

УДК 550.349+550.348

РЕАКЦИЯ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ (ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННОГО МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД)

© 2021 г. Э. М. Горбунова¹, *, А. Н. Беседина¹, Н. В. Кабыченко¹,
И. В. Батухтин¹, С. М. Петухова¹

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

*E-mail: emgorbunova@bk.ru

Поступила в редакцию 18.02.2021 г.

После доработки 04.04.2021 г.

Принята к публикации 05.04.2021 г.

В статье представлены результаты исследования режимов деформирования водонасыщенных коллекторов при динамическом воздействии по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод. В качестве квазистационарного фактора, определяющего фоновые пороупругие вариации уровня подземных вод в системе “пласт–скважина”, рассматриваются земные приливы. Гидрогеологические отклики на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений и массовых взрывов, производимых при разработке железорудного месторождения, используются для оценки относительной деформации водонасыщенных коллекторов. Объекты исследований расположены как вне зоны активного техногенного влияния на геологическую среду – на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН “Михнево”, так и в техногенно-нарушенных условиях – в пределах промышленного региона вблизи г. Губкин Белгородской области. Комплексная обработка данных синхронной регистрации сейсмических, барометрических и гидрогеологических сигналов аппаратно-измерительными комплексами, установленными в наблюдательных скважинах и на приустевых площадках, направлена на выделение общих закономерностей реакции водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие. Сравнительный анализ амплитуд вариаций уровня подземных вод и давлений в системе “пласт–скважина” выполнен с учетом значений скорости смещения грунта и приведенного расстояния от удаленных землетрясений и массовых взрывов. Реакция водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-порового типа различается. Наряду с косейсмическими гидрогеологическими эффектами отмечен постсейсмический подъем уровня и увеличение давления, которые свидетельствуют о локальном изменении фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора. Установлены максимальные значения скорости смещения грунта и давления в системе “пласт–скважина”, при которых прослежена смена режимов деформирования от пороупругой реакции к квазиобратимой.

Ключевые слова: водонасыщенный коллектор, динамическое воздействие, гидрогеологический отклик, массовая скорость, относительная деформация, аппаратно-измерительный комплекс.

DOI: 10.31857/S0002333721050070

ВВЕДЕНИЕ

Водонасыщенный коллектор – порода со сложной геометрией порово-трещинного пространства. Вариации уровня подземных вод в недренируемых условиях рассматриваются в качестве индикаторов динамического деформирования коллекторов под влиянием различных факторов, к которым могут быть отнесены как квазистационарные – земные приливы, так и эпизодическое сейсмическое воздействие от различных типов источников [Киссин, 2015].

Гидрогеологические отклики флюидонасыщенного коллектора обычно описываются двумя типами моделей напряжений: статической и ди-

намической. Модель статической деформации предполагает необратимые изменения свойств коллектора, вызванные распространением разрывов, сбросо- и взбросо-сдвигами в результате сейсмической активности, которые прослеживаются в виде косейсмических ступенеобразных и плавных изменений уровня подземных вод.

К моделям динамической деформации флюидонасыщенного коллектора, опирающимся на теорию пороупругости [Копылова, Болдина, 2019; Cooper et al., 1965; Hsieh et al., 1987], относится реакция порового давления на изменение напряженно-деформированного состояния минерального скелета горной породы и уровня под-

земных вод при вариациях порового давления. Механизм перераспределения порового давления в результате воздействия слабых сейсмических колебаний является достаточно сложным и все еще не ясен. Наиболее перспективными представляются модели, в которых эффект изменения проницаемости при небольших динамических напряжениях связывается:

– с декольматацией трещин за счет возникновения избыточного давления при прохождении сейсмического импульса [Brodsky et al., 2003];

– кольматацией трещин за счет формирования “микробарьеров” [Кочарян и др., 2010];

– вибрацией, вызванной сейсмическими волнами, которая может приводить к изменению проницаемости [Elkhoury et al., 2006].

На разных расстояниях от эпицентров землетрясений с учетом параметров очага и локальных гидрогеологических условий целесообразно рассматривать различные механизмы или сочетание механизмов деформирования флюидонасыщенного коллектора. Реакция подземных вод на землетрясения отмечена в многочисленных наблюдательных скважинах, пройденных на глубину до 4 км, и прослежена на эпицентральных расстояниях от 14 км до 10 тыс. км и более [Горбунова и др., 2018; Kitagawa et al., 2011].

Вместе с тем сведения о последствиях интенсивного техногенного воздействия на флюидонасыщенный коллектор ограничены. Имеется ряд публикаций о реакции подземных вод на крупномасштабные взрывы [Адушкин и др., 1990; Geologic..., 1971; Nassan et al., 2002], которые преимущественно зарегистрированы в зоне высоких амплитуд воздействия, где эффекты деформирования флюидонасыщенного коллектора необратимы. При анализе влияния промышленных взрывов на массив горных пород основное внимание уделяется оценке устойчивости стенок горных выработок, бортов карьеров и сеismoбезопасности проведения взрывных работ. Разработка месторождения и сопутствующая деятельность может сопровождаться взаимосвязанными изменениями гидрогеологических и инженерно-геологических условий, которые выражаются:

– в нарушении структуры потока подземных вод и водного баланса из-за снижения уровней/напоров;

– в развитии деформаций в массиве горных пород и на поверхности из-за изменения напряженного состояния, трещиноватости, физико-механических свойств пород, сдвижения пород и образования мульд оседания над отработанным пространством, вторичной консолидации грунтов из-за водопонижений;

– в активизации эндогенных (техногенные землетрясения, горные удары) и экзогенных про-

цессов (карст, суффозия), в возникновении техногенных геологических процессов.

Изменение проницаемости перекрывающих пород при разработке месторождений преимущественно связывается с техногенной трещиноватостью и деформацией вышележающих пластов. Динамическое влияние промышленных взрывов на фильтрационные свойства водонасыщенных коллекторов не оценивается.

Применение современных прецизионных датчиков уровня с высокой частотой опроса позволяет проводить исследования в области сейсмического воздействия волн от различных типов источников. Наряду с действующими аппаратурно-измерительными комплексами, развернутыми на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН “Михнево” (ГФО “Михнево”), впервые высокоточный гидрогеологический мониторинг организован и проводится на одном из участков разрабатываемого Коробковского месторождения Курской магнитной аномалии (КМА). Обработка и сравнительный анализ зарегистрированных гидрогеологических эффектов в системе “пласт–скважина” при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений и промышленных взрывов направлен на выделение общих закономерностей реакции водонасыщенного коллектора на динамическое воздействие и основных параметров, определяющих режим деформирования массива горных пород.

МЕТОДИКА

Краткая характеристика объектов исследований

Экспериментальные работы по изучению реакции водонасыщенных коллекторов на динамическое воздействие выполняются на двух площадках, расположенных в пределах центральной части России. *Площадка 1* – геофизическая обсерватория ИДГ РАН “Михнево” (ГФО “Михнево”) расположена на расстоянии 80 км южнее Москвы. В рамках комплексного мониторинга геофизических полей на территории ГФО “Михнево” проводятся наблюдения за режимом безнапорного горизонта, развитого в отложениях среднего карбона, и напорного горизонта, приуроченного к отложениям нижнего карбона (рис. 1). Водовмещающие породы сложены известняками неравномерно трещиноватыми, кавернозными в верхней части разреза, с подчиненными прослоями доломита, глин. Амплитуды сезонных вариаций уровня подземных вод в 2020 г. составили 1.2–1.3 м.

Площадка 2 расположена на юго-восточной окраине г. Губкина, западнее действующего карьера Лебединского горно-обогатительного комбината. Вдоль северо-восточной окраины города находится Коробковское и Лебединское железоза-

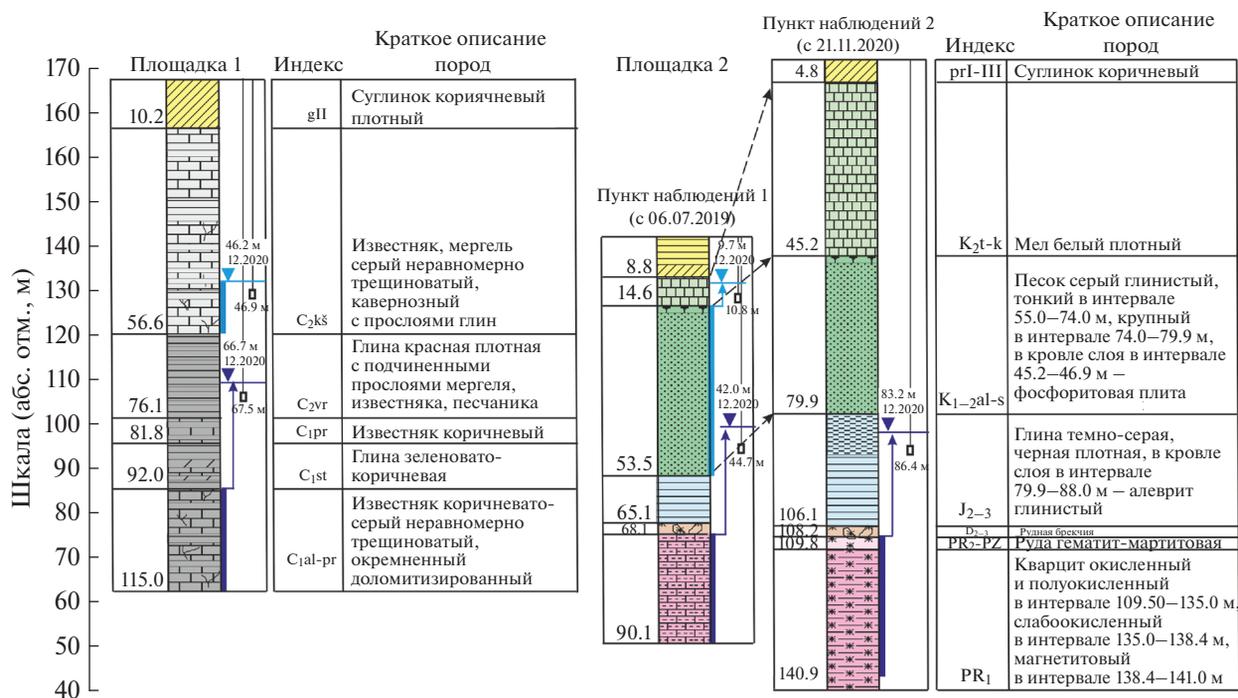


Рис. 1. Геологические разрезы наблюдательных скважин на площадках 1 и 2 (слева – глубина залегания подошвы слоя, м; справа – положение уровня и датчика, м).

