

УДК 550.347.097, 550.8.056

## РЕЖИМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПО ДАННЫМ ПРЕЦИЗИОННОГО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА (обзор исследований)

© 2023 г. С. М. Петухова\*, Э. М. Горбунова

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия**\*E-mail: sofya.petukhova@gmail.com*

Исследованию механизмов деформирования флюидонасыщенных коллекторов посвящено большое количество научных работ. Данные дистанционного прецизионного гидрогеологического мониторинга позволяют объективно оценивать фильтрационные свойства флюидонасыщенных коллекторов. Реакция системы «пласт – скважина» на атмосферное давление, земные приливы и прохождение сейсмических волн от землетрясений проявляется в виде осцилляций уровня подземных вод, косейсмических и постсейсмических эффектов. Гидрогеологические отклики на квазистационарные факторы соответствуют пороупругому деформированию массива горных пород. Эпизодическое сейсмическое воздействие может приводить как к пороупругой, так и к неупругой реакции флюидонасыщенного коллектора. В ближней зоне землетрясений, в области статических напряжений, установлено скачкообразное (ступенчатое) изменение проницаемости, которое может быть связано с различными механизмами. К ним относятся разжижение дисперсного грунта, дилатансия – трещинообразование на контакте пород с разными прочностными характеристиками и другие. В промежуточной и дальней зонах, области динамических напряжений, длиннопериодные колебания, вызванные прохождением поперечных и поверхностных волн, могут приводить к кольматации/декольматации микротрещин и вариациям проницаемости. Формирование целостного представления о режиме деформирования массива горных пород при сейсмическом воздействии направлено на прогнозную оценку возможных изменений фильтрационных свойств флюидонасыщенных коллекторов.

**Ключевые слова:** флюидонасыщенный коллектор, проницаемость, сейсмическое воздействие, пороупругая реакция, необратимое деформирование, механизмы, прецизионный гидрогеологический мониторинг.

**Для цитирования:** Петухова С.М., Горбунова Э.М. Режимы деформирования флюидонасыщенных коллекторов при сейсмическом воздействии по данным прецизионного гидрогеологического мониторинга (обзор исследований) // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 4. С. 44–59. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2023\\_15\\_4\\_44](http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_4_44)

### Введение

На современном этапе исследований результаты прецизионного гидрогеологического мониторинга используются для определения типа флюидонасыщенного коллектора [Rahi, Halihan, 2013], оценки фильтрационных параметров [Xue et al., 2013; Sun et al., 2018; Liao et al., 2021], исследования реакции флюидонасыщенного коллектора на динамическое воздействие [Барабанов и др., 1988; Любушин и др., 1997; Киссин, 2015; Lai et al., 2013] и анализа изменений его свойств при прохождении сейсмических волн от землетрясений [Brodsky et al., 2003; Elkhoury et al., 2006]. Изменения уровня подземных вод в недренируемых условиях рассматриваются в качестве индикатора динамического деформирования флюидонасыщенного коллектора и вариаций порового давления. На основе ретроспективной обработки полученных материалов выполняется разработка моделей и механизмов деформирования флюидонасыщенного коллектора [Manga, Wang, 2015; Shi, Wang, 2017; Xing et al., 2022] и др., а также поиск предвестников землетрясений [Вартанян, 2002; Копылова, Болдина, 2019; King, Chia, 2018; Sun et al., 2017] и др.

Научно-методический подход, который используется при выполнении комплексных измерений в пунктах наблюдений, включающий синхронные измерения сейсмических, гидрогеологических и барометрических параметров, является перспективным при анализе вариаций порового давления и деформирования матрицы флюидонасыщенного коллектора при сейсмическом воздействии. По результатам полевых измерений прослежена тесная взаимосвязь между полями напряжений и вариациями уровня подземных вод, которая свидетельствует об упругом и неупругом деформировании флюидонасыщенных коллекторов. В качестве основных механизмов наряду с кольматацией/декольматацией микротрещин коллоидными частицами рассматривается возможное изменение раскрытия микротрещин [Manga et al., 2012]. Особое практическое и научное значение приобретает корректное определение основных механизмов, влияющих на вариации фильтрационных параметров системы «пласт – скважина» при прохождении сейсмических волн от землетрясений.

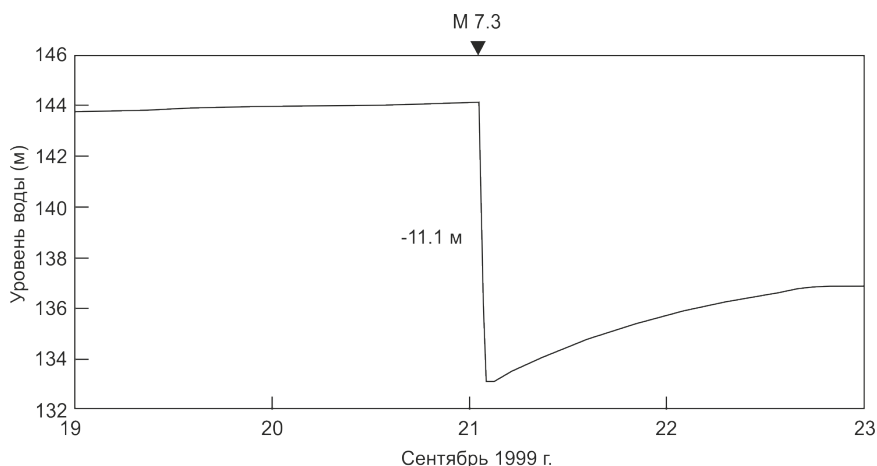
В статье представлен обзор сведений по исследованию режимов деформирования флюидонасыщенных коллекторов. В первом разделе приведено описание гидрогеологических откликов, регистрируемых в ближней, промежуточной и дальней зонах землетрясений. Во втором разделе представлены данные по оценке и вариации проницаемости флюидонасыщенных коллекторов, которые свидетельствуют о разных режимах деформирования массива горных пород под влиянием земных приливов и при сейсмическом воздействии. В заключительном разделе рассмотрены основные модели и механизмы, описывающие взаимосвязь между изменениями фильтрационных свойств флюидонасыщенных коллекторов и землетрясениями.

### Гидрогеологические отклики на землетрясения

Реакция флюидонасыщенных коллекторов на сейсмическое воздействие зависит от параметров землетрясений, локальных структурно-гидрогеологических условий и амплитудно-частотных характеристик системы «пласт – скважина». В ближней зоне, сопоставимой с длиной разлома ( $L$ ) [Wang, Manga, 2010], в области статических напряжений, необратимое деформирование флюидонасыщенного коллектора трещинно-порового типа проявляется в виде продолжительных постсейсмических изменений уровня подземных вод.

Флюидонасыщенный коллектор, представленный дисперсными несвязными грунтами, может переходить в состояние разжижения (текучее, плавунное) при интенсивном сейсмическом воздействии, включающем стадии разрушения структурных связей, течения и последующего уплотнения грунта.

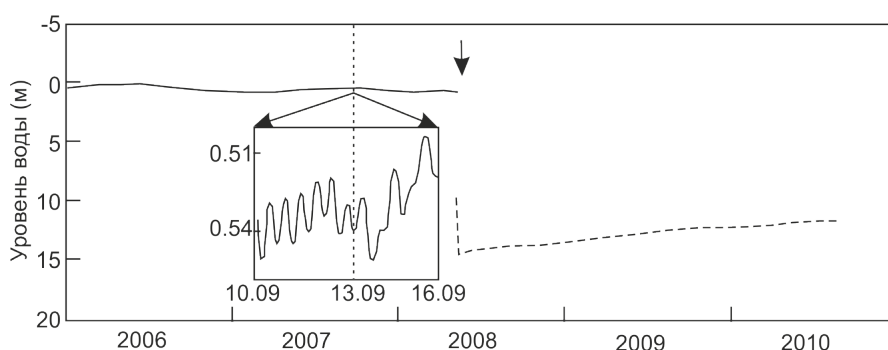
В ближней зоне наблюдаются устойчивые постсейсмические изменения уровня, вызванные статическими деформациями. Амплитуда этих ступенеобразных изменений может варьировать от нескольких десятков сантиметров до первых метров. Например, при внутриплитном землетрясении Чи-Чи (*Chi-Chi*) 21.09.1999 г., M7.3 на Тайване на расстоянии  $\sim 10$  км от разлома *Chelungpu* прослежено снижение уровня подземных вод с амплитудой от 0.5 до 11.1 м в 8 наблюдательных скважинах (рис. 1) [Chia et al., 2008].



