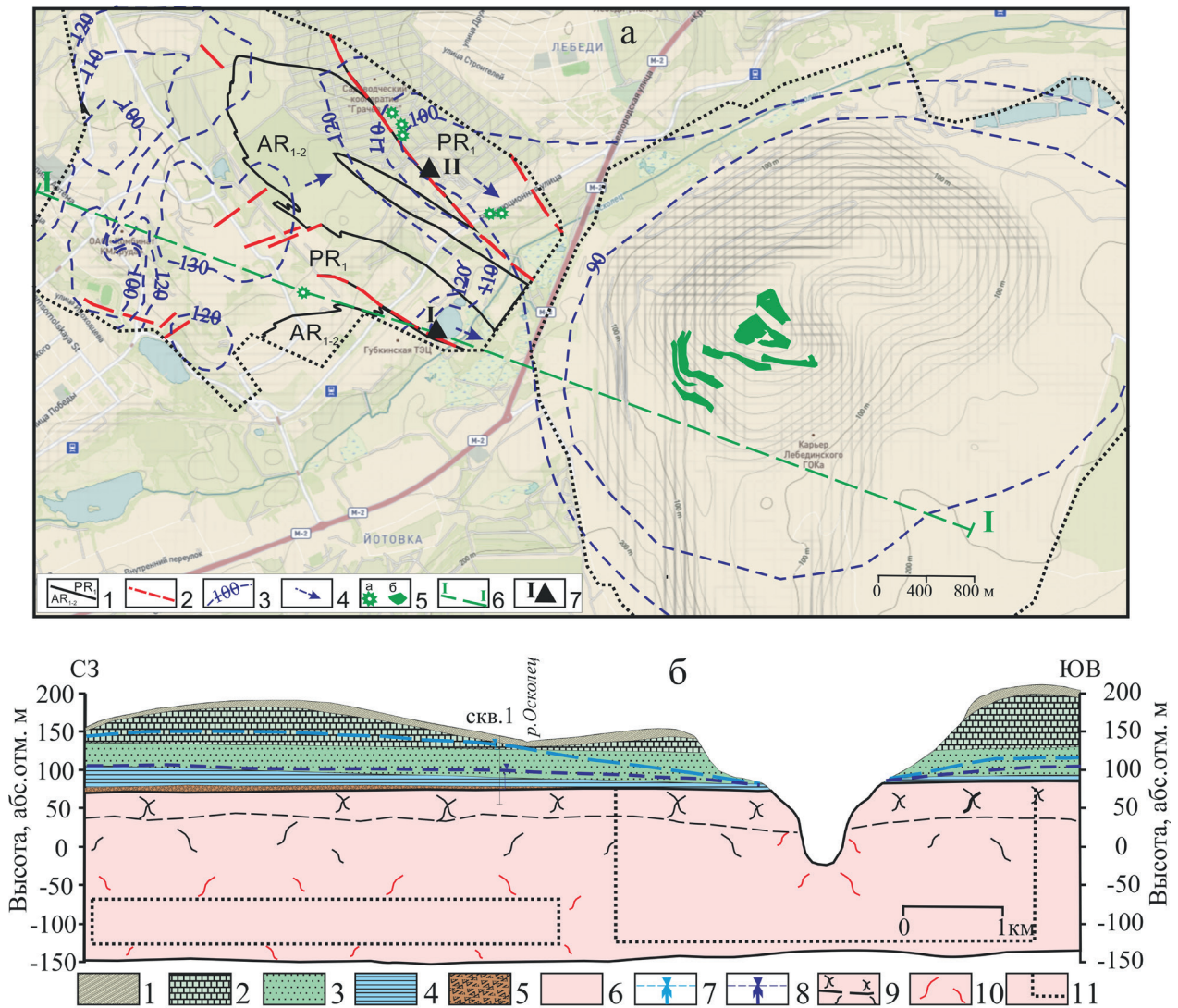


Рис. 1. Гидрогеологическая схема расположения пунктов наблюдений (а) и разрез (б):

а) 1 – геологическая граница; 2 – разлом; 3 – гидроизогипса, цифра – абсолютная отметка уровня воды, м; 4 – направление движения подземных вод; 5 – камера (а) и блок (б), при взрывах в которых зарегистрировано постсейсмическое снижение уровня архей-протерозойского водоносного комплекса; 6 – линия разреза; 7 – пункт наблюдений и номер;
 б) 1-5 – отложения: 1 – четвертичные, 2 – верхнемеловые, 3 – нижнемеловые, 4 – юрские, 5 – девонские, 6 – архей-протерозойские; 7 – уровень верхнего водоносного горизонта; 8 – уровень нижнего водоносного комплекса; 9 – зона экзогенной трещиноватости (вверху) и систем отдельных трещин (внизу); 10 – техногенная трещиноватость; 11 – контур разрабатываемых Коробковского (слева) и Лебединского (справа) месторождений (на схеме и разрезе)

Второй тип – трещинно-жильные воды (развиты в зонах тектонической трещиноватости и гидравлически взаимосвязаны с вышележащими трещинно-пластовыми водами). Проходка горных выработок и проведение взрывных работ сопровождается техногенной трещиноватостью, подновлением существующих систем трещин, которые могут быть частично обводнены за счет фильтрации трещинно-пластовых и трещинно-жильных вод.

Режим подземных вод техногенно-нарушенный. Наряду с региональной депрессионной воронкой, образованной в зоне влияния разрабатываемых железорудных месторождений КМА [Информационный, 2021], в пределах залежей шахтного поля сформированы локальные депрессионные воронки. Водонасыщенные породы мела и архей-протерозоя сдренированы по контуру Лебединского карьера.

Измерения уровня подземных вод проводятся в двух пунктах наблюдений. Первый пункт включает две скважины, вскрывающие обводненные песчаные отложения мела (скв. 2) и сланцы нижней

железородной подсвиты нижнего протерозоя (PR_1kr_1) (скв. 1), второй – одну скважину, оборудованную на кварциты магнетитовые верхней железородной подсвиты нижнего протерозоя (PR_1kr_3) (скв. 3). Пункт наблюдений I расположен на расстоянии 1.2 км от западного борта Лебединского карьера, пункт II удален от борта карьера на расстояние 1.5 км. Пункт наблюдений I находится в пределах Юго-Восточной залежи на эпицентральной расстоянии 1.0 км от ближней камеры, в которой производятся массовые взрывы, пункт II в Стретенской залежи – на расстоянии 0.3 км от ближней камеры. Расстояние между двумя пунктами составляет ~1.3 км (рис. 1).