рудные месторождения, которые разрабатываются подземным и открытым способом соответственно с использованием взрывных технологий. Над шахтным полем преимущественное распространение получают два горизонта. Верхний слабонапорный горизонт развит в песках альб-сеномана. Нижний горизонт – в пределах зоны экзогенного выветривания архей-протерозойских пород представлен преимущественно сланцами и кварцитами, пронизанными интрузивными образованиями (рис. 1) [Геологический..., 1985]. Режим подземных вод в пределах площадки техногенно-нарушенный и проявляется в виде плавного подъема уровня в весенний период. Амплитуда сезонных вариаций уровня в 2020 г. по верхнему (альб-сеноманскому) водоносному горизонту не превышала 0.9 м, по нижнему (архей-протерозойскому) – 0.5 м.

На территории ГФО “Михнево” две наблюдательные скважины оборудованы прецизионными датчиками уровня LMP308i. Точность регистрации вариаций уровня с частотой 1 Гц составляет 1.7 мм. Сейсмическая регистрация ведется широкополосными сейсмометрами STS-2 (собственная частота 0.0083 Гц) и CM-3-E (собственная частота 0.01 Гц) (в разные годы) с частотой опроса 100 Гц, установленными в шахте на глубине 20 м. При сопоставлении с гидрогеологическими данными частота дискретизации сейсмических записей приведена к 1 Гц. Измерения атмосферного

давления до июля 2019 г. выполнялись цифровой метеостанцией, с августа 2020 г. используется датчик Keller PAA-33X. Регистрация ведется на АЦП E14-440 с частотой дискретизации 1 Гц и синхронизацией времени компьютера с сервером ГФО “Михнево” каждый час.

В пределах промышленного региона (район г. Губкин Белгородской области) в двух пунктах наблюдений в состав аппаратно-измерительного комплекса входят датчики уровня воды Keller PR-36XW, датчик атмосферного давления Keller PAA-33X, сейсмометры СПВ-3К и 6-канальные регистраторы REFTEK-130 и Centaur STR4-6S. Частота опроса составляет 200 Гц/канал. Точность регистрации вариаций уровня (давления) в системе “пласт–скважина” – 1.7 мм (17 Па). Датчики уровня установлены в трех скважинах на глубине 3 м ниже уровня воды. Сейсмометры расположены на глубине ~0.5–1 м на бетонном постаменте. Датчик атмосферного давления и регистраторы находятся на поверхности в специально оборудованных металлических контейнерах. Расстояние между двумя пунктами наблюдений составляет 1.6 км. В состав пункта 1, запущенного с 06.07.2019 г., входят две скважины, вскрывающие верхний горизонт в песчаных отложениях и нижний – в сланцах. В пункт 2, работающий с 21.11.2020 г., включена скважина, пройденная в кварцитах. Дополнительно в двух скважинах, оборудованных на разрабатываемый

архей-протерозойский горизонт, установлены гидрофоны, которые через усилители сигналов типа Briel&Kjaer 1704 и 2626 эпизодически подключались к регистраторам.

Обработка данных

На первом этапе обработки экспериментального материала, полученного на двух площадках, проводится систематизация сейсмических, гидрогеологических и барометрических данных в единую базу данных. Для анализа приливных волн в пределах выбранных интервалов регистрации уровней подземных вод в наблюдательных скважинах выполнена фильтрация узким полосовым фильтром в диапазонах 12.32–12.52 и 25.7–25.9 ч после децимации и приведения шага по времени к 300 с. Приливы в смещении грунта по вертикальной компоненте рассчитаны с использованием программного пакета ETERNA 3.0 применительно к координатам площадок (ГФО “Михнево” 54°57.6′ с.ш. 37°45.9′ в.д., г. Губкин 51°16.9′ с.ш. 37°35.2′ в.д.) [Wenzel, 1994]. Объемная деформация грунта (Y , 10^{-9}) оценена по аппроксимирующей зависимости $Y = 0.124X$, где X – смещение грунта в приливной волне, мм. Полученные данные использованы для построения амплитудных спектров и диаграмм зависимости между амплитудами приливных волн, выделенных в вариациях уровня подземных вод и объемной деформации грунта. Приливной фактор определен как отношение амплитуд основных типов приливных волн в вариациях уровня подземных вод к рассчитанной объемной деформации грунта.

Анализ влияния земных приливов на деформирование флюидонасыщенного коллектора проводился для полусуточной волны лунного типа M_2 . Для оценки фазового сдвига между приливной компонентой M_2 , выделенной в уровне подземных вод и смещении грунта, применен метод, основанный на построении фазовых траекторий в координатах “смещение грунта – изменение уровня воды” в виде эллипсов [Кабыченко, 2008]. Полученные значения фазового сдвига использованы для расчета водопроводимости пород [Vinogradov et al., 2017] в рамках пороупругой модели [Hsieh et al., 1987]. Проницаемость водонасыщенного коллектора (k) оценивается по формуле [Гавич, 1988]:

$$k = \frac{\mu}{\rho g d} T, \quad (1)$$

где: T – водопроводимость пород, м²/сут; μ – коэффициент динамической вязкости пласта; d – интервал обводненной части скважины, м; ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

В результате ранее проведенной обработки базы данных, полученных на площадке 1, экспериментально определен нижний порог скорости регистрации сейсмических событий (≥ 0.05 мм/с) в вариациях уровня подземных вод, который в дальнейшем использован для формирования выборки гидрогеологических и сейсмических (по вертикальной компоненте) записей в интервалах, соответствующих времени прохождения волн от удаленных землетрясений с частотой опроса 1 Гц. В группах поверхностных волн, выделенных на сейсмограммах скорости смещения грунта ($Vp-p$) и в уровне напорного и безнапорного горизонтов, определялись максимальные значения амплитуд, измеренные между последовательным максимумом и минимумом в скользящем окне длительностью 72 с и перекрытием 50%.

Основные параметры сейсмических событий – время прихода продольной волны на станцию “Обнинск” (OBN), расположенную на расстоянии ~100 км от ГФО “Михнево”, координаты и глубина очага землетрясения взяты из каталога Геофизической службы РАН (ГС РАН www.ceme.gsras.ru), магнитуда M_w приведена по каталогу Global CMT Catalog (<http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>).

Для типизации гидрогеологических откликов от землетрясений данные регистрации уровня и скорости смещения грунта рассмотрены в высоко- и низкочастотных диапазонах с периодами менее и более 60 с для 6-часовых интервалов [Горбунова и др., 2018]. По сейсмическим и гидрогеологическим данным за 3 ч до прихода волны на станцию и через 3 ч после рассчитывалось отношение модулей спектров скорости смещения грунта и колебаний уровня воды с целью удаления влияния локальных особенностей расположения станции. По каждому спектру определялись значения рассматриваемых параметров (амплитуда, частота), которые одновременно выделялись в записи скорости грунта и вариациях уровня напорного и безнапорного горизонтов на одних и тех же частотах (с точностью до 4 отсчетов).

При последующем делении спектра уровня воды на спектр скорости грунта на определенных ранее частотах, соответствующих синхронизации пиковых значений, рассчитывался коэффициент усиления (χ) – амплитудный фактор как отношение спектральных амплитуд уровня (A_{max} , мм) к скорости смещения грунта (V_{max} , мм/с) [Brodsky et al., 2003; Besedina et al., 2016]:

$$\chi = A_{max} / V_{max}, \quad (2)$$

который является параметром отклика уровня воды в скважине на прохождение сейсмических волн от землетрясений.

Разработанная методика дистанционного контроля состояния флюидонасыщенного коллектора *in situ* по результатам многолетнего прецизионного мониторинга уровня подземных вод на территории ГФО “Михнево” применена к данным, полученным в техногенно-нарушенных условиях вблизи г. Губкина, предварительно отфильтрованным фильтром низких частот (ФНЧ) Баттерворта 2-го порядка с частотой среза 0.0025 Гц. Максимальные амплитуды вариаций уровня подземных вод и скорости смещения грунта при взрывах измерены между последовательным максимумом и минимумом в скользящем окне длительностью 0.4 с с перекрытием 50%. При массовых взрывах в шахте подрывались от 1 до 4 камер с интервалом от 26 с до 1 мин 20 с на глубине от 250 до 300 м от поверхности. При проведении массовых взрывов в карьере подрывались от 1 до 8 блоков. Продолжительность отклика при взрывах в шахте не превышает 1–3 с, при взрывах в карьере – увеличивается до 5–7 с. Из сформированной базы данных регистрации взрывов выбраны интервалы 40-секундной регистрации сейсмических и гидрогеологических сигналов. Продолжительность интервалов составляет 15 с до взрыва и 25 с после взрыва.

Для анализа реакции водонасыщенного коллектора на массовые взрывы рассчитаны и построены амплитудные и нормированные спектры по трем компонентам скорости смещения грунта и вариациям уровня разновозрастных водоносных горизонтов, вызванным прохождением сейсмических волн от каждого взрыва.

Модуль скорости смещения грунта использовался для количественной характеристики сейсмического воздействия от взрыва. Максимальная скорость определена по формуле:

$$\bar{V}_{xyz} = \left| \sqrt{V_Z^2 + V_N^2 + V_E^2} \right| \max, \quad (3)$$

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

Для сопоставления данных по реакции системы “пласт–скважина” на массовые взрывы рассчитано приведенное расстояние с учетом эпицентрального расстояния и основного параметра взрыва – массы взрывчатого вещества (ВВ) в ступени замедления.