**Рис. 1.** Постсейсмическое снижение уровня в скважине JS2 при землетрясении Чи-Чи 21.09.1999 г., M7.3 [Chia et al., 2002]

Максимальное снижение уровня зарегистрировано на расстоянии 1 км западнее разлома и 14 км от эпицентра землетрясения в скважине JS2, вскрывающей напорный водоносный горизонт в интервале 158–186 м, приуроченный к гравийным отложениям (рис. 1) [Chia et al., 2002].

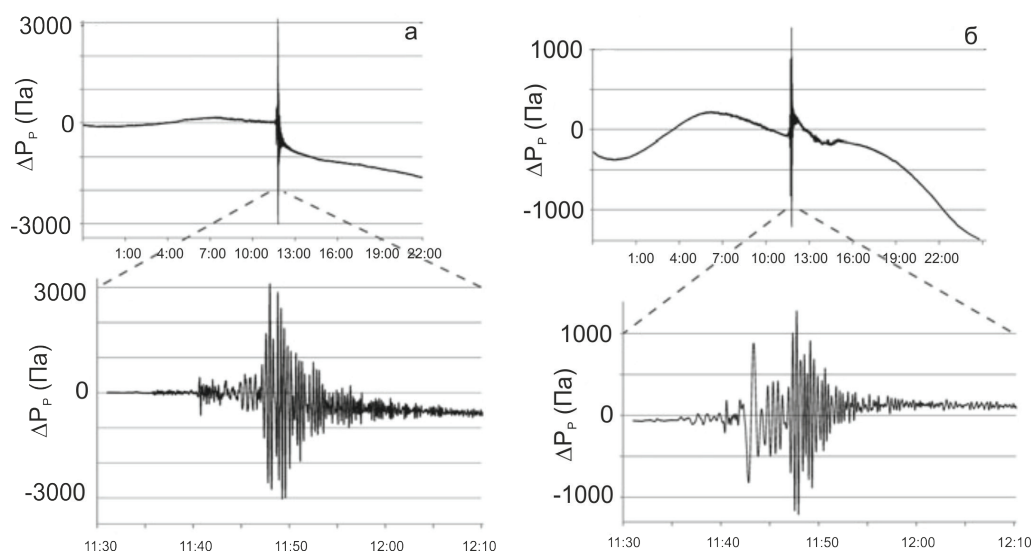
Подобное скачкообразное и постепенное снижение уровня на 0.7–16 м также установлено в зонах разломов, сопряженных с трансформным разломом *Longmenshan*, в пределах которого произошло землетрясение Венчуань (*Wenchuan*) 12.05.2008 г., M7.9 [Xue et al., 2013; Lai et al., 2014]. В скважине *Jianguoyou* глубиной 4 км, удаленной на расстояние 21 км от разлома *Longmenshan* и 161 км от эпицентра землетрясения, снижение уровня напорного горизонта, приуроченного к песчаникам триаса, составило 9.2 м (рис. 2) [Liao et al., 2015].



**Рис. 2.** Постсейсмическое снижение уровня в скважине *Jianguoyou* при землетрясении Венчуань 12.05.2008 г., M7.9, на врезке – данные прецизионного мониторинга [Liao et al., 2015]

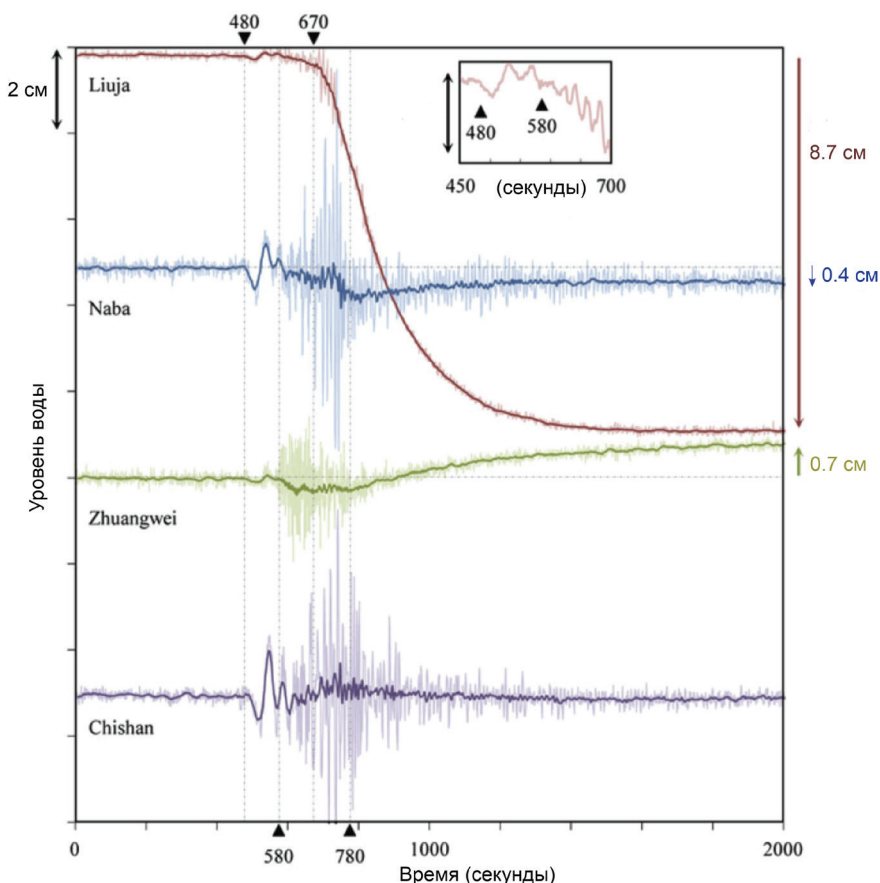
В промежуточной зоне, которая определяется эпицентральной расстоянием, составляющим от 1 до 10 длины разлома, и дальней, на эпицентральных расстояниях более 10 длины разлома, гидрогеологические отклики в флюидонасыщенных коллекторах изменяются в широких пределах от первых сантиметров до десятков [Lee et al., 2012; Shi et al., 2014; Shibata et al., 2020; Liu et al., 2023]. В частности, при землетрясении в Пакистане 24.09.2013 г., M7.7 в скважинах, расположенных на эпицентральных расстояниях ~ 3000 км в Израиле, прослежены различные гидрогеологические эффекты.

В скважине *Gome 1* глубиной 350 м, пройденной на расстоянии 80 м от основного разлома в интенсивно трещиноватых песчаниках, установлено постсейсмическое уменьшение порового давления на 0.6 кПа. В скважине *Meizar 1* глубиной 1.25 км, вскрывшей доломиты с прослоями глин, мергеля, отмечено увеличение порового давления на 0.5 кПа (рис. 3) [Shalev et al., 2021]. Высказано предположение, что уменьшение порового давления связано с увеличением трещиноватости водовмещающих пород; увеличение обусловлено уплотнением пород.



**Рис. 3.** Гидрогеологические отклики в скважинах: а – *Gome 1*, б – *Meizar 1* (Израиль) на землетрясение в Пакистане 24.09.2013 г., M7.7 [Shalev et al., 2021]

При землетрясении Венчуань на расстоянии  $\sim 2000$  км в 80 скважинах, расположенных на острове Тайвань, зарегистрированы гидрогеологические отклики в виде снижения уровня на 40 см и подъема на 23 см (рис. 4) [Lee et al., 2012]. В ряде наблюдательных скважин были прослежены постсейсмические эффекты, которые проявились с запаздыванием через 7–20 минут после прохождения группы поверхностных волн от землетрясения.



**Рис. 4.** Косейсмические и постсейсмические эффекты, зарегистрированные в наблюдательных скважинах, расположенных на острове Тайвань, при землетрясении Венчуань 12.05.2008 г., M7.9 [Lee et al., 2012]

В результате обработки большого объема экспериментальных данных, полученных при регистрации гидрогеологических эффектов, связанных с землетрясением Венчуань 12.05.2008 г., M7.9 [He, Sing, 2018], не установлены зависимости между амплитудами косейсмических вариаций уровней и пространственным распределением наблюдательных скважин относительно эпицентра землетрясений. Тем не менее, высказано интересное предположение о взаимосвязи между видом отмеченных гидрогеологических откликов и положением наблюдательных скважин в области питания, транзита и разгрузки подземных вод. Косейсмический подъем уровня преимущественно установлен в скважинах, расположенных вблизи области питания подземных вод, снижение – в области разгрузки, вариации уровня – в зоне транзита. Реакция на прохождение сейсмических волн отсутствует в скважинах, вскрывших дренируемый водоносный горизонт.