Уклоны подземного потока в створе «пункт наблюдений I – карьер» составляют 0.021–0.022, в створе «пункт II – карьер» – 0.016–0.017. За 2.5 года наблюдений в пункте I прослежен общий тренд снижения уровня на 2 м в верхнем горизонте (скв. 2), приуроченном к песчаным отложениям мела, и на 1 м в нижнем комплексе, развитом в сланцах архей-протерозоя (скв. 1) (рис. 2). Сезонные вариации уровня верхнего горизонта изменяются от 0.8 до 2 м, нижнего – не превышают 0.5–0.6 м. В пункте II амплитуда годовых вариаций уровня нижнего архей-протерозойского водоносного комплекса составляет 1.0–1.2 м (скв. 3). Сезонный ход уровня слабо выражен.

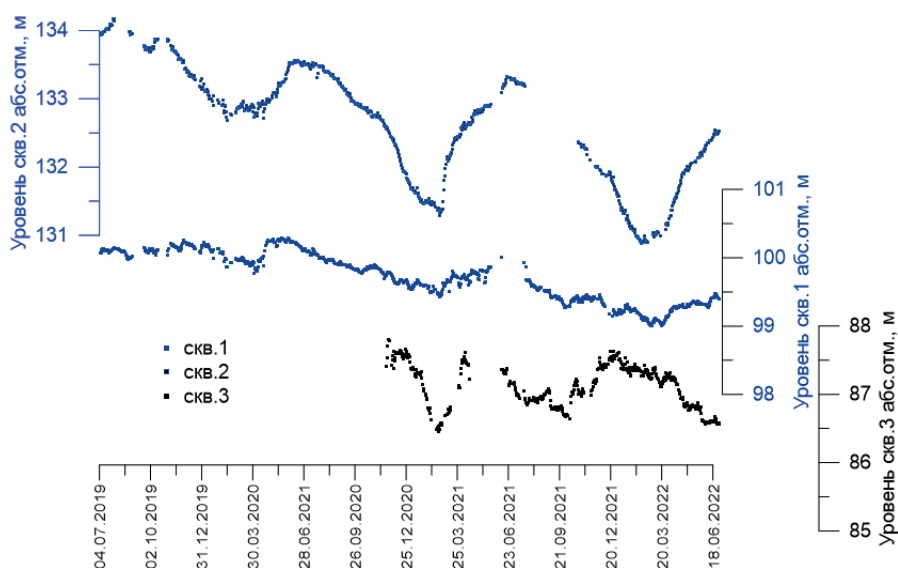


Рис. 2. Диаграмма вариаций уровней подземных вод: пункт I – скважины 1 и 2; пункт II – скважина 3

В естественных условиях (относительно ненарушенных) основное направление движения подземного потока архей-протерозойского водоносного комплекса северо-восточное. Уклон подземного потока изменяется от 0.007 до 0.008. Наибольшие значения уклона подземного потока прослежены в феврале-марте и июле 2021 г., наименьшие – зимой 2022 г.

По результатам гидрогеологического опробования, проведенного в июле 2019 г., водоносный горизонт, приуроченный к кварцитам магнетитовым (PR_1kr_3), характеризуется меньшей водообильностью по сравнению с водоносным горизонтом, развитым преимущественно в сланцах (PR_1kr_1) (табл. 1). Водопроницаемость кварцитов не превышает 0.2 м²/сут, водопроницаемость сланцев составляет 3.8 м²/сут.

Методика измерений и обработки экспериментальных данных

В промышленном регионе КМА на восточной окраине г. Губкин организованы два пункта наблюдений. В состав аппаратурно-измерительных комплексов, которыми укомплектованы пункты наблюдений, входят датчики гидростатического давления Keller PR-36XW, атмосферного давления Keller PAA-33X, короткопериодные сейсмометры СПВ-3К, 6-канальные станции REFTEK-130 и Centaur CTR4-6S с частотой опроса 200 Гц, GPS-модули [Батухтин, 2022]. По двум пунктам наблюдений с ноября 2020 г. сформирована база синхронных гидрогеологических, сейсмических и барометрических

Технические характеристики скважин и расчетные гидрогеологические параметры

№ пункта наблюдений	№ скважины	Индекс горизонта (водовмещающие породы)	Радиус обсадки скважины, м	Радиус скважины, м	Интервал водоприемной части скважины I/II этапы, м	Интервал обводненной части, м	Вскрытая мощность пласта, м	Интервал водопритока по резистивиметрии I/II этапы, м	Уровень установившийся I/II этапы, м	Величина напора I/II этапы, м	По данным откачки I/II этапы		По данным приливного анализа I/ II этапы		
											Удельный дебит q, л/с	Водопроводимость, м ² /сут	Фазовый сдвиг, °	Водопроводимость, м ² /сут	Проницаемость, м ²
1	636	K ₁₋₂ al-s (песок)	$\frac{0.0635}{0.0540}$	$\frac{37.0-51.7}{-}$	$\frac{14.5-53.5}{39.0}$	слабый	$\frac{7.8}{9.3}$	$\frac{6.7}{5.2}$	$\frac{0.10^{\pm}}{-}$	$\frac{10.0}{-}$	-	-	-	-	-
	633	PR ₁ kr ₁ (сланец)	$\frac{0.0635}{0.0540}$	$\frac{77.1-90.1}{77.1-85.9}$	$\frac{68.1-90.1}{22.0}$	$\frac{77.1-80.0;}{84.0-86.0}$ неравномерный	$\frac{41.5}{42.3}$	$\frac{26.6}{25.8}$	$\frac{0.44}{0.56}$	$\frac{3.8}{3.8}$	$\frac{-12...-19}{-3...-8}$	$\frac{0.4-0.7}{1.1-1.9}$	$\frac{(2.7-4.5) \cdot 10^{-14}}{(0.8-1.3) \cdot 10^{-13}}$		
2	632	PR ₁ kr ₃ (кварцит)	$\frac{0.0635}{0.0465}$	$\frac{110.4-140.9}{110.4-139.2}$	$\frac{108.2-}{138.4}$ 30.2	не отмечен 110.5-116.5; 133-139.2	$\frac{82.6}{83.9}$	$\frac{25.6}{24.3}$	$\frac{0.04}{0.08}$	$\frac{0.2}{0.4}$	$\frac{-73...-76}{-26...-29}$	$\frac{0.02-0.03}{0.2-0.3}$	$\frac{(0.8-1.3) \cdot 10^{-15}}{(1.1-1.3) \cdot 10^{-14}}$		

*По паспорту скважины 2002 г.

измерений. Имеющиеся массивы экспериментальных данных использованы для определения фоновых параметров водонасыщенных коллекторов.

Результаты систематизации гидрогеологических и сейсмических откликов, зарегистрированных с декабря 2020 г. по июнь 2022 г. при проведении массовых взрывов, представлены в таблицах и диаграммах [Свидетельство..., 2021]. На сейсмограммах скорости смещения грунта и диаграммах вариаций давления в системе «пласт-скважина» определены максимальные значения амплитуд, измеренные между последовательным максимумом и минимумом в скользящем окне длительностью 0.05 с с перекрытием 50%. Для сопоставления экспериментальных данных, полученных в двух пунктах наблюдений, рассчитана массовая скорость смещения грунта:

$$\bar{V}_{\max} = \left| \sqrt{V_Z^2 + V_N^2 + V_E^2} \right|, \quad (1)$$

где V_Z , V_N , V_E – максимальные амплитуды скорости смещения грунта по трем компонентам.