Экспериментальные данные, полученные на двух площадках, использованы для оценки относительной деформации коллектора (ε) по соотношению:

$$\varepsilon = \sigma_d / E, \quad (4)$$

где E – модуль Юнга, GPa и σ_d – динамическое напряжение, которое оценивается как:

$$\sigma_d = \rho C V_m, \quad (5)$$

где: ρ – плотность, kg/m^3 ; C – скорость распространения продольных волн, m/s ; V_m – максимальное значение скорости смещения грунта при прохождении сейсмических волн от землетрясений и промышленных взрывов, m/s .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фоновые фильтрационные характеристики водонасыщенных коллекторов – водопроницаемость и проницаемость на площадках 1 и 2 определены на основе анализа фазового сдвига между приливными волнами, выделенными в смещении грунта по вертикальной компоненте и уровне, так как речь идет о приливных волнах, выделенных в уровне подземных вод. Амплитуды гидрогеологических откликов и скоростей сейсмических волн от удаленных землетрясений на территории ГФО “Михнево” и массовых взрывов, производимых при открытой и подземной разработке Лебединского и Коробковского железорудных месторождений соответственно, использованы для определения режима деформирования водонасыщенных коллекторов разных типов (порового и трещинно-порового).

Влияние квазистатического фактора – земных приливов

На основе спектрального анализа экспериментальных данных, полученных на двух площадках, выделены основные типы приливных волн в вариациях уровня подземных вод в пределах выбранных интервалов измерений.

Для территории ГФО “Михнево” в напорном горизонте, приуроченном к карбонатному коллектору трещинно-порового типа, отчетливо прослеживаются 8 основных типов приливных волн. Среднемесячные значения амплитуд полусуточных приливных волн в напорном горизонте за 2017–2018 гг. варьируют от 0.2 мм (волна N_2) до 4.6 мм (волна M_2), суточных – от 0.4 мм (волна Q_1) до 5.8 мм (волна O_1). В безнапорных условиях устойчиво проявляются суточные приливные волны на базе более короткого периода измерений и наличия техногенной помехи, связанной с эпизодическим водоотбором из технической скважины, удаленной на расстояние ~300 м от наблюдательной. Среднемесячные значения амплитуд суточных приливных волн в безнапорном горизонте изменяются от 0.04 мм (волна Q_1) до 4.5 мм (волна O_1). Среднемесячные значения амплитуд полусуточных приливных волн в объемной деформации за 2017–2018 гг. не превышают 0.9×10^{-9} (волна N_2) – 9.2×10^{-9} (волна M_2), суточных – от 0.7×10^{-9} (волна Q_1) до 1.5×10^{-8} (волна K_1) [Kabychenko et al., 2019].

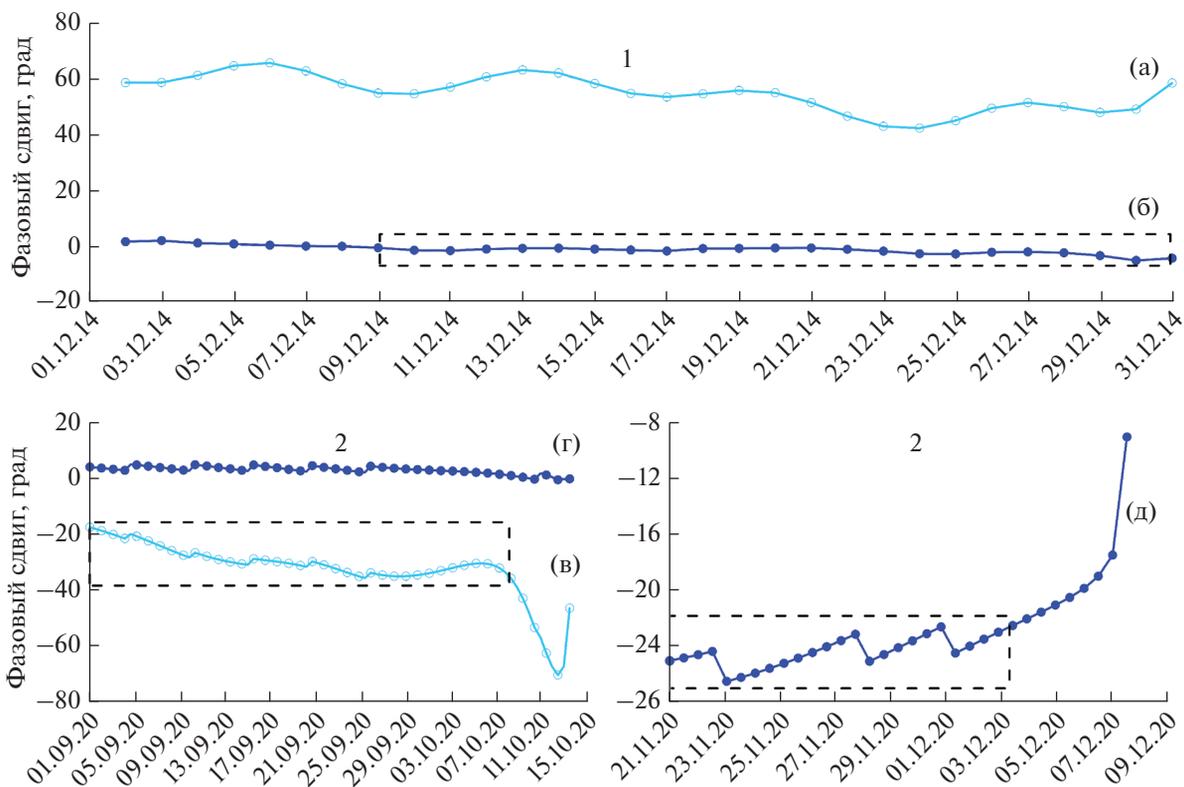


Рис. 2. Диаграммы фазового сдвига между приливными волнами, выделенными в теоретически рассчитанном смещении грунта на площадках 1 (ГФО “Михнево”) и 2 (в пределах разрабатываемого месторождения) и уровне безнапорного по волне O_1 (а) и напорного по волне M_2 (б) горизонтов, верхнего (в) и нижнего горизонтов в сланцах (г) и кварцитах (д) горизонтов по волне M_2 (диапазоны квазистатического режима фильтрации выделены пунктирными рамками).

На площадке 2 основные типы приливных волн слабо выделяются в связи с небольшим периодом наблюдений в 2020 г. (от 18 до 40 дней). Амплитуда полусуточных приливных волн в верхнем слабонапорном горизонте, развитом в коллекторе порового типа, не превышает 1.2 мм, суточных – 2.2 мм. В нижнем горизонте, получающем преимущественное распространение в сланцах, амплитуды полусуточных приливных волн не превышают 2 мм, суточных – 3 мм. В нижнем горизонте, приуроченном к кварцитам, амплитуды полусуточных волн возрастают до 5.8 мм, суточных – до 10.8 мм. Амплитуды приливных волн объемной деформации грунта составляют $(5.0–8.7) \times 10^{-9}$ для полусуточных компонент и $6.8 \times 10^{-9}–1.2 \times 10^{-8}$ – для суточных.

Полученные значения использованы для оценки приливного фактора на основе отношения амплитуд основных типов приливных волн, выделенных в вариациях уровня подземных вод и теоретически рассчитанной объемной деформации. Для водонасыщенных коллекторов, представленных известняками неравномерно трещиноватыми на территории ГФО “Михнево” (площадка 1), значения приливного фактора в безнапорных условиях в среднем составляют 0.34 мм/наност-

рейн, в напорных – 0.41 мм/нанострейн. В пределах разрабатываемого железорудного месторождения (площадка 2) амплитудный фактор водонасыщенного коллектора, сложенного песками глинистыми (верхний горизонт), составляет 0.27 мм/нанострейн, для нижнего горизонта, распространенного в сланцах, – не превышает 0.42 мм/нанострейн, в кварцитах – увеличивается до 0.9 мм/нанострейн.

Для выбранных интервалов данных, отфильтрованных в диапазоне 12.32–12.52 ч (для безнапорного горизонта, распространенного на площадке 2, в диапазоне 25.7–25.9 ч), рассчитаны значения фазового сдвига реакции уровня различных типов водонасыщенных коллекторов на земные приливы с шагом 1 день (рис. 2). На представленных выше диаграммах выбраны интервалы значений фазового сдвига для участков, которые характеризуются квазистационарным режимом фильтрации (вариации уровня подземных вод не превышают 5 см/сут) [Vinogradov et al., 2017].

При положительных значениях фазового сдвига используемая методика не позволяет оценить проницаемость, как, например, для безнапорного горизонта на площадке 1 и нижнего напорного горизонта на площадке 2 (рис. 1). При

Таблица 1. Технические характеристики скважин и расчетные гидрогеологические параметры

№ площадки	Индекс горизонта (водоносные породы)	Радиус обсадки скважины, м Радиус скважины, м	Интервал обводненной части, м Вскрытая мощность пласта, м	Интервал водопритока по расходомеру/резистивиметрии (РМ), м	Уровень появившийся. м Установившийся (на 12.2020), м	Величина напора, м	По данным откачки		По данным приливного анализа		
							удельный дебит q , л/с	водопроводимость, м ² /сут	фазовый сдвиг, °	водопроводимость, м ² /сут	проницаемость, м ²
1	C ₁ al-pr (известняк)	0.0635 0.0590	92–115 23.0	92–94 99–100	92.0 66.7	25.3	0.04	4.0	–2...–4	2.0–5.0	8.2 × 10 ⁻¹⁴ – 15.4 × 10 ⁻¹³
2	K ₁₋₂ al-s (песок глинистый)	0.0635 0.0540	14.5–53.5 39.0	(39.3–45.2)	9.7 14.5	4.8	0.10*	10.0	–18... –28	0.19–0.35	0.6 × 10 ⁻¹⁴ – 1.1 × 10 ⁻¹⁴
	PR ₁ (кварцит)	0.0635 0.0465	108.2–138.4 30.2	не отмечен	108.2 83.2	25.0	0.04	0.6	–22.5...–26.5	0.30–0.35	0.1 × 10 ⁻¹⁴ – 1.4 × 10 ⁻¹⁴

* По паспорту скважины 2002 г.