По данным режимных наблюдений в скважинах, глубиной от 14 до 300 м, расположенных на острове Тайвань на эпицентральной расстоянии 2600 км и пройденных преимущественно в дисперсных грунтах (песчано-гравийных отложениях), косейсмический отклик на землетрясение Тохоку (*Tohoku*), Япония, 11.03.2011 г., M9.1 прослежен в единичных скважинах в виде кратковременных осцилляций порового давления. При землетрясении Венчуань зарегистрированы как косейсмические вариации порового давления, так и постсейсмическое снижение уровня на 8.8–12.6 см. Вероятно, различие реакции

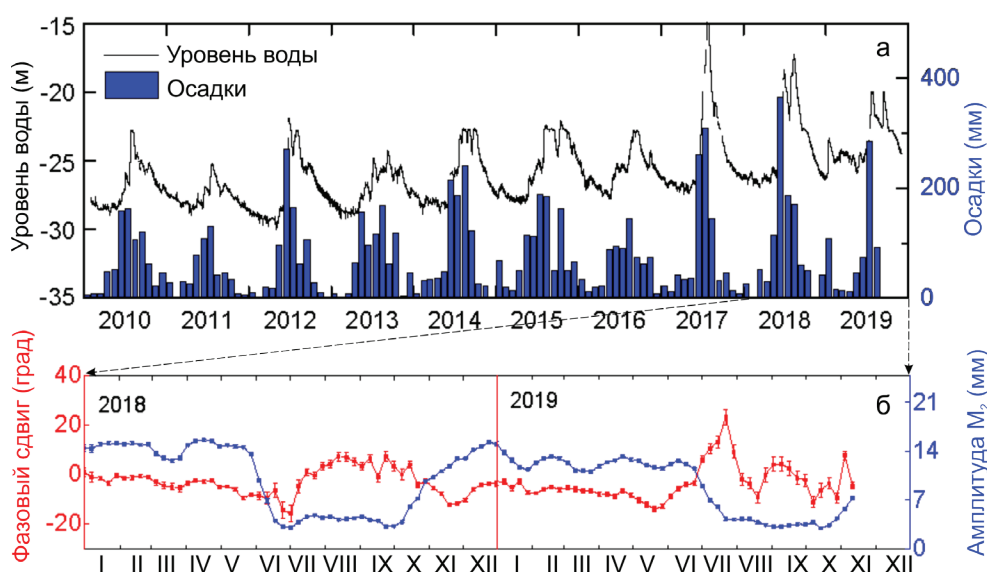
гидрогеологической структуры острова Тайвань зависит от ее приуроченности к границе между Евразийской и Филиппинской плитами [Liu et al., 2023]. Землетрясение Венчуань, как отмечено выше, произошло в пределах трансформного разлома *Longmenshan*, расположенного в пределах Евразийской плиты. Землетрясение Тохоку произошло в зоне субдукции Тихоокеанской плиты под Охотскую.

### Вариации проницаемости флюидонасыщенных коллекторов

Проницаемость флюидонасыщенных коллекторов является динамичным параметром, контролирующим условия движения флюидов в порах и трещинах массива горных пород. Для оценки проницаемости флюидонасыщенных коллекторов используется невозмущающий метод обработки данных прецизионного гидрогеологического мониторинга, выполняемого в наблюдательных скважинах. В качестве зондирующего сигнала рассматривается отклик на приливную волну лунного типа  $M_2$  с периодом 12.42 часа, которая устойчиво выделяется в вариациях уровня подземных вод и не осложнена влиянием внешних факторов, включая атмосферное давление. Теоретическое смещение и объемная деформация грунта рассчитываются с использованием программных пакетов Baytap-G [Tamura et al., 1991], ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994] и других. Фильтрационные параметры флюидонасыщенного коллектора – водопроницаемость и проницаемость – определяются по фазовому сдвигу между приливной волной  $M_2$ , выделенной в смещении грунта, и вариациях уровня подземных вод. Теоретические основы метода представлены в статье [Hsieh et al., 1987].

В квазистационарных условиях результаты анализа многолетних рядов фазового сдвига и проницаемости в сейсмоактивных областях [Болдина, Копылова, 2023; Liao et al., 2022] и в условиях платформы [Петухова, 2023; Vinogradov et al., 2017] свидетельствуют о наличии сезонных вариаций рассматриваемых параметров. Медианные значения проницаемости, полученные за период наблюдений 2009–2018 гг. для 17 скважин, расположенных вдоль разлома Сан-Андреас и субдукционной зоны *Cascadia*, относительно постоянны, изменяются от  $6.4 \cdot 10^{-16}$  до  $6.2 \cdot 10^{-14}$  м<sup>2</sup> и согласуются с литологическим составом водовмещающих пород [Simon et al., 2021]. Анализ повторяющихся рядов позволил выделить только одну скважину, в которой отмечено увеличение проницаемости под влиянием сейсмического воздействия от землетрясений.

Данные прецизионного гидрогеологического мониторинга подтверждают взаимосвязь между вариациями уровня подземных вод, значениями амплитуд приливной волны и фазовым сдвигом (рис. 5) [Liao et al., 2022]. В паводковый период в связи с увеличением скорости суточных вариаций



**Рис. 5.** а – изменения уровня подземных вод в скважине и количество осадков; б – вариации амплитуды приливной волны  $M_2$  (синяя линия) и фазового сдвига (красная линия) [Liao et al., 2022]



уровня происходит искажение и сглаживание амплитуды приливного отклика. Отмечается смена фазы приливной волны  $M_2$ , выделенной в смещении грунта и уровне подземных вод, от отставания до опережения [Wang et al., 2018; Ingebershion, Manga, 2019]. Подобные интервалы с положительными значениями фазового сдвига следует исключать из рассмотрения при оценке фазового сдвига [Vinogradov et al., 2017].

В результате лабораторных исследований определено, что внешнее воздействие в виде вибрации может приводить к декольматации трещин и увеличению проницаемости коллектора [Кочарян и др., 2011]. Напротив, импульсное – ударное воздействие вызывает как увеличение, так и снижение проницаемости образца [Виноградов и др., 2015]. Вариации порового давления также влияют на изменение проницаемости образцов трещиноватых пород [Гасеми, Баюк, 2020; Барышников и др., 2021]. Экспериментально установлено максимальное значение увеличения проницаемости на  $5 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$  при фоновой проницаемости  $10^{-15} \text{ м}^2$  [Elkhoury et al., 2011]. Высказано предположение, что увеличение проницаемости масштабируется с амплитудой колебаний порового давления.

По данным обработки полевых измерений, проводимых в скважине, вскрывающей напорный водоносный горизонт и расположенной на территории геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево», прослежено увеличение проницаемости карбонатного коллектора при увеличении гидростатического напора [Петухова, 2023]. Отмеченную взаимосвязь между сезонными вариациями параметров и значениями напора необходимо учитывать при исследовании возможных изменений фильтрационных параметров при сейсмическом воздействии.

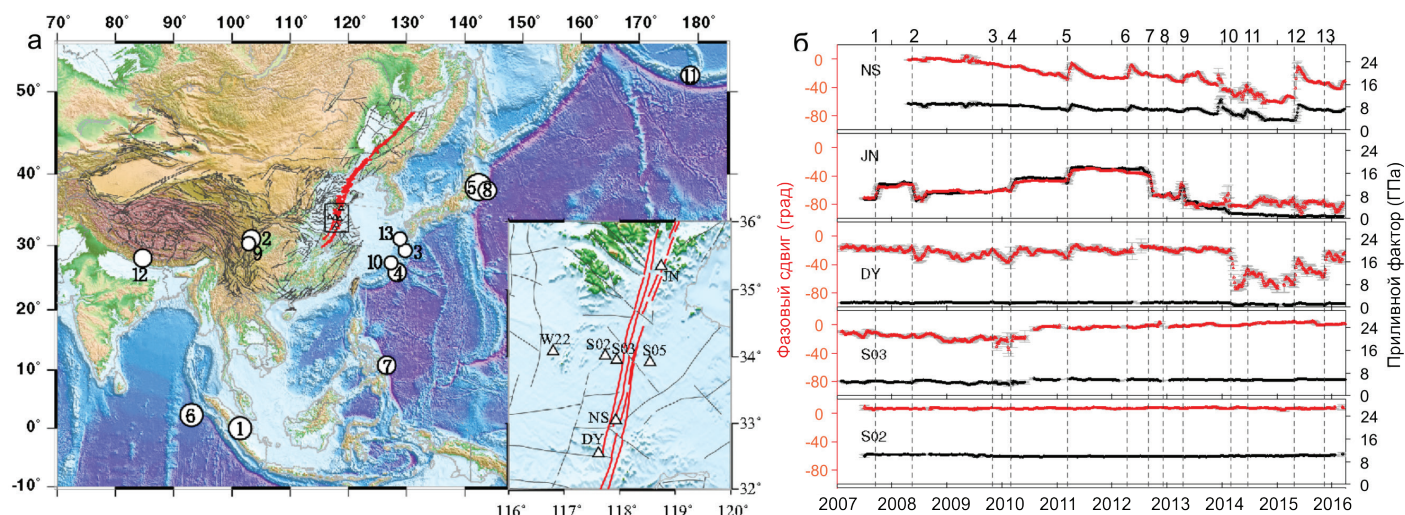
В работах [Rojstaczer, Wolf, 1992] отмечено изменение проницаемости при сейсмическом воздействии. На основе обработки данных многолетних гидрогеологических наблюдений с учетом произошедших землетрясений установлено как увеличение проницаемости флюидонасыщенного коллектора [Elkhoury et al., 2006], так и уменьшение [Rutter et al., 2016]. В частности, при регистрации уровня подземных вод в сети наблюдательных скважин, расположенных в ближней зоне эпицентра землетрясения в Новой Зеландии 2010 г.,  $M7.1$ , в большинстве скважин наблюдалось постсейсмическое повышение уровня воды, вероятно, обусловленное снижением проницаемости пласта. Авторы статьи предполагают, что уменьшение проницаемости может быть связано с кольматацией – насыщением прослоев гравия мелкодисперсными частицами.