Приведенное расстояние оценивалось как отношение эпицентрального расстояния между пунктом наблюдений и местом взрыва к максимальному количеству взрывчатого вещества (ВВ) в ступени замедления (подрыв группы зарядов при короткозамедленном взрыве; при этом группы зарядов взрываются в определенной последовательности через заданные промежутки времени, измеряемые обычно в мс). Сейсмический эффект взрыва зависит от технологии массового короткозамедленного взрывного разрушения горных пород [Кишкина, 2002]. При подземной разработке Коробковского железорудного месторождения массовые взрывы выполнялись в 1–4 камерах с интервалом от 25 сек до 1 мин 32 сек на глубине от 250 до 300 м от поверхности. При проведении взрывов в Лебединском карьере взрывались от 1 до 9 блоков в группе в интервале глубин 200...–315 м.

Определение коэффициента барометрической эффективности выполнено с использованием широко распространенного метода линейной регрессии между вариациями уровня подземных вод и атмосферным давлением [Turnadge et al., 2019] согласно гидрогеостатической модели, представленной в работах [Волейшо, 2005; Штенгелов и др., 2017]. Очистка уровня от влияния атмосферного давления проведена путем вычитания проекции вектора атмосферного давления из исходного вектора уровня при рассмотрении рядов данных в качестве многомерных векторов. Этот метод детально описан в работах [Кабыченко, 2008]. Согласно предположению о линейной связи между уровнем воды и атмосферным давлением очищенную запись уровня, обозначенную функцией $y(t)$, можно представить в виде:

$$y(t) = f(t) - K \cdot g(t) \quad (2)$$

где $f(t)$ – функция уровня воды, $g(t)$ – функция атмосферного давления, K – константа, которая определяется методом наименьших квадратов. Так как уровень воды и атмосферное давление являются временными рядами, то K может быть определено по следующей формуле:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^n g_i \cdot g_i} \quad (3)$$

Для выделения основных типов суточных и полусуточных приливных волн был применен спектральный анализ гидрогеологических данных в диапазонах частот 8–36 часов соответственно. Для оценки теоретической объемной деформации и смещения грунтов по вертикальной компоненте с учетом координат пунктов наблюдений (пункт I – 51° 16' 58.7'' с.ш. 37° 35' 09.7'' в.д., пункт II – 51° 17' 39.5'' с.ш. 37° 35' 12.9'' в.д.). По данным спектрального анализа в вариациях уровня нижнего водоносного комплекса и объемной деформации пород в заданных диапазонах частот определены амплитуды основных типов приливных волн (полусуточных – S_2 , M_2 и суточных – K_1 , O_1). Для оценки водопроводимости и проницаемости водонасыщенных коллекторов в соответствии с пороупругой

моделью, представленной в работе [Hsieh et al., 1987], используется анализ фазового сдвига между полусуточной приливной волной лунно-солнечного типа M_2 , наиболее устойчиво проявляющейся в смещении грунта и вариациях уровня архей-протерозойского водоносного комплекса [Горбунова и др., 2021].

Основное внимание уделено анализу постсейсмических эффектов, выделенных в ежемесячных рядах вариаций уровня архей-протерозойского водоносного комплекса, очищенных от влияния атмосферного давления и земных приливов, в течение первых суток после проведения массовых взрывов. Удаление колебаний проводилось путем применения режекторного (полосно-заграждающего) фильтра Баттерворта второго порядка в диапазоне периодов 8–36 ч. По результатам обработки экспериментальных данных определены продолжительность и амплитуды снижения уровня. В наблюдательных скважинах, расположенных в пунктах I и II, проведены пробные откачки и комплекс геофизических исследований в два этапа. Первый этап – в начале организации измерений, в июле 2019 г. Второй этап – через 2.3 года, в октябре 2021 г. Геофизические исследования включали гаммаметрию, кавернометрию, электрометрию, резистивиметрию и телеметрию ствола скважин.

Сравнительный анализ полученного материала по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга и выполненным работам в скважинах использован для оценки изменений фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора.

Результаты исследований и обсуждение

Разрабатываемые Коробковское и Лебединское железорудные месторождения представляют собой сложную природно-техногенную систему, включающую шахтное поле, карьер, дренажные установки и сооружения по закачке промышленных отходов. За период наблюдений 01.12.2020–30.06.2022 гг. в двух пунктах наблюдений зарегистрированы косейсмические отклики в вариациях давления архей-протерозойского водоносного комплекса, вызванные проведением 50 массовых взрывов в шахте и 25 массовых взрывов в карьере (рис. 3).

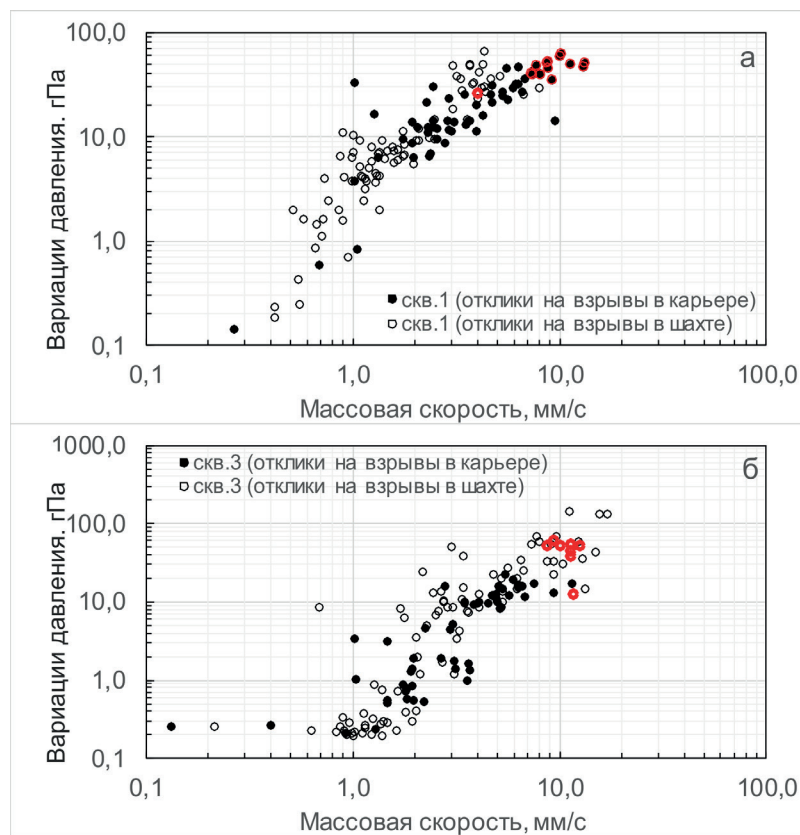


Рис. 3. Зависимость изменения давления воды в системе «пласт-скважина» от массовой скорости смещения грунта в пункте I скважина 1 (а) и пункте II скважина 3 (б) при взрывах в шахте и карьере (красными кружками выделены значения, при которых прослежены постсейсмические снижения уровня подземных вод)