оценке водопроводимости и проницаемости водонасыщенных коллекторов по данным приливного анализа на основе методики, описанной в статье [Hsieh et al., 1987], использованы технические характеристики наблюдательных скважин и результаты ранее проведенных пробных откачек (табл. 1). Значение упругоэластичности пласта (S) зависит от литологии пород, и при расчетах были приняты средние значения для известняка 0.2×10^{-4} , для песка глинистого – 7.5×10^{-3} и кварцита 10^{-5} [Гавич, 1988].

В пределах площадки 1 фоновая проницаемость карбонатного коллектора изменяется от 8.2×10^{-14} до 15.4×10^{-13} м². На площадке 2 проницаемость коллектора, представленного песком глинистым и кварцитом, составляет $(0.6–1.1) \times 10^{-14}$ и $(0.1–1.4) \times 10^{-14}$ соответственно. Полученные значения проницаемости исследуемых водонасыщенных коллекторов не противоречат данным, определенным по приливному анализу для других литологических типов пород, которые для песчанников составляют $(5.6–9.0) \times 10^{-14}$ м², трещиноватых габбро – варьируют от $(1.5–2.2) \times 10^{-15}$ до 1.6×10^{-14} м² [Allegre et al., 2016; Xue et al., 2013].

По данным проведенных ранее лабораторных определений проницаемость образцов известняков, отобранных из керна скважин, пробуренных на территории ГФО “Михнево”, определенная по газу, изменяется от 0.7×10^{-15} до 5×10^{-14} м². Полученные данные соответствуют значениям проницаемости карбонатных пород $6.79–9.96 \times 10^{-15}$ м², сложенных преимущественно кальцитами по данным измерений фильтрационно-емкостных свойств, выполненных группой Д.В. Короста (МГУ) [Гасеми, Баяк, 2020].

Гидрогеологические отклики на удаленные землетрясения

За период наблюдений с 2010 по 2019 гг. на территории ГФО “Михнево” зарегистрированы гидрогеологические отклики на прохождение сейсмических волн от 66 удаленных землетрясений M_w 6.4–9.1 на эпицентральных расстояниях от 1863 до 16507 км. Большинство землетрясений мелкофокусные с глубиной очага до 70 км. В отдельных случаях прослежены отклики на среднефокусные землетрясения в интервале глубин 120–215 км (в районах Южной Аляски 24.01.2016 г.; Гиндукуша, Афганистан 26.10.2015 г.; Перу 22.02.2019 г. и 26.05.2019 г.) и глубокофокусные в интервале глубин 560–680 км (в Охотском море 14.08.2012 г. и 24.05.2013 г., вдоль западной гряды островов Бонин 30.05.2010 г., Тонга 19.08.2018 г. и Фиджи 06.09.2018 г. в Тихом океане).

Амплитуды гидрогеологических откликов безнапорного водоносного горизонта варьируют от 2.2 до 110.6 мм (вариации давления в системе “пласт–скважина” составляют 22–1084 Па), напорного – от 2.0 до 41.5 мм (давление изменяется от 20 до 407 Па) при скорости смещения грунта (по вертикальной компоненте) от 0.05 до 3.78 мм/с (рис. 3). Зависимость динамических колебаний уровня подземных вод (давления воды в системе “пласт–скважина”) от скорости смещения грунта аппроксимируется степенной функцией. Для безнапорного водоносного горизонта характеризуется относительно высокой степенью корреляции по сравнению с напорным. Амплитуды гидрогеологических откликов безнапорного и напорного водоносных горизонтов в среднем различаются на порядок в диапазоне зарегистрированных скоростей смещения грунта 0.6–1.3 мм/с.

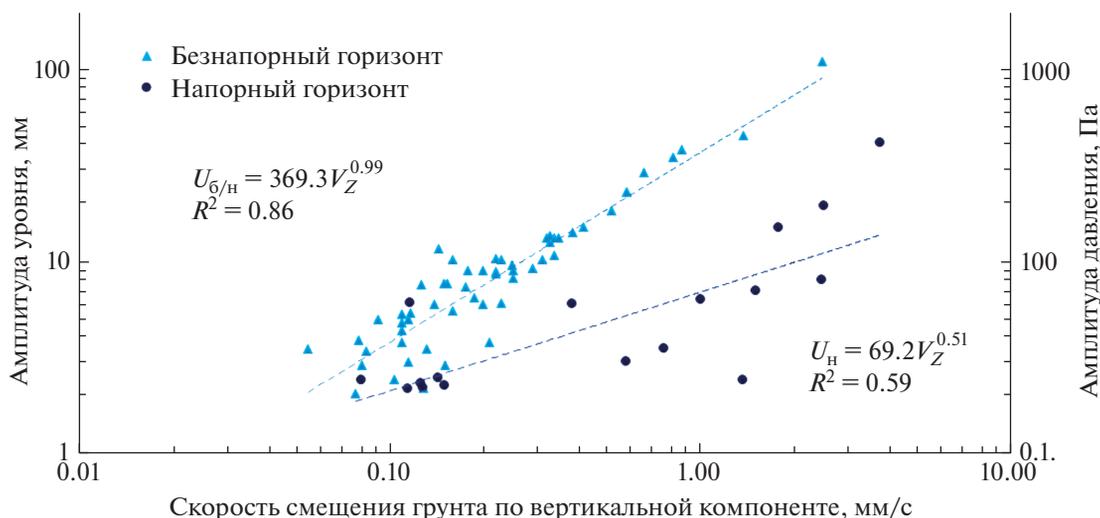


Рис. 3. Зависимость амплитуд уровней (давлений) напорного и безнапорного горизонтов от максимальной скорости смещения грунта по вертикальной компоненте от удаленных землетрясений на площадке 1 (ГФО “Михнево”).

Сравнительный анализ данных регистрации гидрогеологических откликов в высокочастотной и низкочастотной области позволил выделить 3 типа гидрогеологических эффектов, связанных с прохождением сейсмических волн [Горбунова и др., 2018]. *Первый тип* представлен вариациями уровня, которые ограниченно выделяются на фоне шума преимущественно в низкочастотной области (в напорном водоносном горизонте) или в высокочастотной области (в безнапорном водоносном горизонте) (рис. 4, I тип). Ко *второму типу* отнесены динамические вариации уровня, проявляющиеся в широком диапазоне частот (рис. 4, II тип). Первый и второй типы соответствуют косейсмическим вариациям уровня и синхронным колебаниям грунта, вызванным прохождением сейсмических волн. *Третий тип* гидрогеологических эффектов представлен в виде плавного постсейсмического подъема уровня, устойчиво выраженного в низкочастотном диапазоне, наряду с косейсмическими вариациями уровня (рис. 4, III тип).

В напорном водоносном горизонте первый тип гидрогеологического отклика отмечен при скорости смещения грунта 0.12–0.77 мм/с и проявился преимущественно в низкочастотной области в диапазоне периодов более 60 с. Второй тип гидрогеологического отклика напорного горизонта с амплитудами вариаций уровня 6.3–7.0 мм зарегистрирован при скорости смещения грунта 1.01–1.51 мм/с. Третий тип гидрогеологического отклика выделен при скорости смещения грунта 1.79–3.78 мм/с после вступления поверхностных волн от 4 катастрофических землетрясений M_w 8.3–9.1 и проявился в области низких частот в виде подъема уровня. Максимальная амплитуда постсейсмического подъема уровня напорного

горизонта составила ~15 мм (147 Па) для землетрясения 11.03.2011 г. Тохоку, Япония M_w 9.1. Подобные эффекты также прослежены в вариациях уровня в диапазоне низких частот после землетрясений у побережий Северной Суматры 11.04.2012 г. M_w 8.6, Центрального Чили 27.02.2010 г. M_w 8.8 и Мексики 08.09.2017 г. M_w 8.2. После Суматранского землетрясения установлен подъем уровня в течение ~23 мин, после Чилийского – на протяжении 18 мин.

В безнапорном водоносном горизонте гидрогеологические отклики первого типа на землетрясения с амплитудами 3.0–13.7 мм выделены в высокочастотной области при скорости смещения грунта 0.08–0.34 мм/с. Гидрогеологические отклики второго типа с амплитудами 6.1–18.3 мм в широком диапазоне частот вызваны прохождением сейсмических волн от 5 землетрясений со скоростью смещения грунта 0.23–0.62 мм/с. Реакция безнапорного горизонта нахождение сейсмических волн от землетрясения в Эгейском море 25.04.2014 г. M_w 6.9 на минимальном эпицентральном расстоянии 1863 км отличается от остальных зарегистрированных гидрогеологических эффектов и прослеживается в виде скачкообразного подъема уровня в низкочастотной области. Амплитуды вариаций уровня безнапорного водоносного горизонта нахождение сейсмических волн с близкими значениями скорости смещения грунта преимущественно совпадают (рис. 3).

Для гидрогеологических откликов на удаленные землетрясения, зарегистрированных на территории ГФО “Михнево”, определен амплитудный фактор на основе отношения нормированных амплитудных спектров, рассчитанных по сейсмиче-