Комплексное исследование косейсмических откликов в ответ на разрушительное землетрясение Тохоку приведено в работе [Sun et al., 2015]. Выявлена устойчивая корреляция между амплитудой и частотой колебаний уровня воды со скоростью смещения грунта по вертикальной компоненте. Наряду со ступенчатым повышением уровня прослежено изменение приливной амплитуды и фазового сдвига для волн  $M_2$  в скважине после землетрясения Тохоку. Это указывает на то, что проницаемость системы «скважина – водоносный горизонт» увеличилась после прохождения сейсмических волн от этого землетрясения.

Изменения фильтрационных свойств водонасыщенного коллектора – проницаемости и водопроводимости – отмечены в трех скважинах глубиной 205–683 м, пройденных вдоль зоны влияния субмеридионального разлома *Tanlu* за 10-летний период мониторинга (рис. 6) [Yan et al., 2016]. В качестве индикатора изменений гидравлических свойств рассматривался приливной фактор и фазовый сдвиг приливной волны  $M_2$ , выделенной в вариациях уровня подземных вод.

С 2007 по 2016 гг. на эпицентральных расстояниях 1056–5292 км произошло 13 землетрясений с  $M6.5$ – $9.0$ . В 4 скважинах глубиной 211–976 м, пройденных вкрест простирания разлома на расстоянии ~ 20–140 км, прослежены только косейсмические вариации уровня. Различие гидрогеологических откликов на землетрясения в зоне локальных разломов и в массиве отмечены в скважинах в окрестностях разломов *Longmenshan* и *Huayingshan* [Shi et al., 2014; Sun, Xiang, 2019] и в «Трех ущельях» [Shi et al., 2013].

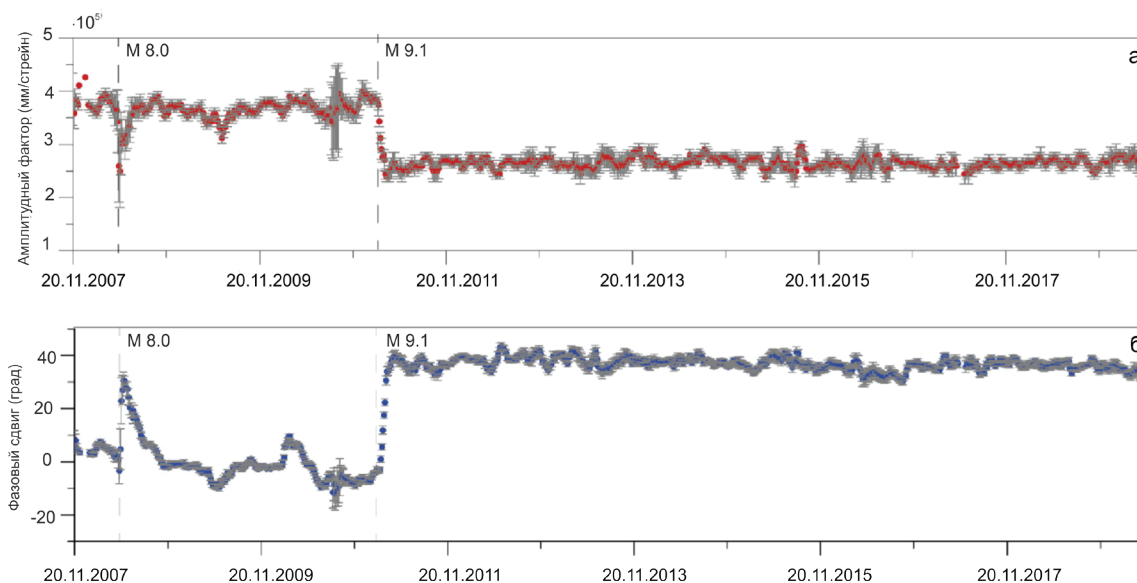
За 12-летний период наблюдений 2007–2019 гг. по скважине *Taiyan*, расположенной в зоне пересечения двух разломов на северо-западе Китая и вскрывающей в интервале 480–755 м доломиты и известняки кембрия, зарегистрированы гидрогеологические отклики на 4 землетрясения (рис. 7) [Shi



**Рис. 6.** а – схема расположения наблюдательных скважин (треугольники), эпицентров 13 землетрясений (кружки); б – фазовые сдвиги, приливные факторы земного прилива  $M_2$ . Штриховые вертикальные линии соответствуют 13 землетрясениям. Красной линией выделены значения фазового сдвига, черной – приливного фактора, серым цветом обозначена среднеквадратичная ошибка [Yan et al., 2016])

et al., 2021]. Но неоднозначные вариации проницаемости установлены только при землетрясениях Венчуань и Тохоку (рис. 7). При первом землетрясении прослежено квазиобратимое изменение фазового сдвига и проницаемости, при втором – необратимое.

Анализ сейсмограмм показал, что преобладающая частота поверхностных волн от землетрясения Тохоку в окрестностях скважины *Taiyan* значительно ниже по сравнению с данными регистрации, полученными вблизи скважины при прохождении поверхностных волн от землетрясения Венчуань. Авторами высказано предположение, что низкие частоты колебаний, вероятно, оказывают более эффективное воздействие на декольматацию трещин. Со временем проницаемость может восстанавливаться до первоначальных значений в связи с механическими и геохимическими процессами, происходящими как в зонах влияния разломов, так и в массиве [Xue et al., 2013].



**Рис. 7.** Диаграммы изменения приливной реакции уровня воды в скважине *Taiyan* за период 2007–2019 гг. [Shi et al., 2021]: а – отношение амплитуд, б – фазовый сдвиг

## Основные механизмы изменений фильтрационных свойств флюидонасыщенного коллектора

Разнообразие гидрогеологических эффектов, зарегистрированных при прохождении сейсмических волн от землетрясений, свидетельствует о разных режимах деформирования флюидонасыщенных коллекторов.

В **ближней зоне** землетрясений проявляются преимущественно два механизма, которые приводят к изменению проницаемости флюидонасыщенного коллектора. В *первом* случае – это механизм разжижения [Liu et al. 1982; Wang, 2007]. Флюидонасыщенный коллектор, представленный дисперсными несвязными грунтами, может переходить в состояние разжижения (текучее, плавунное) при интенсивном сейсмическом воздействии, включающем стадии разрушения структурных связей, течения и последующего уплотнения грунта.

В работе [Roeloffs, 1998] предложена гипотеза уплотнения/разжижения рыхлых пород, которая могла бы объяснить косейсмические изменения уровня и скорости потока жидкости. В статье описывается вызванный землетрясением подъем уровня воды в скважине в долине Бурдье, недалеко от Паркфилда (Калифорния) и рассматриваются возможные объяснения этого явления. Автором получено уравнение, описывающее амплитуду отклика как функцию магнитуды землетрясения и расстояния. Идея уплотнения/разжижения пород представлена также в работах [Manga, 2001; Manga et al., 2003].

Во-*втором* случае изменение проницаемости в ближней зоне может быть связано с дилатансией (трещинообразованием). Статические напряжения приводят к необратимому режиму деформирования и нарушению гидравлической взаимосвязи между разными типами флюидонасыщенных коллекторов, представленными разновозрастными водоносными горизонтами. Дислокационная модель объясняет согласованность между изменениями уровня подземных вод и прогнозной оценкой деформации пород [Lee et al., 2002], но в отдельных случаях эта зависимость не выдерживается [Wang et al., 2001].