В пункте I максимальные амплитуды вариаций давления до 65 гПа в скважине 1 прослежены при взрывах блоков в Лебединском карьере при массовой скорости смещения грунта до 13.3 мм/с и в камерах при скорости смещения грунта 3.0–5.4 мм/с (рис. 3а). В пункте II максимальные значения амплитуд гидрогеологических откликов до 145.7 гПа в скважине 3 и скорости смещения грунта до 17 мм/с зарегистрированы при проведении взрывов в камерах (рис. 3б). В двух пунктах выдерживается ранее установленная зависимость интенсивности гидрогеологических откликов от максимальной скорости смещения грунта. В скважине 1 вариации давления воды в системе «пласт-скважина» от массовой скорости смещения грунта при взрывах в шахте и карьере за период наблюдений 2019–2020 гг. описываются зависимостями $P = 672.7V^{1.4}$ и $P = 360.4V^{1.2}$ соответственно [Горбунова и др., 2021].

Постсейсмический эффект в виде скачкообразного снижения уровня подземных вод установлен в пункте I при взрыве 13 групп блоков, расположенных в западном борту Лебединского карьера, при максимальных значениях скорости смещения грунта и амплитуде вариаций давления в системе «пласт-скважина». Амплитуды снижения уровня, очищенного от влияния атмосферного давления и земных приливов, изменяются от 6 до 22 мм (табл. 2). Продолжительность снижения уровня составляет 25–65 минут (рис. 4).

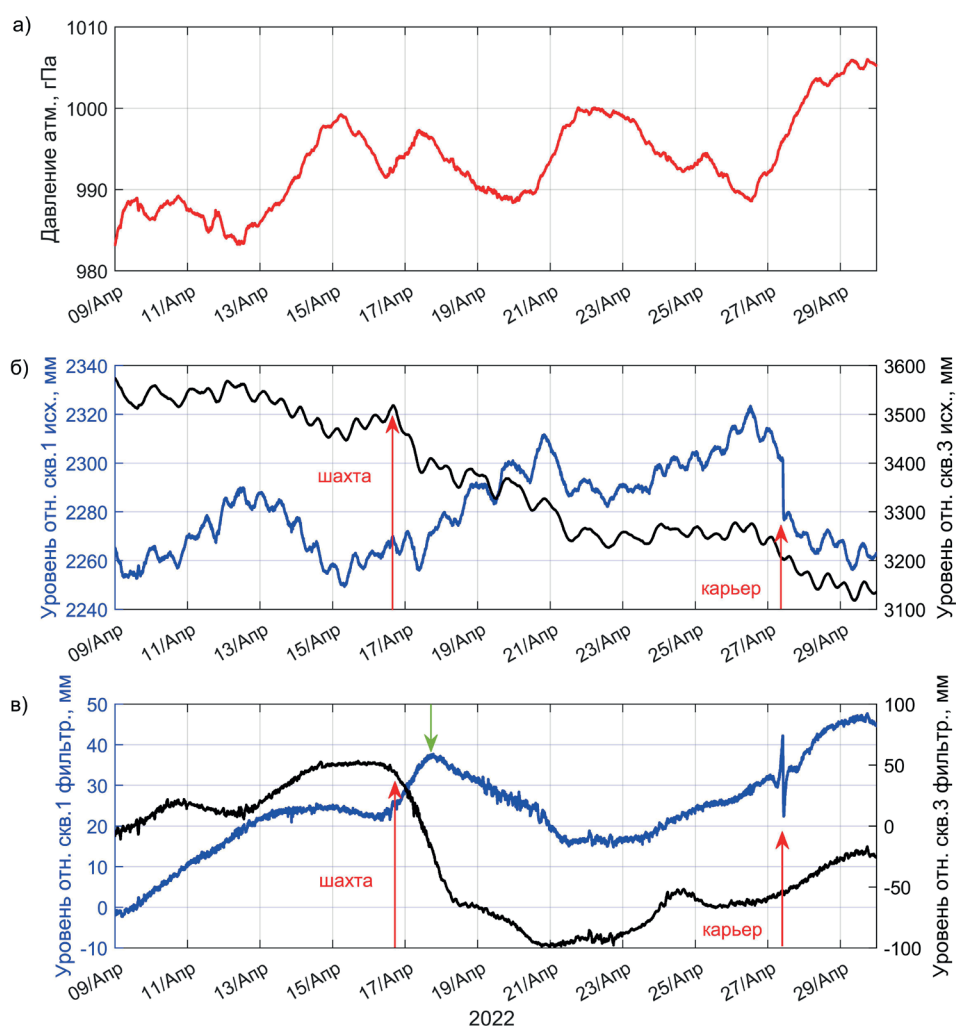


Рис. 4. Диаграммы вариаций атмосферного давления (а), уровня исходного (б) и очищенного от влияния атмосферного давления и колебаний в диапазоне 8–36 ч (в); красной стрелкой обозначен момент взрыва, зеленой – отклик на взрыв в скважине 1, проявившийся с запаздыванием

Таблица 2

Информация по взрывам групп блоков в Лебединском карьере, при которых зарегистрировано постсейсмическое снижение уровня архей-протерозойского водоносного комплекса в скважине 1 в пункте наблюдений I

№	Дата № взрыва	Данные по взрывам групп блоков						Скорость массовая, мм/с	Амплитуда гидрогеоло- гического отклика, гПа	Амплитуда снижения уровня, мм		Время снижения, мин
		Место взрыва	Кол-во блоков	Интервал от-до, м	Средняя масса ВВ, т (max)	Расстояние				исходная	без давления и приливов	
						R _{min} , м	R, м/кг ^{1/3}					
1	02.12.2020 337/2	З	4	-210...-285	4.89	2193	129	7.73	48.5	17	14	25
		Ю-З	1	-210...-225	3.32	2930	196					
		Ц	1	-165...-180	2.31	3225	244					
2	27.01.2021 27/1	В	3	-165...-255	5.79	3117	174					
		З	4	-210...-285	3.86	2485	158	8.84	52.4	16	15	46
		Ю-З	1	-225...-240	3.41	2995	199					
3	19.03.2021 78/1	Ю-В	1	200-175	0.23	4510	736					
		З	4	-225...-285	7.73	2453	124	10.26	61.6	32	14	30
4	28.04.2021 118/1	З	1	-270...-285	8.18	2660	132	10.06	58.5	12	9	30
		В	1	-277...-270	6.93	3407	179					
		Ц	2	-180...-195	5.82	2980	166					
		С	1	-120...-135	1.42	3510	312					
5	25.08.2021 237/1	В	3	-225...-270	4.81	3226	191					
		З	4	-255...-300	3.55	2780	182	8.74	50.3	16	13	52
		Ц	2	-195...-225	3.62	2859	186					
6	22.09.2021 237/1	З	3	-225...-300	8.79	2403	116	8.82	45.8	22	22	65
		В	3	-195...-210	5.87	3051	169					
		С	1	-145...-150	2.34	2765	208					
7	08.12.2021 342/1	З	1	-95...-105	1.82	1907	156	7.32	40.7	11	10	55
8	16.02.2022 47/1	З	2	-270...-315	5	2525	148	9.22	35.1	8	7	40
		В	4	-195...-285	5.9	3327	184					
		С	1	-180...-195	3.5	3025	199					