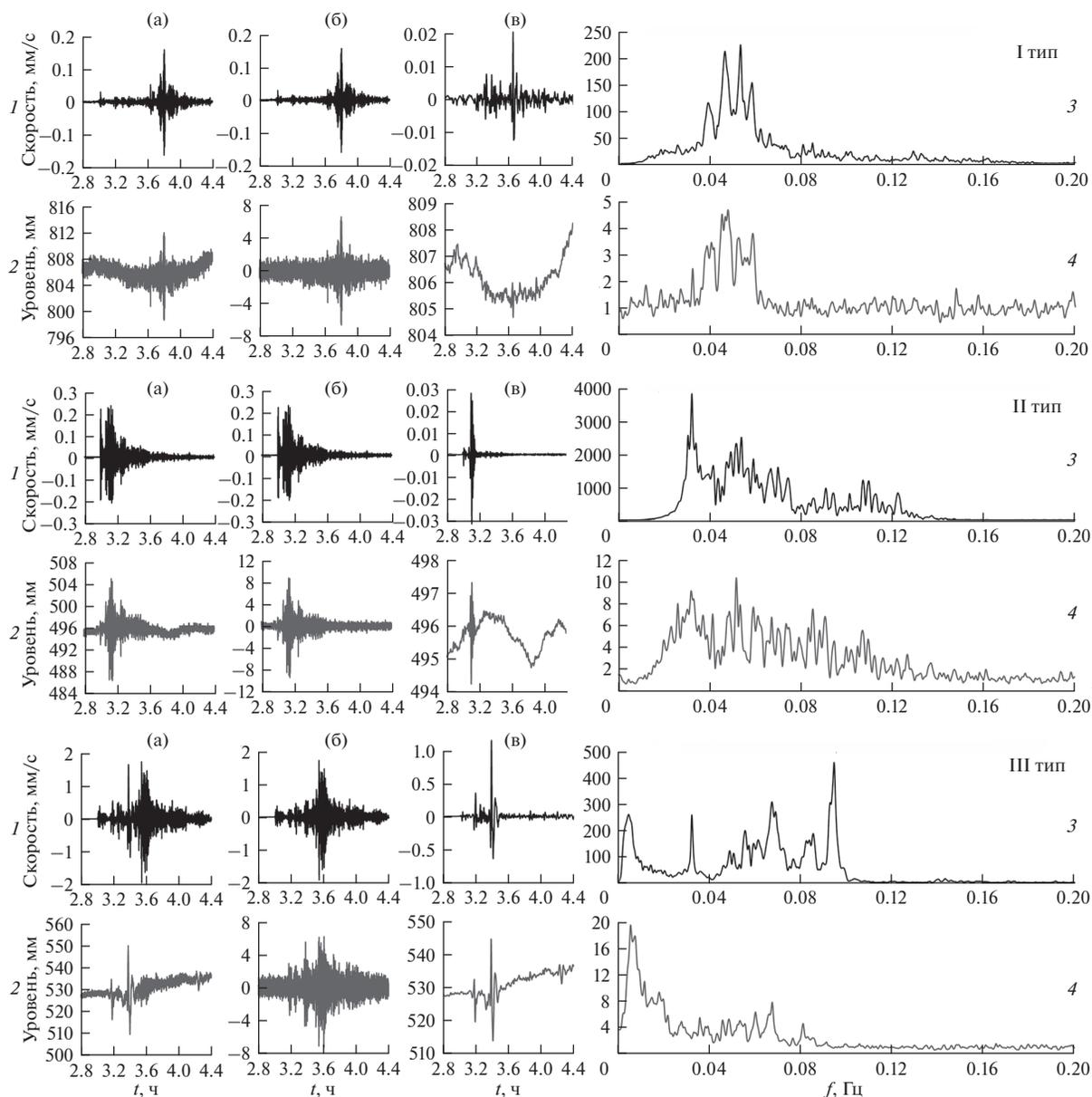


Рис. 4. Сейсмограммы (1), диаграммы уровня (2) безнапорного (I и II тип) и напорного (III тип) водоносных горизонтов, нормированные спектры скорости смещения грунта по вертикальной компоненте (3) и уровня (4) при землетрясениях (сверху вниз): побережье Северного Чили 03.04.2014 г. M_w 7.7; Ирак 12.11.2017 г. M_w 7.4; Тохоку, Япония 11.03.2011 г. M_w 9.1 ((a) — исходные данные; (б) — в диапазоне периодов меньше 60 с; (в) — в диапазоне периодов больше 60 с).

ским и гидрогеологическим данным, на частотах, соответствующих синхронизации пиковых значений [Горбунова и др., 2018]. Амплитудный фактор напорного и безнапорного горизонтов за рассматриваемый период наблюдений является частотно независимой функцией.

При сопоставлении амплитудных и нормированных спектров, построенных по сейсмическим и гидрогеологическим данным до и после прихода сейсмических волн от землетрясений, выделены события, при которых вариации уровня после землетрясения в 3 и более раз превысили фоновые

значения (рис. 4). Вероятно, параметр изменения интенсивности спектра может быть использован для определения нижнего порога чувствительности водонасыщенного коллектора при прохождении сейсмических волн от землетрясений.

На построенных нормированных спектрах скорости смещения грунта и уровня для I и II типов гидрогеологических эффектов установлено как совпадение экстремумов скорости смещения грунта и амплитуд уровня безнапорного водоносного горизонта, так и смещение максимумов амплитудных спектров на 0.01–0.05 Гц для ряда зем-

летрясений (рис. 4-I–II) [Батухтин и др., 2020a]. Для гидрогеологических эффектов III типа на нормированных спектрах отчетливо выражены изменения в распределении экстремумов уровня воды относительно экстремумов скорости смещения грунта по частоте и интенсивности (рис. 4-III). Отмеченные различия в нормированных спектрах подтверждают корректность использованного ранее подхода анализа полученных экспериментальных данных в высоко- и низкочастотных областях для типизации косейсмических вариаций и выделения постсейсмических изменений по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод, проводимого на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН “Михнево” [Besedina et al., 2016].

Реакция водонасыщенного коллектора на массовые взрывы

За период наблюдений 2019–2020 гг. зарегистрированы гидрогеологические отклики в виде вариаций давления в системе “пласт–скважина” при проведении 63 массовых взрывов в шахте на глубине ~300 м от поверхности и 17 массовых взрывов в пределах Лебединского карьера. Взрывы произведены в 31 камере на эпицентральной дистанции от пунктов наблюдений 0.5–3.2 км с максимальной массой ВВ в одной ступени замедления от 0.4 до 2.5 т и при отработке бортов карьера на расстоянии от 1.9 до 4.6 км со средней массой ВВ в группе от 1 до 10.3 т.

В пределах разрабатываемых залежей рабочие камеры могут быть сгруппированы по 5 блокам, которые по-разному расположены относительно пункта наблюдений 1 и условно обозначены от восточного до западного (рис. 5). Наиболее устойчивая степенная зависимость между максимальной скоростью смещения грунта, приведенным расстоянием и реакцией нижнего горизонта отмечается при проведении взрывов в восточном блоке. Массив горных пород, расположенный восточнее пункта наблюдений 1 представлен преимущественно целиком с единичными горными выработками.

Различие в реакции верхнего и нижнего горизонтов на проведение взрывов в северо-западном блоке при изменении значений максимальной скорости смещения грунта и приведенного расстояния не прослеживается. Ослабление эффекта сейсмического воздействия на водонасыщенный коллектор, вероятно, обусловлено горно-технологическими условиями, так как отработанное пространство между действующими камерами северо-западного блока и пунктом наблюдений 1 заполнено пастообразной смесью технических отходов.

Амплитуды давления нижнего горизонта, приуроченного к коллектору трещинно-порового типа, на порядок выше значений, прослеженных в верхнем горизонте, распространенном в пределах коллектора порового типа, при максимальной скорости смещения грунта от 0.6 до 4 мм/с при взрывах в шахте и от 2 до 6 мм/с при взрывах на карьере (рис. 5a). При увеличении значений скорости смещения грунта до 10 мм/с и более расхождение между амплитудами вариаций давления в водонасыщенных коллекторах порового и трещинно-порового типа при сейсмическом воздействии уменьшается. При взрывах в шахте верхний горизонт характеризуется большим диапазоном вариаций давления в системе “пласт–скважина” по сравнению с нижним, которое может быть обусловлено слоисто-блоковым строением разрабатываемого месторождения, техногенно нарушенным режимом подземных вод и технологией ведения работ [Беседина и др., 2020].

В нижнем горизонте зарегистрированы отклики на все взрывы, произведенные в шахте, с амплитудами давления от 40 Па до 7.3 кПа в пункте наблюдений 1 (13 кПа в пункте наблюдений 2) на приведенных расстояниях от 404 до 68 м/кг^{1/3} м/с (60 м/кг^{1/3}) (рис. 5б). В верхнем горизонте вариации давления в системе “пласт–скважина” при взрывах в шахте в пункте наблюдений 1 изменяются от 23 Па до 12.2 кПа на приведенных расстояниях от 351 до 104 м/кг^{1/3}. Реакция водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-порового типов в пункте наблюдений 1 на взрывы в карьере регистрируется при больших значениях максимальной скорости смещения грунта от 1.2 до 14.4 мм/с при сохранении степенной зависимости. В пункте наблюдений 2 отклик на массовый взрыв в карьере не прослежен.

Контрольная проверка диапазона вариаций уровня подземных вод при взрывах выполнялась с использованием электроуровнемеров, которые устанавливались в скважины на 0.5–1 см выше уровня. При максимальном значении скорости смещения грунта 3.7 мм/с в пункте наблюдений 1 (12.3 мм/с в пункте наблюдений 2) реальных подъемов уровня верхнего и нижнего горизонтов с амплитудами более 0.5 см в скважинах не отмечено. Вариации давления в системе “пласт–скважина” от массовых взрывов с использованием датчиков уровня подтверждены результатами регистрации с использованием гидрофонов в наблюдательных скважинах (рис. 6).

При предварительной обработке синхронных сейсмических и гидрогеологических данных прослеживаются серии отдельных пакетов колебаний в виде повторяющихся и постепенно затухающих импульсов. По форме зарегистрированные сигналы в системе “пласт–скважина” различаются. Выделяются единичные или серии импульс-