По данным режимных наблюдений в скважинах глубиной от 200 до 1300 м, пробуренных вокруг подземной лаборатории *Mizunami* в Японии, после землетрясения Тохоку 11.03.2011 г., M9.1 [Niwa et al., 2012] зарегистрированы косейсмические вариации давления, обусловленные несколькими факторами. К основным факторам отнесены дилатансия, увеличение проницаемости вдоль локальных геологических структур – непроницаемых разломов и активизация гидравлических перетоков в окрестностях шахт.

В свою очередь, на основе последующего анализа состояния локальных разломов и численного моделирования различий в гидравлических свойствах между геологическими слоями с использованием программы TOUGH2 [Pruess et al., 2005] предложено рассматривать проявление дилатансионных эффектов раздельно – в массиве и в зонах влияния разломов [Jeanne et al., 2021].

Дилатансия массива проявляется в разнонаправленных откликах водоносных горизонтов [Chia et al., 2008]. Подъем уровня нижнего горизонта, приуроченного к фундаменту, может быть связан с перетоком из вышележающих водоносных горизонтов, получающих развитие в осадочном чехле. Напротив, снижение уровня верхнего горизонта, вероятно, обусловлено дренированием обводненной толщи за счет активизации – подновления существующей петрогенетической трещиноватости. Подобные гидрогеологические эффекты были отмечены при крупномасштабных взрывах [Горбунова и др., 2017].

Повышение проницаемости по разломам прослежено в зонах, ориентированных по направлению сейсмических волн, которое обусловлено увеличением касательного напряжения, приводящего к сдвигу – проскальзыванию. При залечивании разломов глинистым материалом возможно снижение проницаемости, которое выражается в увеличении порового давления и подъеме уровня. При песчаном заполнителе с разными прочностными характеристиками изменение проницаемости может быть обусловлено вибрацией, приводящей к изменению структуры разлома.

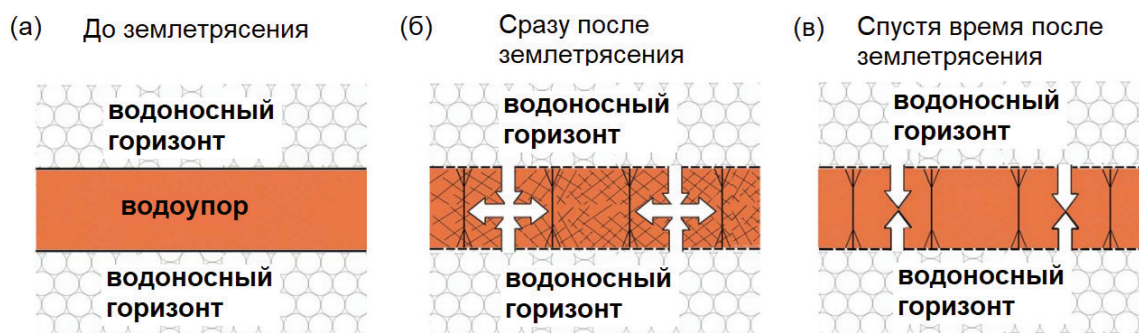
В разломах, сопряженных с очагом землетрясений, и в оперяющих структурах наряду с косейсмическими откликами прослежены постсейсмические гидрогеологические эффекты. В



разломах, не связанных с сейсмогенным разрывом, проявляются преимущественно косейсмические вариации порового давления при прохождении сейсмических волн.

Ряд скважин, пройденных в массиве и в зоне влияния разломов, был оборудован пакерами для разделения водоносных горизонтов. Подобный подход позволил установить однотипную реакцию обводненного массива при прохождении сейсмических волн от катастрофического землетрясения. В скважинах, пройденных в зонах разломов, в выделенных интервалах, приуроченных к различным водоносным горизонтам, наряду с подъемом уровня прослежено снижение.

По результатам гидрогеологического мониторинга, проводимого за год до землетрясения Чи-Чи 1999 г., M7.6 и на протяжении года после, предложена модель для объяснения постсейсмических эффектов, которые могут быть обусловлены увеличением вертикальной проницаемости относительных водоупоров (рис. 8) [Wang et al., 2016].



**Рис. 8.** Концептуальная модель нарушения системы подземных вод землетрясениями [Wang et al., 2016]: а – перед землетрясением водоносные горизонты гидравлически изолированы друг от друга непроницаемым водоупором; б – землетрясение создает новые трещины (показаны темными линиями с ответвлениями) и подновляет ранее существовавшие (показаны сетью тонких линий), увеличивая проницаемость как вдоль, так и поперек водоупора; в - спустя время после землетрясения ранее существовавшие трещины повторно кольтматируются, оставляя только вновь образовавшиеся трещины, которые продолжают обеспечивать гидравлическую связь между водоносными горизонтами

Результаты полевых исследований свидетельствуют, что подобные нарушения водоупоров между водоносными горизонтами и увеличение вертикальной проницаемости отмечаются и в промежуточной зоне при прохождении сейсмических волн от удаленных землетрясений [Huang, Zhang, 2021]. Положительный фазовый сдвиг может быть связан с эффектом вертикального перетока [Roeloffs, 1996; Xue et al., 2016; Zhang et al., 2019]. Полученные значения также используются для оценки гидрогеологических параметров. Изменение значений фазового сдвига с отрицательного на положительное при сейсмическом воздействии, вероятно, обусловлено движением подземных вод как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях [Yan et al., 2020].

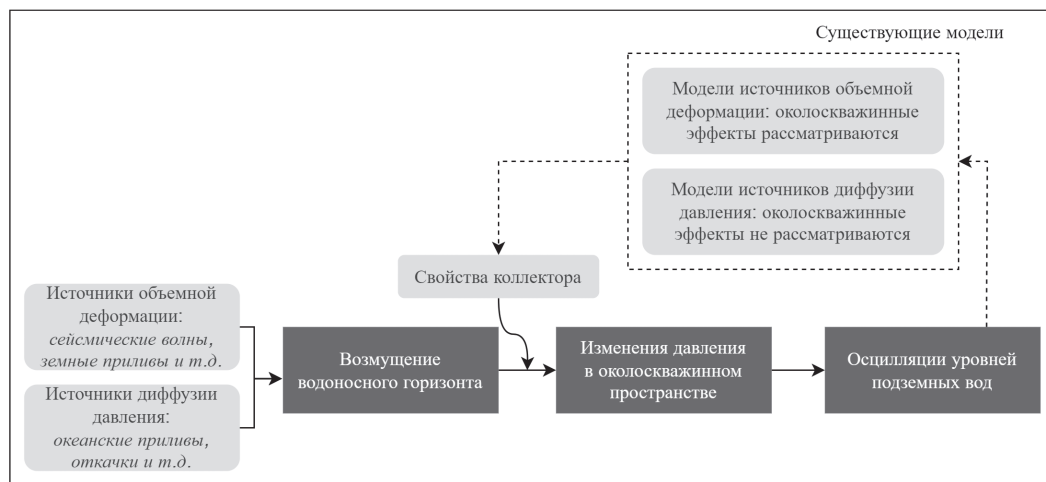
В **промежуточной** и **дальней** зонах землетрясений в качестве основных механизмов изменения проницаемости рассматривается:

- кольтматация/декольтматация трещин в пласте [Brodsky et al., 2003] и околоскважинном пространстве (скин-эффект) коллоидными частицами;
- динамические воздействия (вибрация) [Кочарян и др., 2011; Shalev et al., 2016];
- дегазация [Linde et al., 1994; Matsumoto et al., 2003];
- гидрогеохимические процессы, такие как осаждение минералов, растворение и другие.

Динамические напряжения и изменения порового давления, связанные с сейсмическими волнами от удаленных землетрясений, относительно невелики, но могут быть достаточно большими, чтобы активировать коллоидные частицы, которые будут поддерживать раскрытие ранее существовавшей трещины или ее закупорку [Brodsky et al., 2003; Elkhoury et al., 2011]. Механика данного процесса

продемонстрирована в лабораторных экспериментах [Кочарян и др., 2011]. При воздействии импульса давления на образец были разрушены «барьеры» из мелких частиц в трещинах материала. Показано, что даже слабые динамические воздействия при длительном воздействии вибрации способны вызвать повышение эффективной проницаемости вследствие декольматации трещин. Отмеченные процессы являются обратимыми, так как прослежено восстановление значений проницаемости до прежних значений. Необратимое деформирование флюидонасыщенного коллектора может быть связано с развитием микротрещин.