9	<u>09.03.2022</u> 68/1	3	7	-210...-315	5.31	2648	152	11.26	48.7	12	9	30
10	<u>30.03.2022</u> 89/2	3	1	-120...-135	2.02	2040	161	8.08	39.2	6	6	30
		Ц	1	15-0	3.28	3884	261					
		B	1	75-60	1.95	4790	383					
11	<u>27.04.2022</u> 117/1	B	1	-270...-285	4.22	3156	195					
		3	5	-225...-315	6.39	2680	144	13.05	46.6	25	20	30
12	<u>18.05.2022</u> 138/3	3	2	15...-60	5.41	2055	117	13.32	50.3	16	12	35
13	<u>08.06.2022</u> 159/2	3	2	-105...-150	3.47	1988	131	10.4	68.8	17	13	50
		3	3	15...-45	2.39	1751	131					

Прямой зависимости значений постсейсмического снижения уровня от максимальной массы ВВ и массовой скорости не прослеживается. Следует отметить, что амплитуда снижения уровня имеет меньшие значения в периоды паводка, которые соответствуют наибольшей обводненности массива, при сопоставимых значениях сейсмического воздействия на массив (данные за 19.03.2021 и 28.04.2021 гг., 27.04.2022 и 17.05.2022 гг.). Напротив, в межennyй период (27.01.2021 г., 25.08.2021 г. и 22.09.2021 г.) амплитуда снижения уровня подземных вод для близких значений массовой скорости смещения грунта от взрывов увеличивается. Подобный постсейсмический эффект в виде скачкообразного снижения уровня на 5 мм отмечен в пункте I при взрыве камеры 31/3юв Юго-Восточной залежи 14.08.2021 г. на приведенном расстоянии $103 \text{ м/кг}^{1/3}$ (рис. 5).

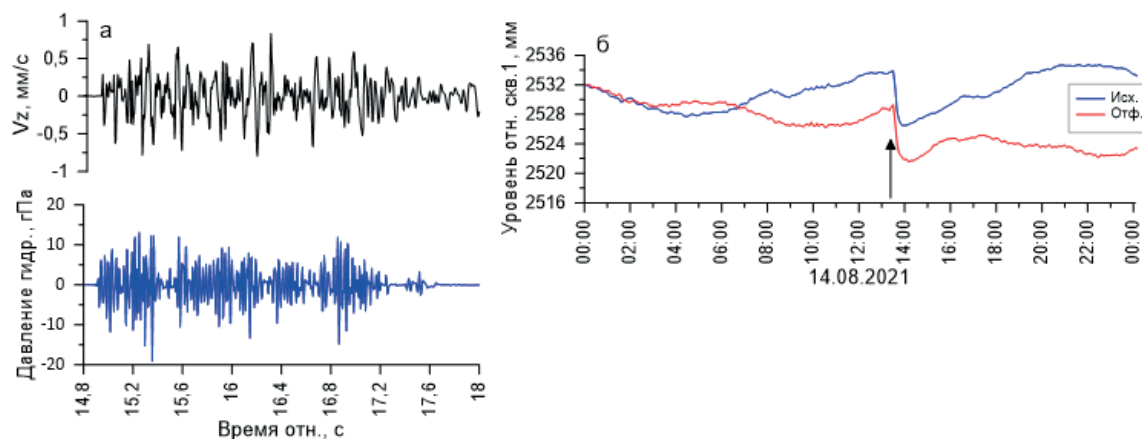


Рис. 5. Косейсмические (а) и постсейсмические (б) вариации в пункте наблюдений I при взрыве 14.08.2021 г. на приведенном расстоянии $103 \text{ м/кг}^{1/3}$, черной стрелкой обозначен момент взрыва

Таблица 3.

Информация по взрывам в камерах шахты, при которых зарегистрировано постсейсмическое снижение уровня архей-протерозойского водоносного комплекса в скважине 3 в пункте наблюдений II

№	Дата	№ взрыва	№ камеры	Время детонации, с	Расст-е приведен., $\text{м/кг}^{1/3}$	Скорость массовая, мм/с	Ампл-да гидрогеологического отклика, гПа	Амплитуда снижения уровня, мм		Время сниж., сут	Примечание
								исходная	без давления и приливов		
1	05.12.2020	340/2	1/7ст	350	75	11.28	55.07	120	41	2.8	вз. в камерах ниже по направл. подземного потока
2	19.12.2020	354/2	1/7ст	1000	64	11.36	45.48	102	26	2.1	
3	06.02.2021	37/1	1/7ст	1000	64	10.03	52.17	26	-	-	
4	03.07.2021	184/2	1/7ст	1060	67	12.57	52.35	220	49	5	
5	04.09.2021	247/2	1/7ст	2000	64	11.31	37.84	250	95	3	
6	16.01.2021	16/1	1/24ст	1000	22	16.95	134.59	6	5	0.1	вз. в камерах выше по потоку
7	28.08.2021	240/1	1/25ст	600	35	11.14	145.70	2	2	0.1	
8	05.03.2022	64/1	1/27ст	3100	40	3.0	50.38	4	3	0.5	
9	16.04.2022	106/3	0/8ст	9850	70	8.76	52.17	287	146	6.1	ниже по потоку
					114	4.00	26.08	-	21	5	в скважине 1 в пункте I

В пункте II постсейсмическое снижение уровня подземных вод в скважине 3 при взрыве блоков в Лебединском карьере не установлено. Напротив, при проведении пяти взрывов в камере 1/7 ст и одного взрыва в камере 0/8ст, расположенных в пределах одной залежи с пунктом наблюдений II (рис. 1, табл. 3), прослежено плавное снижение уровня архей-протерозойского водоносного комплекса на 2–15 см на протяжении 2–6 суток (табл. 3). Рассматриваемые камеры расположены ниже по направлению подземного потока, юго-восточнее по отношению к пункту наблюдений II, на приведенных расстояниях 64–75 м/кг^{1/3}. При взрывах в камерах, расположенных северо-западнее пункта II, на меньших приведенных расстояниях 22–40 м/кг^{1/3}, выше по направлению подземного потока, амплитуда снижения уровня не превышает 2–5 мм в течение 2–12 часов.