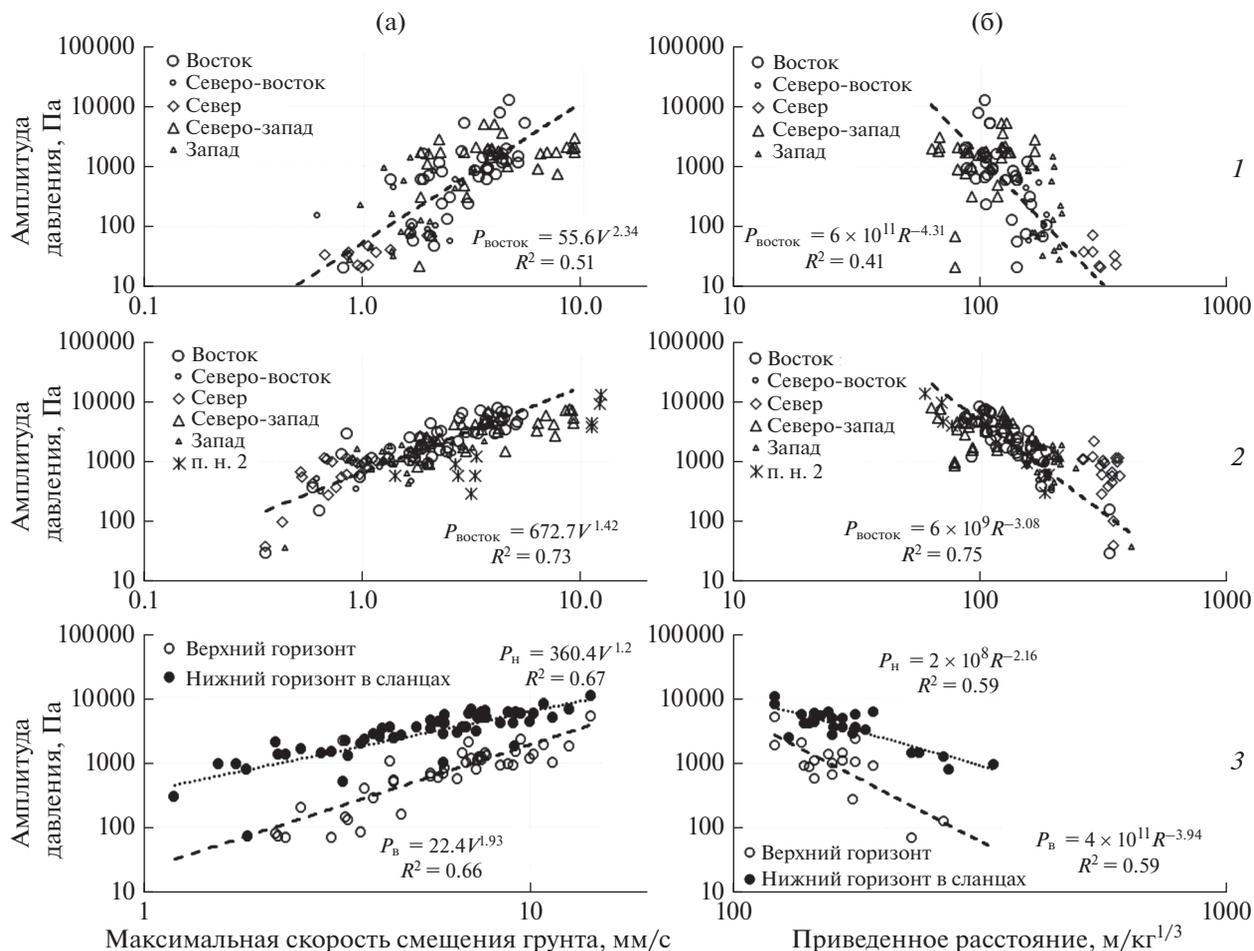


Рис. 5. Зависимость изменения давления воды в системе “пласт–скважина” от массовой скорости смещения грунта (а) и приведенного расстояния (б) в верхнем (1) и нижнем (2) горизонтах при взрывах в шахте и карьере (3) по пункту 1, данные по регистрации в пункте 2 обозначены крестиками.

ных сигналов и гармонические колебания (рис. 6, II). При проведении повторных взрывов в одних и тех же камерах общий вид гидрогеологического отклика подобен и отличается только по интенсивности воздействия на коллектор.

По результатам предварительной обработки экспериментальных данных установлено, что реакция датчиков уровня, опущенных в скважины, опережает вступление сейсмометра, расположенного на поверхности, на 0.02–0.05 с при проведении взрывов (рис. 6, I–II) [Батухтин и др., 2020б]. В верхнем слабонапорном горизонте подобный эффект зарегистрирован при проведении взрывов на эпицентральной дистанции до 1.0–1.1 км, в нижнем напорном горизонте – на расстоянии до 2.0 км. Это может быть связано с тем, что скважины вскрывают водоносные горизонты, которые характеризуются площадным распространением над всей системой подземных камер. Вероятно, сейсмозрывной импульс в водоносных горизонтах опережает распространение сейсми-

ческих волн в осадочном чехле [Беседина и др., 2019].

При сопоставлении амплитудных и нормированных спектров, построенных после высокочастотной фильтрации временных рядов сейсмических и гидрогеологических данных в диапазоне 1–100 Гц, отмечено расхождение между основными частотами колебаний, связанными с проведением взрывов (рис. 6, III–IV) [Беседина и др., 2019; Горбунова и др., 2019]. Максимумы спектров гидрогеологических откликов верхнего и нижнего горизонта различаются и не совпадают с экстремумами спектров скорости смещения грунта.

Максимумы амплитудных спектров гидрогеологических откликов нижнего горизонта на взрывы находятся преимущественно в диапазоне частот 28–32 и 48–52 Гц, верхнего – регистрируются в диапазоне 50–75 Гц. При увеличении эпицентрального расстояния между взрывной камерой и пунктом наблюдений отмечается расщепление и

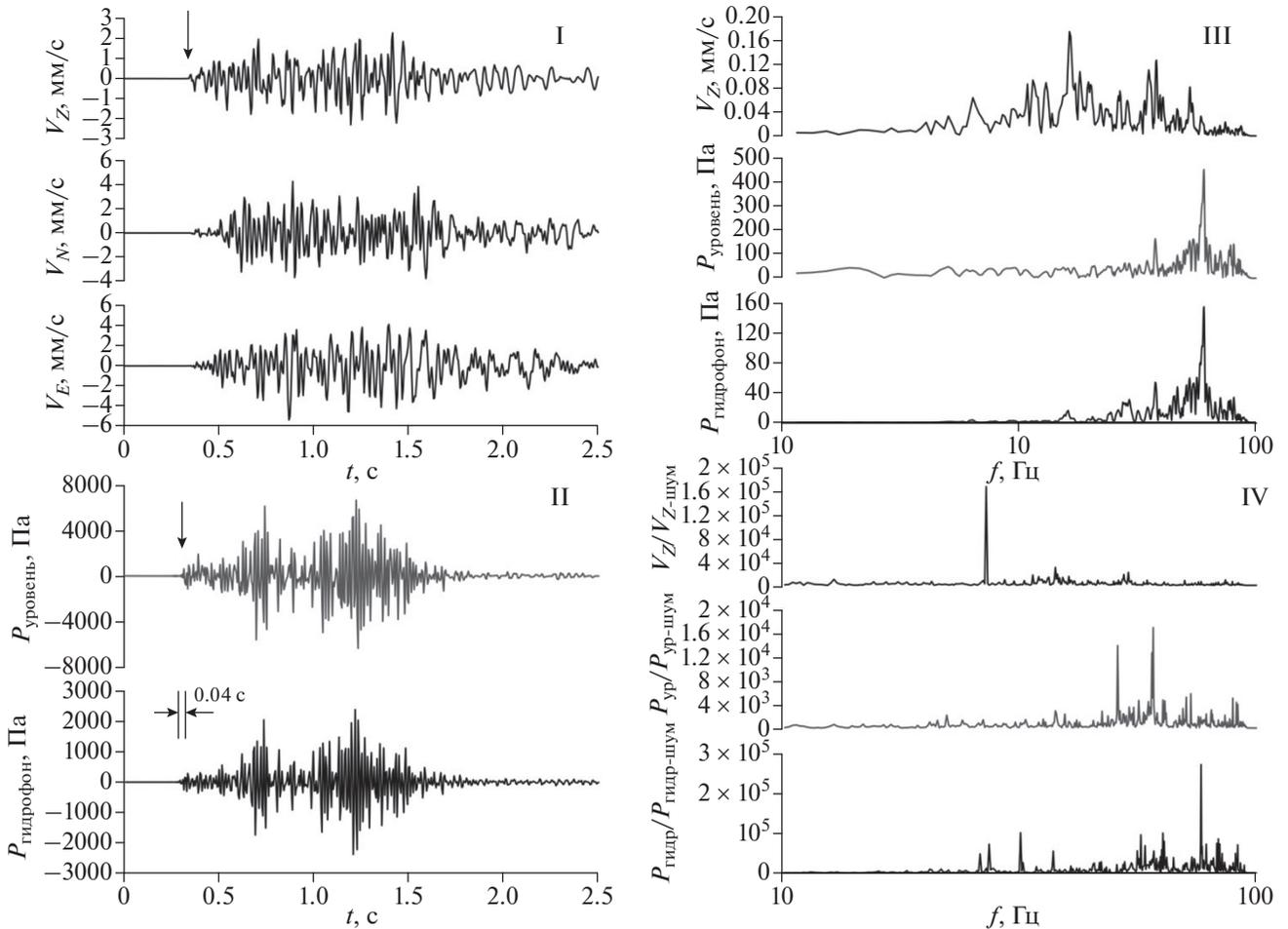


Рис. 6. Сейсмограммы (I), диаграммы вариаций давления в системе “пласт–скважина” (II), амплитудные (III) и нормированные (IV) спектры при одновременном подрыве в двух камерах, расположенных на приведенных расстояниях 190 и 234 м/кг^{1/3} от пункта наблюдений 2 (стрелками обозначены времена вступлений).

смещение интенсивности спектра вариаций уровня нижнего горизонта на частоту 25 Гц, которая частично выражена в спектрах скорости смещения грунта. В верхнем горизонте прослежено смещение экстремумов гидрогеологических откликов к диапазону частот 48–50 Гц и ниже – до частоты 25 Гц. Подобные различия не могут быть объяснены пороупругим деформированием водонасыщенного коллектора.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе данных синхронного сейсмического и гидрогеологического мониторинга, проводимого на территории ГФО “Михнево” (площадка 1) и в пределах разрабатываемого железорудного месторождения КМА (площадка 2), исследована реакция флюидонасыщенного коллектора на удаленные землетрясения и массовые взрывы. Средние значения физико-механических параметров рассматриваемых коллекторов (плотность – ρ ,

скорость продольных волн в массиве – C , модуль Юнга – E) на территории ГФО “Михнево” и пределах разрабатываемого месторождения, диапазоны вариаций массовых скоростей (V_m) и относительной деформации (e) приведены в табл. 2.

Полученные значения относительной деформации коллектора при сейсмическом воздействии на два порядка превышают фоновые параметры смещения грунта по вертикальной компоненте, рассчитанные для основных типов приливных волн на площадках 1 и 2, которые составляют $(0.4–7.5) \times 10^{-9}$. Результаты совместной обработки данных, полученных при сейсмическом воздействии удаленных землетрясений и массовых взрывов, использованы при построении сводных диаграмм зависимости скорости смещения грунта и относительной деформации разных литологических типов коллекторов, представленных известняками, сланцами и кварцитами, от расстояния (рис. 7).