В работе [Xing et al., 2022] рассматриваются сложные условия формирования гидрогеологических откликов при воздействии двух источников – объемного напряжения и диффузии давления, которые могут приводить к изменению фильтрационных свойств водоносного горизонта и давления в околоскважинном пространстве (рис. 9).

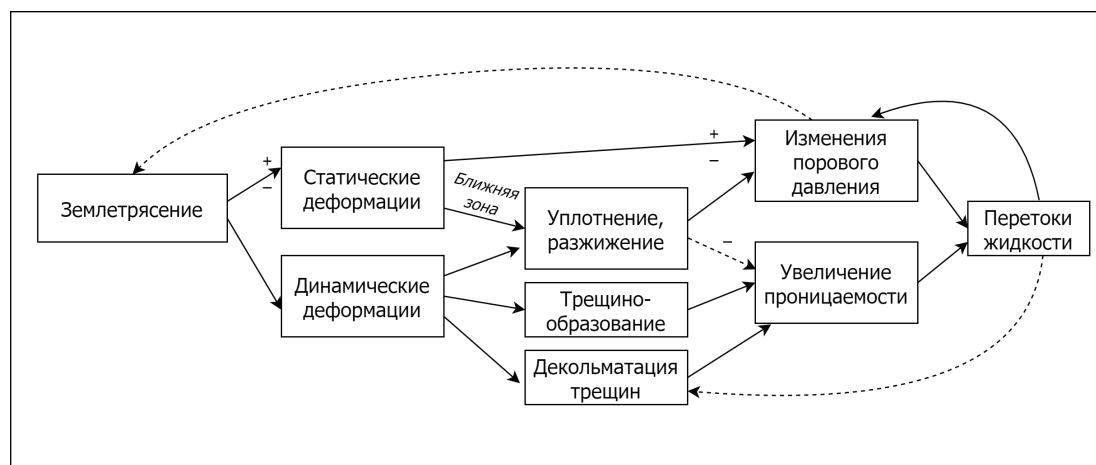


**Рис. 9.** Механизм колебаний уровня воды и методика характеристики свойств водоносного горизонта для источника объемных напряжений и источника диффузии давления [Xing et al., 2022]

Количественная оценка различных механизмов, объясняющих изменения уровня подземных вод в зоне разлома, приведена в исследовании [Shi et al., 2017]. Смоделированы теоретические косейсмические ряды изменения уровня воды вследствие землетрясения Веньчуань на основе применения нескольких моделей расчета проницаемости, напора воды и водопритока. Сделан вывод о том, что землетрясению Веньчуань лучше всего соответствует модель переходной проницаемости, использующая ряд параметров, в т. ч. гидравлическую проводимость разлома до и после землетрясения, коэффициент масштабирования и другие.

Схема связи между землетрясением, сопровождающими гидрогеологическими эффектами и механизмами, определяющими их проявление, предложена в работе [Manga, Wang, 2015] (рис. 10). В ближней зоне, сопоставимой с длиной сейсмогенерирующего разлома, проявляются статические напряжения, которые приводят к уплотнению и разжижению дисперсного грунта и дилатансии скальных пород. Необратимое деформирование флюидонасыщенного коллектора выражается в изменении проницаемости.

На схеме (рис. 10) отмечено только увеличение проницаемости. В действительности возможно и уменьшение проницаемости. Разнообразные гидрогеологические эффекты соответствуют вариациям порового давления и проницаемости и возможным перетокам жидкости. В свою очередь движение подземных вод приводит к вторичным изменениям порового давления и декольматации, а также и кольматации микротрещин. Эти процессы подтверждены экспериментальными результатами лабораторных испытаний. В свою очередь вариации порового давления могут спровоцировать афтершоковую активность.



**Рис. 10.** Схема, объясняющая связь между землетрясением, его эффектами и механизмами, вызывающими эти эффекты [Manga, Wang, 2015]

В промежуточной и дальней зонах землетрясений в зависимости от локальных геолого-структурных и гидрогеологических условий возможно сочетание вышеописанных механизмов. Вероятно, именно этим обусловлено разнообразие гидрогеологических эффектов, свидетельствующее о разных режимах деформирования флюидонасыщенных коллекторов.

В статье [Sun, Xiang, 2021] высказано предположение, что уменьшение проницаемости коллектора перед землетрясением может быть связано с усилением («накоплением») тектонических напряжений, которые приводят к изменению апертуры трещин. Раскрытие трещин способствует движению (мобилизации) коллоидных частиц. Накопление частиц в сужениях трещин предопределяет кольматацию трещин и снижение проницаемости.

В одной из последних работ [Barbour, Beeler, 2021] представлен новый механизм, объясняющий динамические изменения проницаемости. Для исследования пороупругой реакции коллектора (резервуара сброса сточных вод *Arbuckle* в Оклахоме, США) используются прямые измерения давления резервуара. Отклик на телесеismicические волны включает динамический отклик на деформации сдвига. Систематическая азимутальная изменчивость этого отклика указывает на то, что сеть гидравлически проводящих трещин является основным фактором контроля пороупругого отклика коллектора. Вероятно, сейсмическое воздействие может быть более эффективным при совпадении ориентаций систем трещин с направлением сейсмических волн от источника, причем этот диапазон зависит от напряженного состояния и преобладающей структуры трещин.

Вышеописанная взаимосвязь между рассмотренными механизмами изменения проницаемости и зарегистрированными гидрогеологическими эффектами соответствует различным режимам деформирования флюидонасыщенных коллекторов.

## Заключение

В основе пороупругой модели [Cooper et al., 1965; Wakita, 1975; Hsieh et al., 1987; Roeloffs, 1996; Ge, Stover, 2000; Wang, Manga, 2010] лежит зависимость между режимом деформирования флюидонасыщенного коллектора и вариациями порового давления (уровня подземных вод). Этот механизм устойчиво проявляется под влиянием квазистационарных факторов (атмосферное давление, земные приливы). Определение сезонных вариаций значений проницаемости свидетельствует о том, что это динамически контролируемые параметры [Liao et al., 2022], которые следует учитывать при анализе влияния сейсмических волн на фильтрационные свойства коллектора.

При эпизодическом сейсмическом воздействии может проявиться как пороупругое, так и неупругое деформирование флюидонасыщенного коллектора. Осцилляции уровня подземных вод и порового давления при прохождении сейсмических волн от землетрясений подтверждают пороупругую реакцию.

Постсейсмические гидрогеологические эффекты прослеживаются при неупругом деформировании флюидонасыщенного коллектора и могут быть связаны с различными механизмами, в **ближней** зоне – с разжижением, дилатансией, в **промежуточной** и **дальней** – с кольтматацией/декольтматацией микротрещин, вибрационным воздействием, геохимическими процессами и другими.

Подобные изменения проницаемости при сейсмическом воздействии, установленные на разных эпицентральных расстояниях от очага землетрясения, включая и дальнюю зону, могут быть потенциально опасными, приводить к миграции сейсмичности и к инициированию землетрясений. Это определяет актуальность исследования режимов деформирования флюидонасыщенных коллекторов при прохождении сейсмических волн от землетрясений.

### Финансирование

*Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 122032900172-5).*

### Благодарности

Авторы благодарны к.ф.-м.н. А. Н. Бесединой за внимательное прочтение статьи и сделанные замечания.

### Список литературы

- Барabanов В.Л., Гриневский А.О., Калачев А.А., Савин И.В. Частотная характеристика системы скважина – водоносный горизонт по данным наблюдений за уровнем подземных вод // Физика Земли. 1988. № 3. С. 41–50.
- Барышников Н.А., Зенченко Е.В., Турунтаев С.Б. Лабораторное исследование нелинейности закона фильтрации в области низких скоростей в плотных породах // Динамические процессы в геосферах. 2021. № 13. С. 50–59. [http://doi.org/10.26006/22228535\\_2021\\_1\\_50](http://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_50)
- Болдина С.В., Копылова Г.Н. Развитие метода наблюдений в скважинах сейсмоактивных регионов (на примере полуострова Камчатка, Дальний Восток России): Труды Всероссийской научной конференции с международным участием «Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования». 2023. М. : МГУ. С. 145–150.
- Вартанян Г.С. Геодинамический мониторинг и прогноз сильных землетрясений // Отечественная геология. 2002. № 2. С. 62–65.
- Виноградов Е.А., Марков В.К., Марков Д.В. К вопросу о вариациях проницаемости трещинно-пористого коллектора в результате динамического воздействия // Динамические процессы в геосферах: сб. научн. тр. ИДГ РАН, вып. 7. М. : ГЕОС. 2015. С. 52–60.
- Гасеми М.Ф., Баяк И.О. Граничные значения параметров строения пустотного пространства петроупругих моделей карбонатных пород // Физика Земли. 2020. № 2. С. 69–88. <http://doi.org/10.31857/S0002333720020039>
- Горбунова Э.М., Виноградов Е.А., Беседина А.Н., Гашев Д.В. Реакция подземных вод на землетрясения и крупномасштабные взрывы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 1. С. 273–290.
- Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. 2015. М. : Наука. – 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., Марков В.К., Марков Д.В., Перник Л.М. Гидрогеологический отклик подземных коллекторов на сейсмические колебания // Физика Земли. 2011. № 12. С. 50–62.
- Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А., Казанцева О.С. Мониторинг приливных вариаций уровня подземных вод в группе водоносных горизонтов // Физика Земли. 1997. № 4. С. 52–64.
- Петухова С.М. Вариации фильтрационных свойств карбонатного коллектора при квазистационарном и сейсмическом воздействии (по данным ГФО «Михнево»). Автореф. дис. ...канд. физ.-мат. наук. Москва: ИДГ РАН. 2023. – 23 с.
- Barbour A.J., Beeler N.M. Teleseismic waves reveal anisotropic poroelastic response of wastewater disposal reservoir // Earth and Planetary Physics. 2021. Vol. 5 (6). P. 547–558. <http://doi.org/10.26464/epp2021034>



Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes // *Journal of Geophysical Research*. 2003. Vol. 108 P. 2390. <http://doi.org/10.1029/2002JB002321>

Chia Y., Chiu J.J., Chiang Y.H., Lee T.P., Wu Y.M., Horng M.J. Implications of coseismic groundwater level changes observed at multiple-well monitoring stations // *Geophysical Journal*. 2008. Vol. 172. P. 293–301. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03628.x>

Chia Y.-P., Wang Y.-S., Huang C.-C., Chen J.-S., Wu H.-P. Coseismic changes of groundwater level in response to the 1999 Chi-Chi earthquake // *Western Pacific Earth Sciences*. 2002. Vol. 2 (3). P. 261–272. <http://doi.org/10.1785/0120000726>

Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennett R.R. The response of well-aquifer systems to seismic waves // *Journal of Geophysical Research*. 1965. Vol. 70 (16). P. 3915–3926. <http://doi.org/10.1029/JZ070i016p03915>

Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C. Seismic Waves Increase Permeability // *Nature*. 2006. Vol. 441. P. 1135–1138. <http://doi.org/10.1038/nature04798>

Elkhoury J.E., Niemeijer A., Brodsky E.E., Marone C. Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in situ fractured rock // *Journal of Geophysical Research*. 2011. Vol. 116 (B02311). <http://doi.org/10.1029/2010JB007759>

Ge S., Stover S.C. Hydrodynamic response to strike- and dip-slip faulting in a half-space // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000. Vol. 105 (B11). P. 25513–25524. <http://doi.org/10.1029/2000JB900233>

Jeanne P., Guglielmi Y., Rutqvist J., Kunimaru T., Umeki H. Evaluation of faults stability due to passing seismic waves: Study case of groundwater level changes induced by the 2011 Tohoku earthquake in Central Japan // *Journal of Hydrology* X. 2021. Vol. 13 (100103). <http://doi.org/10.1016/j.hydroa.2021.100103>

He A., Singh R.P. Groundwater level response to the Wenchuan earthquake of May 2008 // *Geomatics, natural hazards and risk*. 2018. Vol. 10 (1). P. 336–352. <http://doi.org/10.1080/19475705.2018.1523236>

Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // *Water Resources Research*. 1987. Vol. 10 (23). P. 1824–1832. <http://doi.org/10.1029/WR023i010p01824>

Huang X., Zhang Y. Mechanism of co-seismic water-level response to 2015 Nepal earthquake // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 660 (1). <http://doi.org/10.1088/1755-1315/660/1/012064>

Ingebritsen S.E., Manga M. Earthquake Hydrogeology // *Water Resources Research*. 2019. Vol. 55 (7). P. 5212–5216. <http://doi.org/10.1029/2019WR025341>

King C.-Y., Chia Y. Anomalous streamflow and groundwater-level changes before the 1999 M7.6 Chi-Chi earthquake in Taiwan: Possible mechanisms // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. Vol. 175. P. 2435–2444. <http://doi.org/10.1007/s00024-017-1737-1>

Lai G., Ge H., Wang W. Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band // *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. 2013. Vol. 118 (5). P. 1904–1924. <http://doi.org/10.1002/jgrb.50165>

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 nearfield // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 619. P. 115–122. <http://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.039>

Lee T.-P., Chia Y., Yang H.-Y., Liu C.-Y., Chiu Y.-C. Groundwater Level Changes in Taiwan Caused by The Wenchuan Earthquake // *Pure and applied geophysics*. 2012. Vol. 169. P. 1947–1962. <http://doi.org/10.1007/s00024-012-0464-x>

Lee M., Liu T.-K., Ma K.-F., Chang Y.-M. Coseismic hydrological changes associated with dislocation of the September 21, 1999 Chichi earthquake, Taiwan // *Geophysical Research Letters*. 2002. Vol. 29 (17). P. 5–1–5–4. <http://doi.org/10.1029/2002GL015116>

Liao X., Shi Y., Liu C.-P., Wang G. Sensitivity of permeability changes to different earthquakes in a fault zone: possible evidence of dependence on the frequency of seismic waves // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48 (9). <http://doi.org/10.1029/2021GL092553>

Liao X., Wang C.-Y., Liu C.-P. Disruption of groundwater systems by earthquakes // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42 (22). P. 9758–9763. <http://doi.org/10.1002/2015GL066394>

Liao X., Wang C.-Y., Wang Z.-Y. Seasonal change of groundwater response to Earth tides // *Journal of Hydrology*. 2022. Vol. 612 (Art. 128118). <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128118>

Linde A.T., Sacks I.S., Johnston M.J., Hillt D.P., Bilham R. Increased pressure from rising bubbles as a mechanism for remotely triggered seismicity // *Nature*. 1994. Vol. 371 (6496). P. 408–410. <https://doi.org/10.1038/371408a0>

Liu C.-Y., Chia Y., Chung P.-Y., Lee T.-P., Chiu Y.-C. Temporal Variation and Spatial Distribution of Groundwater Level Changes Induced by Large Earthquakes // *Water*. 2023. Vol. 15 (2. Art. 357). <http://doi.org/10.3390/w15020357>