Зависимости амплитуды постсейсмического снижения уровня от приведенного расстояния не отмечено. Увеличение амплитуды и продолжительности снижения уровня прослеживается в процессе дальнейшей разработки камеры 1/7ст с декабря 2020 г. при проведении взрывов на приведенном расстоянии 64 м/кг^{1/3} (табл. 3). Это косвенно подтверждает подновление (активизацию) естественной и техногенной трещиноватости. Отмеченная закономерность сопоставима с результатами измерений трещиноватости в горных выработках и наблюдений, проведенных при формировании магистрального разрыва в пределах Кукисвумчоррского месторождения и изменении конфигурации Юкспорского обрушения, связанных с увеличением объема горных работ в пределах Хибинского массива [Жукова и др., 2022].

Следует отметить, что при взрыве в камере 0/8ст постсейсмическое снижение уровня архей-протерозойского водоносного комплекса установлено не только в пункте II, но и в пункте I (рис. 4). Через 1 сутки зарегистрировано снижение уровня на 2.1 см в скважине 1 в течение 5 суток (табл. 3).

Реакция обводненной рудно-кристаллической толщи как единой гидрогеологической системы может быть использована для предварительной оценки объема техногенной трещиноватости, сформированной в массиве при проведении взрыва. Графики временного прослеживания снижения уровня свидетельствуют о наступлении квазистационарного режима фильтрации, в условиях которого коэффициент пьезопроводности, характеризующий скорость развития депрессии, рассчитывается по формуле [Боревский и др., 1979]:

$$a \geq \frac{2.5R^2}{t_0}, \quad (4)$$

где R – радиус зоны квазистационарного режима, м; t_0 – время наступления квазистационарного режима, сут.

Коэффициент упругой водоотдачи пласта (μ^*) оценивается как:

$$\mu^* = \frac{km}{a}, \quad (5)$$

где km – водопроводимость пласта, м²/сут, представляющая собой расход жидкости через единицу поперечного сечения водоносного горизонта мощностью m при единичном градиенте напора; здесь k – коэффициент фильтрации, м/сут.

При постоянном притоке воды по контуру депрессионной воронки, сформированной при взрыве, объем поступившей воды (V) будет пропорционален максимальному снижению уровня (S), площади формирования техногенно-нарушенного режима подземных вод (F) и коэффициенту упругой водоотдачи пласта (μ^*):

$$V = S \cdot F \cdot \mu^* \quad (6)$$

Соответственно, при эпицентральной дистанции 1100 м в створе «камера 0/8ст – скважина 1»

коэффициент пьезопроводности (α) составит $3 \cdot 10^6$ м²/сут, коэффициент упругой водоотдачи пласта (μ^*) с учетом данных по пробной откачке, проведенной в скважине 1 на II этапе (табл. 1), будет равен $1.3 \cdot 10^{-6}$. Тогда объем воды, поступившей на заполнение зон наведенной трещиноватости, или объем сформированной трещиноватости при взрыве, составит 0.15 м³.

Результаты повторных откачек и геофизических исследований в наблюдательных скважинах подтверждают неоднозначное изменение фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора под влиянием массовых взрывов, произведенных за 2.3 года измерений. По графикам прослеживания восстановления уровня после откачек в скважине 1 водопроводимость сланцев надрудной обводненной толщи уменьшилась от 7.7 до 5.5 м²/сут, по удельной водоотдаче пласта осталась без изменений 3.8 м²/сут. В скважине 2 водопроводимость кварцитов по графикам прослеживания восстановления уровня после откачек увеличилась от 1.4 до 1.7 м²/сут, по удельной водоотдаче пласта – от 0.2 до 0.4 м²/сут.

По результатам предварительной обработки данных прецизионного мониторинга, полученных за 2.3 года наблюдений, проницаемость пород надрудной толщи изменилась. Проницаемость сланцев увеличилась от $(2.7-4.5) \cdot 10^{-14}$ до $(0.8-1.3) \cdot 10^{-13}$ м², кварцитов – от $(0.8-1.3) \cdot 10^{-15}$ до $(1.1-1.3) \cdot 10^{-14}$ м² (табл. 1).

При сопоставлении результатов геофизических исследований, проведенных в июле 2019 г. и октябре 2021 г., в архей-протерозойском водоносном комплексе прослежено изменение интервалов водопритокков и их интенсивности. В нижнем водоносном комплексе, приуроченном к кварцитам, в скважине 632 в июле 2019 г. водоприток вдоль открытой части ствола скважины не был отмечен (рис. 6). В октябре 2021 г. (до проведения повторной откачки) были выделены две новые зоны водопитока мощностью 6 м в интервалах 110.5–116.5 и 133–139 м.

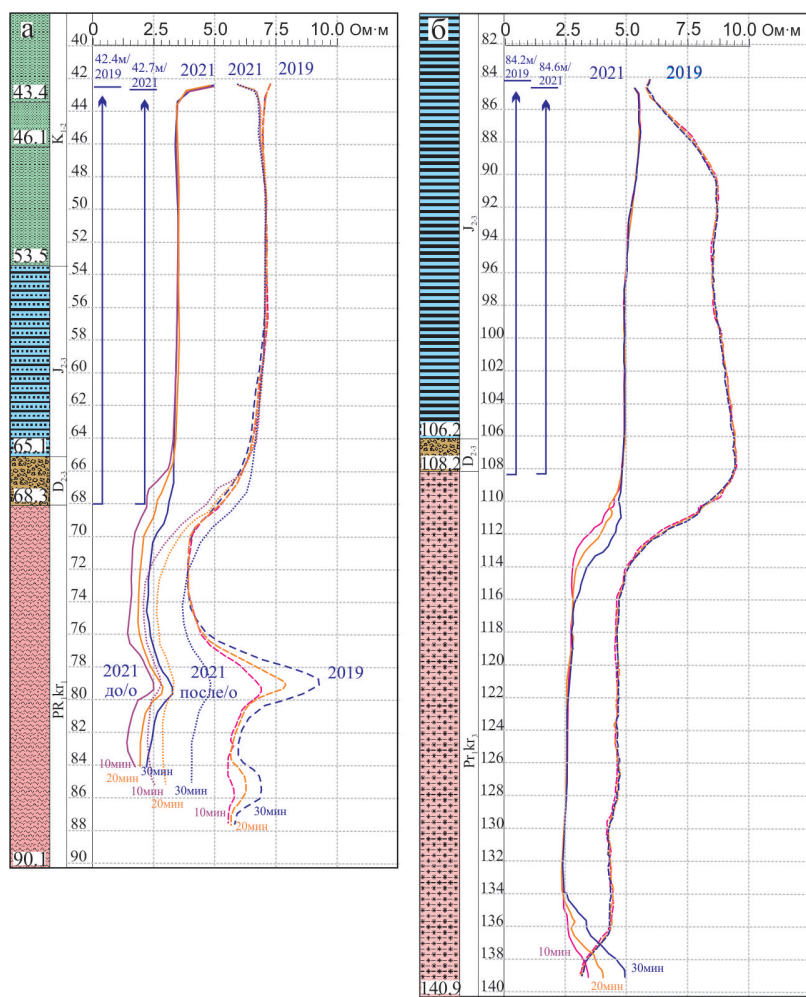


Рис. 6. Результаты резистивиметрии в открытой части ствола скважин 1 (а) и 3 (б)