Таблица 2. Основные параметры водонасыщенных коллекторов [Геологический..., 1985; Терминологический..., 2011]

Водовмещающие породы	ρ , кг/м ³	C , м/с	E , ГПа	V_m , мм/с		$e \times 10^{-7}$		Примечание
				min	max	min	max	
Известняк	~2680	~4700	~80	0.08	3.78	0.12	5.95	Площадка 1
Сланец	~2800	~4800	~90	0.30	14.40	0.44	21.50	Площадка 2
Кварцит	~3400	~5000	~110	1.20	12.34	1.85	19.07	

Максимальные значения относительной деформации коллекторов, рассчитанные для массовых взрывов, превышают параметры, зарегистрированные при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений. На территории ГФО “Михнево” расчетная относительная деформация карбонатного коллектора, при которой зарегистрированы косейсмические отклики на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений, изменяется от 0.9×10^{-8} до 1.5×10^{-7} .

Постсейсмические эффекты, отмеченные для 4 землетрясений в виде подъема уровня, соответствуют относительной деформации водонасыщенного коллектора в пределах $(3-7) \times 10^{-7}$ (врезка на рис. 7а). Максимальная амплитуда постсейсмического подъема уровня до 15 мм (147 Па), установленная на эпицентральной дистанции 7467 км при землетрясении 11.03.2011 г. Тохоку, Япония M_w 9.1 при максимальной скорости смещения грунта 3.78 мм/с, соотносится с данными, пред-

ставленными в статье [Shalev et al., 2016]. Показано, что на расстоянии 300 км от эпицентра землетрясения 24.09.2013 г. в Пакистане M_w 7.7 в скважине Meizar 1, Израиль глубиной 900 м, пройденной в отложениях мела, установлено увеличение давления в системе “пласт–скважина” на 200 Па при максимальной скорости смещения грунта 4 мм/с. Непосредственно в массиве горных пород, в окрестностях подземной лаборатории Gran Sasso (центральная Италия) за период наблюдений с мая 2015 г. по январь 2017 г. в горизонтальной скважине S13 длиной 190 м были зарегистрированы отклики на два землетрясения M_w 6.0 и M_w 6.5, произошедшие 24.08. и 30.10.2016 г. северо-западнее на расстоянии 39 и 57 км [Luca et al., 2018]. Вариации давления составили 0.18–0.22 МПа при максимальной скорости смещения грунта по вертикальной компоненте 54 мм/с.

В техногенно-нарушенных условиях при массовых взрывах относительная деформация кол-

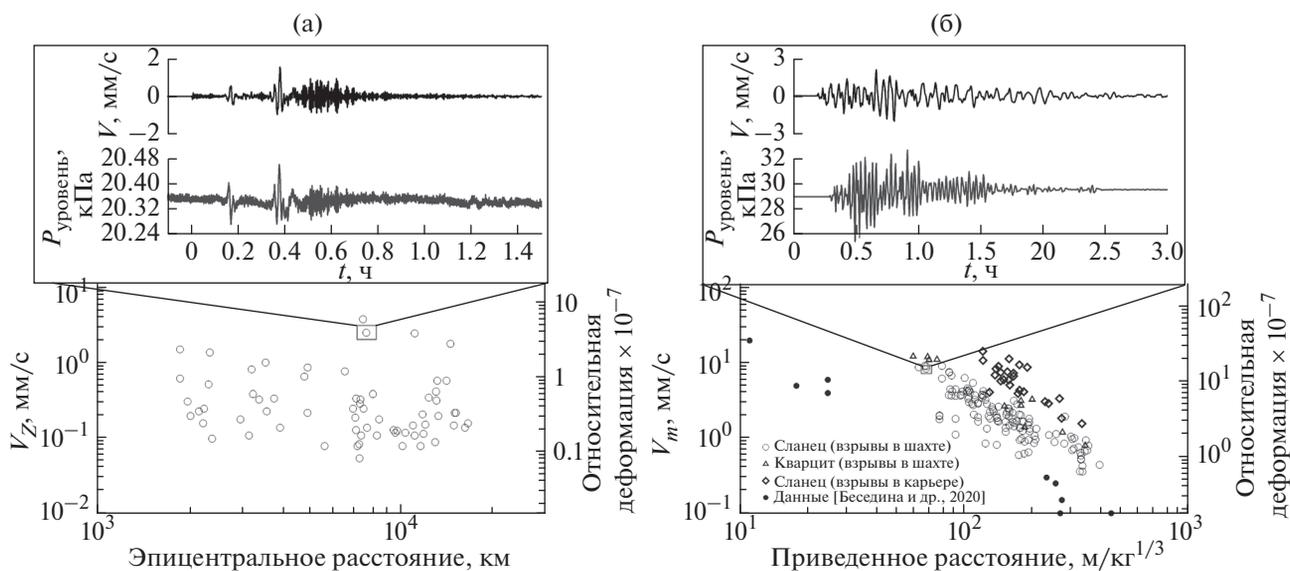


Рис. 7. Зависимость максимальной массовой скорости и максимальной деформации водонасыщенного коллектора трещинно-порового типа от эпицентрального расстояния удаленных землетрясений, зарегистрированных на территории ГФО “Михнево” (а) и от приведенного расстояния массовых взрывов, проведенных при разработке железорудного месторождения в шахте и на карьере (б) (на диаграмме на вставках показаны примеры постсейсмических гидрогеологических эффектов, выделенных при прохождении сейсмических волн от землетрясения 11.04.2012 M_w 8.6 вблизи Северной Суматры и взрыва 18.04.2020 г. в шахте с удельной массой ВВ в ступени 1.9 т; на диаграмме (б) залитыми кружками обозначены данные измерений, выполненные в шахте [Беседина и др., 2020]).

лекторов трещинно-порового типа варьирует в широких пределах от 0.5×10^{-7} до 2×10^{-6} и сопоставима с результатами измерений, выполненных в горных выработках на глубине ~ 300 м (рис. 76) [Беседина и др., 2020]. При разработке железорудного месторождения открытым способом в карьере на приведенных расстояниях $100\text{--}200$ м/кг^{1/3} относительное деформирование коллектора в 2 и более раз выше, что может быть обусловлено усилением эффекта сейсмического воздействия из-за отсутствия литостатической нагрузки. В верхнем горизонте, сложенном песком глинистым, постсейсмическое увеличение давления на $100\text{--}566$ Па отмечено при отработке глубоко залегающих горизонтов в карьере с максимальными значениями удельных масс ВВ в ступени и в шахте, расположенной на минимальном приведенном расстоянии от пункта наблюдений. Постсейсмическое увеличение давления в системе “пласт–скважина” на 554 Па при относительной деформации коллектора, приуроченного к сланцам, 1.4×10^{-6} прослежено при взрыве в шахте на минимальном приведенном расстоянии (врезка на рис. 76). Кристаллические сланцы относятся к грунтам средней прочности, так как среднее значение предела прочности на сжатие монолитов, отобранных из горных выработок, не превышает 18 МПа [Геологический..., 1985]. Подобных постсейсмических вариаций давления в пункте II в системе “пласт–скважина” в нижнем горизонте в кварцитах, которые характеризуются более высокими средними значениями предела прочности на сжатие 48 МПа, не отмечено при регистрации взрывов с максимальными значениями скорости смещения грунта $12.1\text{--}12.3$ мм/с на приведенных расстояниях от 46 до 81 м/кг^{1/3} (рис. 5).

Максимальные амплитуды вариации давления в системе “пласт–скважина”, приуроченной к кварцитам, достигают $9.5\text{--}13$ кПа на приведенном расстоянии $190\text{--}235$ м/кг^{1/3} и не противоречат данным, полученным при измерении максимальных значений давления на фронте ударно-воздушной волны (УВВ), которые составили $12.9\text{--}17.3$ кПа на эпицентральной дистанции $60\text{--}66$ м (приведенное расстояние $13.7\text{--}15.1$ м/кг^{1/3}) при проведении технологических взрывов в шахте “Магнезитовая” на горизонте $+200$ м (г. Сатка, Челябинская область) [Меньшиков и др., 2019]. В течение 3.5 с давление на фронте УВВ уменьшилось до 2 кПа. Максимальная результирующая скорость сейсмических колебаний грунта составила 69.8 мм/с на эпицентральной дистанции 90 м [Кутуев и др., 2020].

Выполненный анализ результатов прецизионных измерений вариаций уровня подземных вод в наблюдательных скважинах, расположенных на территории ГФО “Михнево” и в пределах разрабатываемого месторождения, показал наличие

как динамических, так и постсейсмических эффектов. Динамические воздействия низкочастотных поверхностных колебаний от удаленных землетрясений и высокочастотных от массовых взрывов могут рассматриваться в качестве одного из факторов, соответствующих локальному квазиобратимому изменению структуры трещинно-порового пространства и/или порового давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе обработки полученных экспериментальных данных выделены общие закономерности реакции водонасыщенных коллекторов на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений и взрывов.

Прослежена степенная зависимость между максимальной массовой скоростью и реакцией водонасыщенных коллекторов порового и трещинно-порового типов на прохождение сейсмических волн от удаленных землетрясений и массовых взрывов и определены диапазоны динамического деформирования различных типов коллекторов.

В платформенных условиях на территории ГФО “Михнево” косейсмические вариации первого и второго типов, зарегистрированные при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений, соответствуют пороупругой реакции пласта при относительной деформации карбонатного коллектора трещинно-порового типа от 0.9×10^{-8} до 1.5×10^{-7} . Постсейсмические эффекты прослежены при относительной деформации коллектора трещинно-порового типа $(3\text{--}7) \times 10^{-7}$.