- Liu L., Li G., Bing D. Earthquake damage of Baihe dam and liquefaction characteristics of sand and gravel materials: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Research Report. China Water Power Press. 1982. Vol. 8. P. 171–178.
- Manga M. Origin of postseismic streamflow changes inferred from baseflow recession and magnitude-distance relations // *Geophysical Research Letters*. 2001. Vol. 28 (10). P. 2133–2136. <http://doi.org/10.1029/2000GL012481>
- Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E., Elkhoury J.E., Elsworth D., Ingebritsen S., May D.C., Wang C.-Y. Changes in permeability caused by transient stresses: field observations, experiments and mechanisms // *Review of Geophysics*. 2012. Vol. 50 (2). P. 1–24. <http://doi.org/10.1029/2011RG000382>
- Manga M., Brodsky E. E., Boone M. Response of streamflow to multiple earthquakes // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30 (5. Art. 1214). <http://doi.org/10.1029/2002GL016618>
- Manga M., Wang C.-Y. Earthquake Hydrology // *Treatise on Geophysics*. 2015. Vol. 4. P. 305–328. <http://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00082-8>
- Matsumoto N., Kitagawa G., Roeloffs E.A. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, Central Japan – I. Groundwater level changes revealed using state space decomposition of atmospheric pressure, rainfall and tidal responses // *Geophysical Journal International*. 2003. Vol. 155 (3). P. 885–898. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2003.02103.x>
- Niwa M., Takeuchi R., Onoe H., Tsuyuguchi K., Asamori K., Umeda K., Sugihara K. Groundwater pressure changes in Central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2012. Vol. 13 (5). P. 1–15. <http://doi.org/10.1029/2012GC004052>
- Pruess K. ECO2N: A TOUGH2 fluid property module for mixtures of water, NaCl, and CO<sub>2</sub>. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory. 2005. – 66 p. <http://doi.org/10.2172/877331>
- Rahi K.A., Halihan T. Identifying aquifer type in fractured rock aquifers using harmonic analysis // *Groundwater*. 2013. Vol. 51 (1). P. 76–82. <http://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00925.x>
- Roeloffs E.A. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1998. Vol. 103 (B1). P. 869–889. <http://doi.org/10.1029/97JB02335>
- Roeloffs E. Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena // *Advances in Geophysics*. 1996. Vol. 37. P. 135–195. [http://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60270-8](http://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60270-8)
- Rojstaczer S., Wolf S. Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California // *Geology*. 1992. Vol. 20 (3). P. 211–214. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020%3C0211:PCAWLE%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020%3C0211:PCAWLE%3E2.3.CO;2)
- Rutter H.K., Cox S.C., Dudley Ward N.F., Weir J.J. Aquifer permeability change caused by a near-field earthquake, Canterbury, New Zealand // *Water Resources Research*. 2016. Vol. 52 (11). P. 8861–8878. <http://doi.org/10.1002/2015WR018524>
- Shalev E., Kurzon I., Doan M.-L., Lyakhovsky V. Sustained water-level changes caused by damage and compaction induced by teleseismic earthquakes // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016. Vol. 121 (7). P. 4943–4954. <http://doi.org/10.1002/2016JB013068>
- Shalev E., Lutzky H., Lyakhovsky V. Groundwater level changes induced by earthquakes // *Springer Hydrogeology*. 2021. P. 459–462. [http://doi.org/10.1007/978-3-030-51148-7\\_20](http://doi.org/10.1007/978-3-030-51148-7_20)
- Shi Z., Wang G. Evaluation of the permeability properties of the Xiaojiang Fault Zone using hot springs and water wells // *Geophysical Journal International*. 2017. Vol. 209 (3). P. 1526–1533. <http://doi.org/10.1093/gji/ggx113>
- Shi Z., Wang G., Liu C., Mei J., Wang J., Fang H. Coseismic response of groundwater level in the Three Gorges well network and its relationship to aquifer parameters // *Chinese Science Bulletin*. 2013. Vol. 58. P. 3080–3087. <http://doi.org/10.1007/s11434-013-5910-3>
- Shi Z., Wang C.-Y., Yan R. Frequency-dependent groundwater response to earthquakes in carbonate aquifer // *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 603 (Art. 127153). <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127153>
- Shi Z., Wang G., Wang C.-Y., Manga M., Liu C. Comparison of hydrological responses to the Wenchuan and Lushan earthquakes // *Earth and Planetary Science Letters*. 2014. Vol. 391. P. 193–200. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.01.048>
- Shibata T., Takahashi R., Takahashi H., Kagoshima T., Takahata N., Sano Y., Pinti D. Coseismic changes in groundwater level during the 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquake // *Earth, Planets and Space*. 2020. Vol. 72. P. 1–8. <http://doi.org/10.1186/s40623-020-01152-y>
- Simon J.B., Fulton P.M., Xue L. Hydrogeologic property estimation in Plate Boundary Observatory Boreholes using tidal response analysis // *Geofluids*. 2021. P. 1–19. <http://doi.org/10.1155/2021/6697021>
- 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. Vol. 531. P. 1028–1039. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.005>

- Sun X., Xiang Y. Aquifer permeability decreases before local earthquakes inferred from water level response to period loading // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48 (15). <http://doi.org/10.1029/2021GL093856>
- Sun X., Xiang Y. Heterogeneous permeability changes along a fault zone caused by the Xingwen M5.7 earthquake in SW China // *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46 (24). P. 14404–14411. <http://doi.org/10.1029/2019GL085673>
- Sun X., Xiang Y., Shi Z. Estimating the hydraulic parameters of a confined aquifer based on the response of groundwater levels to seismic Rayleigh waves // *Geophysical Journal International*. 2018. Vol. 213 (2). P. 919–930. <http://doi.org/10.1093/gji/ggy036>
- Sun X., Xiang Y., Shi Z., Wang B. Preseismic changes of water temperature in the Yushu well, Western China // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. Vol. 175. P. 2445–2458. <http://doi.org/10.1007/s00024-017-1579-x>
- Tamura Y, Sato T, Ooe M., Ishiguro M. A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion // *Geophysical Research Letters*. 1991. Vol. 104 (3). P. 507–516. <http://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb05697.x>
- Vinogradov E., Gorbunova E., Besedina A., Kabychenko N. Earth Tide Analysis Specifics in Case of Unstable Aquifer Regime // *Pure and Applied Geophysics*. 2017. Vol. 174 (6). P. 1783–1792. <http://doi.org/10.1007/s00024-017-1585-z>
- Wakita H. Water level as possible indicators of tectonic strain // *Science*. 1975. Vol. 189 (4202). P. 553–555. <http://doi.org/10.1126/science.189.4202.553>
- Wang C.Y. Liquefaction beyond the Near Field // *Seismological Research Letters*. 2007. Vol. 78 (5). P. 512–517. <http://doi.org/10.1785/gssrl.78.5.512>
- Wang C.Y., Cheng L.H., Chin C.V., Yu S.B. Coseismic hydrologic response of an alluvial fan to the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan // *Geology*. 2001. Vol. 29 (9). P. 831–834. [http://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0831:CHROAA>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0831:CHROAA>2.0.CO;2)
- Wang C.Y., Doan M.-L., Xue L., Barbour A.J. Tidal response of groundwater in a leaky aquifer – application to Oklahoma // *Water Resources Research*. 2018. Vol. 54 (10). P. 8019–8033. <http://doi.org/10.1029/2018WR022793>
- Wang C.Y., Liao X., Wang L.P., Wang C.H., Manga M. Large earthquakes create vertical permeability by breaching aquitards // *Water Resources Research*. 2016. Vol. 52 (8). P. 5923–5937. <http://doi.org/10.1002/2016WR018893>
- Wang C.Y., Manga M. *Earthquakes and Water*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2010. – 228 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-00810-8>.
- Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // *BIM*. 1994. Vol. 118. P. 8719–8721.
- Xing Y., Liu Q., Hu R., Gu H., Taherdangkoo R., Yang H., Ptak T. A general numerical model for water level response to harmonic disturbances in aquifers considering wellbore effects // *Journal of Hydrology*. 2022. Vol. 609 (Art. 127678). <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127678>
- Xue L., Brodsky E.E., Erskine J., Fulton P.M., Carter R. A permeability and compliance contrast measured hydrogeologically on the San Andreas Fault // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2016. Vol. 17 (3). P. 858–871. <http://doi.org/10.1002/2015GC006167>
- 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 (6140). P. 1555–1559. <http://doi.org/10.1126/science.1237237>
- Yan R., Wang G., Shi Z. Sensitivity of hydraulic properties to dynamic strain within a fault damage zone // *Journal of Hydrology*. 2016. Vol. 543. P. 721–728. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.043>
- Yan R., Wang G., Ma Y., Shi Z., Song J. Local groundwater and tidal changes induced by large earthquakes in the Taiyuan Basin, North China from well monitoring // *Journal of Hydrology*. 2020. Vol. 582 (Art. 124479). <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124479>
- Zhang H., Shi Z., Wang G., Sun R., Yan R., Liu C. Large earthquake reshapes the groundwater flow system: Insight from the water-level response to earth tides and atmospheric pressure in a deep well // *Water Resources Research*. 2019. Vol. 55 (5). P. 4207–4219. <http://doi.org/10.1029/2018WR024608>

## **DEFORMATION REGIMES OF FLUID-SATURATED RESERVOIRS UNDER SEISMIC IMPACT ACCORDING TO PRECISION HYDROGEOLOGICAL MONITORING DATA (A REVIEW)**

**© 2023 S. M. Petukhova\*, E. M. Gorbunova**

*Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*E-mail: sofya.petukhova@gmail.com*

A large volume of scientific papers is devoted to the study of the deformation mechanisms of fluid-saturated reservoirs. Precision hydrogeological monitoring data allows to objectively assess filtration properties of fluid-saturated reservoirs. The reaction of the «reservoir-well» system to atmospheric pressure, Earth tides and the propagation of earthquakes seismic waves can occur in the form of the groundwater level oscillations, coseismic and postseismic effects. Hydrogeological responses to quasi-stationary factors are determined by poroelastic deformation of the rock mass. Episodic seismic impact can lead to both poroelastic and inelastic reaction of a fluid-saturated reservoir. In the near-field zone of earthquakes, in the area of static stresses, an abrupt (step-like) change of permeability has been established, which may be associated with various mechanisms. These include liquefaction of dispersed soil, dilatancy – crack formation at the contact zone of rocks with different strength characteristics, and others. In the intermediate and distant zones, areas of dynamic stresses, long-period oscillations caused by the passage of shear and surface waves can lead to microcracks clogging/unclogging and variations of permeability. The formation of a holistic view of the deformation regime of a rock mass under seismic impact is aimed to predict possible changes of the fluid-saturated reservoirs filtration properties.

**Keywords:** fluid-saturated reservoir, permeability, seismic impact, poroelastic reaction, irreversible deformation, mechanisms, precision hydrogeological monitoring.