В водоприемной части ствола скважины 1, представленной сланцами, вместо двух интервалов водоприитоков 77.0–80.0 м и 84.0–86.0 м, отмеченных в 2019 г. после проведения откачки, в 2021 г. (до и после откачки) установлено неравномерное распределение водоприитока вдоль всей водоприемной части скважины в интервале 67.9–85.9 м. Результаты резистивиметрии не противоречат данным, полученным при проведении пробных откачек, и подтверждаются другими видами геофизических исследований, проведенных в скважинах, – кавернометрией и телеметрией. Общая мощность обводненной части открытого ствола уменьшилась на 1.7 м в скважине 1 и на 4.2 м в скважине 3 в результате зашламованности забоя.

Физико-механические свойства водовмещающих пород определяют различие в изменении фильтрационных параметров под влиянием массовых взрывов. Метаморфизованные сланцы характеризуются более низкими прочностными параметрами по сравнению с кварцитами. Предел прочности на сжатие образцов сланцев кристаллических в воздушно-сухом состоянии не превышает 160 МПа, модуль сдвига составляет 21–24 ГПа, для кварцитов увеличивается до 400 МПа и 37–45 ГПа соответственно [Терминологический., 2011]. В пределах Коробковского железорудного месторождения породы нижней железорудной подсвиты в пункте I характеризуются более низкими значениями деформационных свойств (коэффициент Пуассона составляет 0.22, модуль Юнга 113 МПа) по сравнению с верхней железорудной подсвитой (коэффициент Пуассона 0.27, модуль Юнга 143 МПа) [Кочарян и др., 2018].

Вероятно, вид постсейсмических эффектов зависит от особенностей геологического строения разрабатываемого рудного тела, наличия разломов, локальных гидрогеологических условий и технологии проведения взрывных работ. В частности, при взрывах в Лебединском карьере может проявиться сдвиговая составляющая сейсмического воздействия взрывов на обводненную толщу пород нижней железорудной подсвиты, сложенной преимущественно метаморфизованными сланцами, которая выражается в скачкообразном снижении уровня подземных вод. В верхней железорудной подсвите, представленной преимущественно более прочными кварцитами, плавное снижение уровня, связанное с постепенным заполнением сформированных зон техногенной трещиноватости и подновлением природных трещин, прослеживается при проведении массовых взрывов в камерах, расположенных ниже по направлению подземного потока по отношению к пунктам наблюдений на приведенных расстояниях 64–75 м/кг^{1/3} при массовой скорости смещения грунта 8.8–12.6 мм/с.

Заключение

По результатам прецизионного гидрогеологического мониторинга, выполняемого в процессе эксплуатации Коробковского и Лебединского железорудных месторождений, разрабатываемых с использованием взрывных технологий, впервые установлен эффект постсейсмического снижения уровня подземных вод двух видов. Первый вид отмечен в пункте наблюдений I и представлен скачкообразным снижением уровня архей-протерозойского водоносного комплекса, приуроченного к сланцам нижней железорудной подсвиты: от 6 до 22 мм в течение первого часа (25–65 минут) при взрыве близкорасположенных блоков в западном борту карьера и взрыве в камере на приведенных расстояниях 116–182 и 103 м/кг^{1/3} соответственно. Второй вид – постепенное снижение уровня архей-протерозойского водоносного комплекса, развитого в кварцитах верхней железорудной подсвиты, на протяжении 0.1–6 суток зарегистрирован в пункте II, в единичном случае – в пункте I. Депрессионные мини воронки, сформированные после взрыва, имеют асимметричную форму. При проведении взрывов в камерах, которые находятся от пункта II ниже по направлению подземного потока на приведенном расстоянии 64–75 м/кг^{1/3}, снижение уровня изменяется от 2 до 15 см. При взрывах в камерах, расположенных выше по направлению подземного потока при меньших значениях приведенных расстояний 22–40 м/кг^{1/3}, снижение уровня не превышает 2–5 мм.

Подобные постсейсмические эффекты в виде вариаций напоров жидкости в отработанных камерах, используемых для захоронения отходов производства в виде пастообразной пульпы, были установлены

также при проведении взрывов в камерах, ближних к участку закачки [Лейзерович и др., 2012]. Прослеженные постсейсмические эффекты свидетельствуют об изменении фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора, которые подтверждены испытаниями, проведенными в наблюдательных скважинах. По данным резистивиметрии в надрудном водоносном горизонте зарегистрировано смещение интервалов водопритоков и изменение их интенсивности. По результатам повторных откачек и приливного анализа установлено изменение водопроводимости и проницаемости пород соответственно.

Отмеченные закономерности постсейсмических вариаций уровня подземных вод и предварительные оценки изменения фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора рекомендуется учитывать в процессе подземной и открытой разработок рудных залежей для минимизации негативных последствий проведения горных работ.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания (проект № 122032900172-5) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90016.

Благодарности

Авторы выражают благодарность главному гидротехнику АО «Комбинат КМАруда» С. А. Войнову за предоставленные геологические материалы и помощь в организации измерений; к.ф.-м.н. В. И. Куликову за информацию по основным параметрам массовых взрывов, проводимых при разработке Коробковского и Лебединского месторождений КМА.

Авторы также глубоко признательны рецензентам, чьи замечания позволили существенно улучшить изложение материала.

Список литературы

Батухтин И.В. Аппаратурно-измерительный комплекс для гидрогеологических наблюдений в зоне железорудного месторождения в г. Губкин // XXIII Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник научных материалов. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. 2022. С. 15–18.

Баранов С.В., Жукова С.А., Моторин А.Ю. Связь обводненности среды и повторяемости землетрясений в Хибинском массиве // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVI Международной сейсмологической школы. Минск. 2022. С. 19. ID 49401278.

Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра. 1979. 326 с.

Волейшо В.О. Закономерности формирования гидродинамического режима подземной гидросферы под воздействием региональных внешних факторов: Диссертация на соиск. уч. ст. д.г.-м.н. Пос. Зеленый. 2005. С. 362.

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. <https://doi.org/10.31857/S000233721050070>.