В пределах разрабатываемого железорудного месторождения впервые определены диапазоны вариаций давлений в водонасыщенных коллекторах, распространенных над шахтным полем, которые изменяются в широком диапазоне от 20 Па до 13 кПа на приведенных расстояниях от 63 до 404 м/кг^{1/3} при максимальной скорости смещения грунта от 0.3 до 12.3 мм/с и относительной деформации от 0.5×10^{-7} до 2×10^{-6} . Проявление постсейсмического эффекта зарегистрировано при максимальной массовой скорости смещения грунта 9.1 и 9.5 мм/с в виде увеличения давления на $0.1\text{--}0.5$ кПа в верхнем и нижнем горизонтах при прохождении сейсмических волн от взрывов в шахте и карьере и зависит от параметров взрыва, расстояния до пункта наблюдений, литологии водовмещающих пород.

Амплитудные и нормированные спектры гидрогеологических откликов на прохождение сейсмических волн от землетрясений и взрывов различаются. Максимумы амплитудных спектров гидрогеологических откликов карбонатного коллектора при прохождении сейсмических волн от землетрясений преимущественно регистрируют-

ся в диапазоне 0.03–0.06 Гц и частично перекрываются с основными колебаниями грунта. При взрывах максимумы спектров давления в системе “пласт–скважина” регистрируются преимущественно в области высоких частот от 25 до 80 Гц, экстремумы спектров скорости смещения грунта, напротив, в диапазоне низких частот 1–10 Гц, реже – более 10 Гц.

Полученные значения реакции водонасыщенных коллекторов на массовые взрывы дополняют информацию по регистрации гидрогеологических откликов в дальней зоне землетрясений при увеличении значений скорости смещения грунта. Эффекты постсейсмического увеличения давления в системе “пласт–скважина”, вероятно, связаны с проявлением скин-эффекта при динамическом воздействии из-за кольтматации/декольтматации трещин в околоскважинном пространстве и локальных вариаций порового давления.

Отмеченные закономерности подтверждают высокую эффективность прецизионного гидрогеологического мониторинга. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики прогнозной оценки вариаций давлений в водонасыщенных коллекторах и относительной деформации при динамическом воздействии, которые рекомендуется учитывать при строительстве объектов повышенного уровня ответственности и разработке месторождений с использованием взрывных технологий в сложных инженерно-геологических условиях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность главному гидро-технику АО “Комбинат КМА-руда” С.А. Войнову за предоставленные геологические материалы и помощь в организации измерений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117112350020-9) и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 19-05-00809 и 20-35-90016.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адушкин В.В., Спивак А.А., Горбунова Э.М., Каазик П.Б., Недбаев И.Н. Гидрогеологические эффекты при крупномасштабных подземных взрывах (препринт). М.: ИФЗ АН СССР. 1990. 40 с.

Батухтин И.В., Беседина А.Н., Горбунова Э.М., Петухова С.М. Динамическое деформирование флюидонасыщенных коллекторов по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга на территории гео-

физической обсерватории “Михнево”. Процессы в геосферах. 2020а. № 4(26). С. 867–876.

Батухтин И.В., Беседина А.Н., Горбунова Э.М., Петухова С.М. Реакция водонасыщенных коллекторов на проведение массовых взрывов. Динамические процессы в геосферах. Сборник ИДГ РАН. М.: GEOS. 2020б. С. 36–45.
<https://doi.org/10.26006/IDG.2020.77.82.005>

Беседина А.Н., Горбунова Э.М., Остапчук А.А., Павлов Д.В. Отклик водонасыщенного коллектора на прохождения сейсмических волн в ближней зоне массового взрыва в шахте. Динамические процессы в геосферах. Сборник ИДГ РАН. М.: GEOS. 2019. С. 70–78.
<https://doi.org/10.26006/IDG.2019.11.44377>

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. № 3. С. 12–24.
<https://doi.org/10.15372/FTPRPI20200302>

Гавич И.К. Гидрогеодинамика: Учебник для вузов. М.: Недра. 1988. 349 с.

Гасеми М.Ф., Байюк И.О. Граничные значения параметров строения пустотного пространства петроупругих моделей карбонатных пород // Физика Земли. 2020. № 2. С. 69–88.
<https://doi.org/10.31857/S0002333720020039>

Геологический отчет о детальной разведке железистых кварцитов Стретенского участка Коробковского месторождения КМА. Белгород. 1985.

Горбунова Э.М., Батухтин И.В., Беседина А.Н., Павлов Д.В., Шарафиев З.З. Опыт измерений вариаций уровня подземных вод при массовых взрывах. Динамические процессы в геосферах. Сборник ИДГ РАН. М.: ИДГ РАН. 2019. С. 17–26.
<https://doi.org/10.26006/IDG.2019.11.38611>

Горбунова Э.М., Беседина А.Н., Виноградов Е.А. Динамика деформирования водонасыщенного коллектора по данным прецизионного мониторинга уровня подземных вод. Динамические процессы в геосферах. Вып. 10. Сб. научн. тр. М.: ИДГ РАН. 2018. С. 74–83.

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.: GEOS. 2008. С. 62–72.

Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука. 2015. 328 с.

Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: ООО “Камчатпресс”. 2019. 144 с.

Кочарян Г.Г., Виноградов Е.А., Горбунова Э.М. Изменения флюидодинамического режима подземных коллекторов под действием сейсмических колебаний. Часть 1. Анализ результатов наблюдений. Динамические процессы в геосферах. Сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: GEOS. 2010. С. 70–79.

- Кутуев В.А., Жариков С.Н., Меньшиков П.В. Анализ воздействия взрывов на подземные горные выработки шахты “Магнетитовая” // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2020. Т. 7. № 2. С. 11–17.
- Меньшиков П.В., Кутуев В.А., Жариков С.Н. Исследование ударной волны в подземных горных выработках на шахте “Магнетитовая” // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2019. Т. 6. № 1. С. 99–104.
- Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии. М. : КДУ. 2011. 952 с.
- 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 Resour. Res.* 2016. P. 1–14. <https://doi.org/10/1002/2015WR017346>
- Besedina A., Vinogradov E., Gorbunova E., Svintsov I. Chilean Earthquakes: Aquifer Responses at the Russian Platform // *Pure Appl. Geophys.* 2016. V. 173. № 2. P. 321–330.
- Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № B8. 2390. P. 7-1–7-10. <https://doi.org/10.1029/2002JB002321>
- Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennett R.R. The response of well-aquifer systems to seismic waves // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. № 16. P. 3915–3926.
- Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C. Seismic waves increase permeability // *Letters*. 2006. V. 441. P. 1135–1138. <https://doi.org/10.1038/nature04798>
- Geologic and hydrologic effects of the MILROW event, Amchitka, Aleutian Islands, Alaska // *U.S. Geol. Surv. Rept.* 1971. USGS-474-32. P. 85.
- Hassan A., Pohlmann K., Chapman J. Modeling groundwater flow and transport of radionuclides at Amchitka Island’s Underground Nuclear Tests: Mirlow, Long Shot, and Can-nikin. Nevada Operations Office. U.S. Department of Energy. Las Vegas. Nevada. 2002. 338 p.
- Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth tide analysis // *Water Resour. Res.* 1987. V. 23. P. 1824–1832.
- Kabychenko N.V., Gorbunova E.M., Besedina A.N. Deformation mode of water-saturated collector by precision hydrogeological monitoring // *AIP Conference Proceedings*. 2019. V. 2167. № 1. P. 020142. <https://doi.org/10.1063/1.5132009>
- Kitagawa Y., Itaba S., Matsumoto N., Koizumi N. Frequency characteristics of the response of water pressure in a closed well to volumetric strain in the high frequency domain // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. № B08301. P. 1–12. <https://doi.org/10.1029/2010JB007794>
- Luca G.D., Carlo G.D., Tallini M. A record of changes in the Gran Sasso groundwater before, during and after the 2016 Amatrice earthquake, central Italy // *Scientific reports*. 2018. V. 8. № 15982. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34444-1>
- Shalev E., Kurson I., Doan M.-L., Lyakhovskiy V. Sustained water-level changes caused by damage and compaction induced by teleseismic earthquakes // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2016. V. 121. № 7. P. 1–12. <https://doi.org/10.1002/2016JB013068>
- Vinogradov E., Gorbunova E., Besedina A., Kabychenko N. Earth Tide Analysis Specifics in Case of Unstable Aquifer Regime // *Pure Appl. Geophys.* 2017. V. 174. № 6. ISSN 0033-4553. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1585-z>.
- Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // *BIM*. 1994. V. 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. V. 340. P. 1555–1559.

Response of Water-Saturated Reservoirs to a Dynamic Impact Based on the Data of Groundwater-Level Monitoring by Precision Measurements

E. M. Gorbunova^{a, *}, A. N. Besedina^a, N. V. Kabychenko^a,
I. V. Batukhtin^a, and S. M. Petukhova^a

^a*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: emgorbunova@bk.ru*

The deformation modes of water-saturated reservoirs under dynamic impact are studied based on the groundwater-level monitoring by precision measurements. It is assumed that a quasi-stationary factor determining the background poroelastic groundwater-level fluctuations in the reservoir–well system is the Earth’s tides. Hydrogeological responses to seismic waves from remote earthquakes and mass blasts produced during iron ore mining are used for estimating relative deformation of water-saturated reservoirs. The study objects are located both beyond the zone of active manmade impact on the geological environment (in the territory of Geophysical observatory “Mikhnevo” of the Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Sciences) and in the anthropogenically disturbed conditions—in the industrial region close to the town of Gubkin, Belgorod Oblast. The complex processing of seismic, barometric, and hydrogeological signals synchronously recorded by the instrumental measuring systems in the observation wells and at the near-mouth sites is aimed at revealing common patterns in the responses of water-saturated reservoirs to a dynamic impact. The comparative analysis of the amplitudes of groundwater level fluctuations and pressure variations in

the reservoir–well system was carried out with the allowance for the ground motion velocities and the reduced distances from the remote earthquakes and mass explosions. The response of the porous and porous–fractured water-saturated reservoir types is different. Alongside with the coseismic hydrogeological effects, a postseismic groundwater-level rise and an increase in pressure are revealed, indicating a local change in poroperm properties of a water-saturated reservoir. The maximum ground velocities and pressure in the reservoir–well system at which the deformation regimes change from a poroelastic to a quasi reversible response are established.

Keywords: water-saturated reservoir, dynamic impact, hydrogeological response, mass velocity, relative deformation, instrumental measuring systems