Гриб Н.Н., Гриб Г.В., Сясько А.А., Качаев А.В. Сейсмическое воздействие массовых взрывов на природно-технические объекты // Промышленная безопасность. 2015. № 2. С. 33–39.

Жариков С.Н., Шеменев В.Г. О влиянии взрывных работ на напряженное состояние горного массива и геодинамические явления // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 3. С. 90–97.

Жукова С. А., Журавлева О. Г., Онуприенко В. С., Стрешнев А. А. Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 7. С. 5–17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_5.

Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2020 год. Москва: ФГБУ «ГИДРОСПЕЦГЕОЛОГИЯ». 2021. Вып. 26. 161 с.

Кабыченко Н.В. Оценка фазового сдвига между приливной деформацией и вариациями уровня воды в скважине // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: Сб. научн. тр. ИДГ РАН. М. : ГЕОС, 2008. С. 62–72.

Кишкина С.Б. Сейсмический эффект массовых химических взрывов на карьерах Курской магнитной аномалии: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва. 2002. 137 с.

Козырев С.А. Сейсмическое действие подземных массовых взрывов на поверхностные сооружения // Вестник МГТУ. 1998. Т. 1. № 3. С. 123–126.

Копылова Г.Н., Болдина С.В. Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102–122. <http://doi.org/10.31857/S0002333720030035>.

Куликов В.И., Павлов Д.В. Оценка характеристик разлома на основе сейсмических и деформационных измерений // Динамические процессы в геосферах. Вып. 8. М. : ГЕОС. 2016. С. 69–85.

Кочарян Г.Г., Золотухин С.Р., Калинин Э.В., Панасьян Л.Л., Спунгин В.Г. 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.

Лейзерович С.Г., Помельников И.И., Сидорчук В.В., Томаев В.К. Ресурсовоспроизводящая безотходная геотехнология комплексного освоения месторождений Курской магнитной аномалии / Под научной редакцией чл.-кор. РАН Д.Р. Каплунова. М. : Издательство «Горная книга». 2012. 547 с.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621637 от 30.07.2021 г. («Синхронные сейсмические, гидрогеологические и барометрические измерения при проведении массовых взрывов на железорудном месторождении КМА в двух измерительных пунктах»).

Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии / Под ред. Е.М. Пашкина. М. : КДУ. 2011. 952 с.

Требования к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых. М. : МПР. 2000. 30 с.

Штенгелов Р.С., Филимонова Е.А., Шубин И.С. Обработка откачки из напорного водоносного горизонта при переменном дебите и атмосферном давлении // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. Геология. 2017. С. 50–58.

Allegre V., Brodsky E., Xue L., Nale S.M., Parker B.L., Cherry J.A. Using earth-tide induced water pressure changes to measure in situ permeability: A comparison with long-term pumping tests // Water Resources Research. 2016. P. 1–14. DOI: 10/1002/2015WR017346.

Burbey T.J., Hisz D., Murdoch L.C., Zhang M. Quantifying fractured crystalline-rock properties using well tests, earth tides and barometric effects // Journal of Hydrology. 2012. 414–415. P. 317–328.

Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C. Seismic Waves Increase Permeability // Nature. Letters. Vol. 441/29, June 2006. P. 1135–1138. DOI:10.1038/nature04798.

Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis // Water Resources Res. 1987. V. 23. P. 1824–1832.

Huang L., Xu Y., Liu S., Gai Q., Miao W., Li Y., Zhao L. Research on the formation mechanism of pre-mining microseismic and risk assessment of floor water inrush: a case study of the Wutongzhuang coal mine in China // Sustainability. 2022. 14. 9774. <https://doi.org/10.3390/su14159774>.

Lai G., Ge H., Xue L., Brodsky E., Huang F., Wang W. Tidal response variation and recovery following the Wenchuan earthquake from water level data of multiple wells in the near field // Tectonophysics. 2014. 619–620. P. 115–122.

Lai X., Dai J., Xu H., Chen X. Multifield environmental analysis and hazards prevention of steeply inclined deep coal mining // Hindawi Advances in Civil Engineering. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6651088>.

Liao X., Wang C.-Y., Liu C.-P. Disruption of groundwater systems by earthquakes // Geophys. Res. Lett. 42.

2015. P. 9758–9763. DOI:10.1002/2015GL066394.

Sun X., Wang G., Yang X. Coseismic response of water level in Changping well, China, to the Mw 9.0 Tohoku earthquake // *Journal of Hydrology*. 2015. 531. P. 1028–1039.

Turnadge C., Crosbie R.S., Barron O., Rau G.C. Comparing methods of barometric efficiency characterization for specific storage estimation // *Groundwater*. 2019. 57 (6). P. 844–859.

Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // *BIM*. 1994. № 118. P. 8719–8721.

Xue L., Li H.-B., Brodsky E.E., Xu Z.-Q., Kano Y., Wang H., Mori J.J., Si J.-L., Pei J.-L., Zhang W., Yang G., Sun Z.-M., Huang Y. Continuous Permeability Measurements Record Healing Inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone // *Science*. 2013. Vol. 340. P. 1555–1559.

POSTSEISMIC EFFECTS OF MASS EXPLOSIONS RECORDED DURING THE DEVELOPMENT OF KMA IRON ORE DEPOSITS

**E. M. Gorbunova^{1*}, A. N. Besedina¹, N. V. Kabychenko¹,
I. V. Batukhtin¹, S. M. Petukhova^{1**}**

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences

**E-mail: emgorbunova@bk.ru,*

***E-mail: softya.petukhova@gmail.com*

To evaluate the geodynamic and geoecological safety of field development, studies related to the assessment of the impact of mass explosions on the filtration properties of a water-saturated reservoir are of particular importance. Use of high-precision sensors installed in observation wells promotes the transition to a new level of scientific and methodological support of mining operations and provides monitoring of the technogenically disturbed groundwater regime. Since July 2019, within Korobkovsky and Lebedisky iron ore deposits of the Kursk Magnetic Anomaly (city of Gubkin, Belgorod Region) have been made a precise observations of the reaction of the «reservoir-well» system under explosion impact. Along with coseismic hydrogeological responses to the passage of seismic waves from mass explosions carried out in a mine and a quarry, decrease of level of supra-ore aquifer are traced. Marked effect are determined a formation and filling of zones of technogenic fracturing, renovation of existing cracks. The results of repeated pumping and geophysical well logs, carried out in October, 2021, indicate an ambiguous change in the filtration properties of water-saturated reservoirs under the influence of mass explosions. The obtained experimental data can be used to develop a methodology for predictive assessment of the postseismic effects, which will minimize the risks of possible accidents during the exploitation of hard mineral deposits with explosive technologies.

Keywords: iron ore deposits, mass explosions, seismic impact, hydrogeological response, water-saturated reservoir, “reservoir-well” system, postseismic effects, filtration properties.