

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

¹Павлова В.Ю., ^{1,2}Гурьевна Н.О.

¹ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга»,
683032, Петропавловск-Камчатский, Россия

²Камчатский филиал ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая
геофизическая служба РАН», 683023, Петропавловск-Камчатский, Россия
e-mail: verpavlova88@gmail.com

В статье проанализировано развитие методов гидрогеосейсмологического мониторинга в России и за рубежом. Описана региональная специфика исследований на Камчатке, характеризующаяся пространственно-временной мозаичностью гидрогеологических откликов и высоким уровнем природных шумов. Описаны механизмы формирования флюидных аномалий на различных стадиях сейсмического цикла (подготовки, косейсмической и постсейсмической релаксации). Обосновано, что повышение достоверности краткосрочных предвестников достигается за счет комплексирования гидрогеодинамических параметров с газогидрохимическими индикаторами.

Ключевые слова: Камчатка, город Петропавловск-Камчатский, мониторинг, предвестники землетрясений, подземные воды.

DEVELOPMENT OF HYDROGEOSEISMOLOGICAL MONITORING METHODS IN RUSSIA AND ABROAD

¹Pavlova V.Yu., ^{1,2}Gurievna N.O.

¹Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

²Kamchatsky branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», 683023, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

The article analyzes the development of hydrogeoseismological monitoring methods in Russia and abroad. The regional specificity of research in Kamchatka is described, characterized by the spatio-temporal mosaic of hydrogeological responses and a high level of natural noise. The physical and mechanical mechanisms of fluid anomalies formation at various stages of the seismic cycle (preparation, coseismic and post-seismic relaxation) are described. It is substantiated that the increase in the reliability of short-term precursors is achieved by integrating hydrogeodynamic parameters with gas-hydrochemical indicators.

Keywords: Kamchatka, the city of Petropavlovsk-Kamchatsky, monitoring, precursors of earthquakes, groundwater.

Введение

Актуальность темы исследования обусловлена возрастающей необходимостью понимания взаимосвязи между сейсмической активностью и гидрогеологическими процессами, особенно в регионах с высокой сейсмичностью. Землетрясения могут оказывать значительное влияние на подземные воды, изменяя их уровень, химический состав, температуру и дебит. Эти изменения, в свою очередь, могут служить как предвестниками сейсмических событий, так и индикаторами постсейсмических процессов, влияя на водоснабжение, экологическую обстановку и инженерные сооружения.

Исследование в данной статье проводится в рамках обзора комплексного контроля геодинамических процессов на базе Петропавловск-Камчатского полигона для обеспечения сейсмической безопасности региона (рис. 1).

Результаты исследования вносят вклад в понимание механизмов взаимодействия сейсмической активности и гидрогеологических систем. Выявленные закономерности и корреляции между сейсмическими событиями и изменениями параметров

подземных вод служит основой для дальнейших теоретических исследований в области сейсмогидрогеологии. Важна разработка более эффективных систем мониторинга гидрогеологических параметров в сейсмоактивных районах, способных детектировать аномалии, связанные с сейсмической активностью. Изучение оценки потенциального влияния землетрясений на водоснабжение и другие гидрогеологические процессы важно для планирования и принятия мер по снижению рисков, принятие обоснованных решений по эксплуатации водозаборов в сейсмоактивных зонах с учетом возможных изменений качества и количества подземных вод.

Развитие методов гидрогеосейсмологического мониторинга в России и за рубежом

В данном разделе рассматривается история формирования научных представлений о флюидодинамических и геохимических откликах подземных вод на геодинамические процессы. Понимание механизмов взаимодействия в системе «горная порода-флюид» имеет ключевое значение для интерпретации аномалий подземных вод как индикаторов изменения напряженно-деформированного



Рис. 1. Расположение города Петропавловск-Камчатский (Камчатка)

состояния (НДС) земной коры.

Теоретический фундамент гидрогеосейсмологии базируется на фундаментальных законах порупругости и механики сплошных сред. Эволюция представлений о механизмах формирования гидрогеологических откликов на процессы подготовки и реализации землетрясений прошла путь от качественной фиксации явлений до построения строгих математических моделей.

Исторически первыми классическими концепциями, объясняющими предвестниковые изменения флюидных систем в ближней зоне очага, стали дилатансионно-диффузионные модели (модели DD), разработанные в 1970-х годах [4,13]. Согласно этим моделям, на стадии деструктивного микротрещинообразования (дилатансии) происходит увеличение порового пространства пород, что вызывает падение пластового давления. Последующая диффузия флюидов в декомпрессионную зону приводит к восстановлению давления, снижению эффективного напряжения и, как следствие, к сейсмическому сдвигу.

Существенный вклад в детализацию гидрогеосейсмических процессов внесли фундаментальные теории Ч. Вонга (C.-Y. Wang) и М. Манги (M. Manga) [12,15]. В своих классических трудах авторы разделили гидрогеологические эффекты на ближнюю (статическое поле деформаций) и дальнюю (динамическое воздействие) зоны. Они доказали, что ко-сейсмические изменения уровней подземных вод в удаленной зоне (far-field) не могут быть объяснены остаточными статическими деформациями. Вонг и Манги обосновали механизм динамически индуцированного изменения проницаемости. Прохождение сейсмических волн вызывает изменение порового давления, разрушение коагелационных пробок в трещинах и переупаковку слабосцементированных грунтов, что приводит к изменениям фильтрационных свойств пласта.

В отечественной геофизической школе разви-

тие теоретических представлений связано с трудами И.Л. Писаренко, Г.А. Гамбурцева, А.А. Линькова и др. [4,5] В рамках концепции блоково-иерархического строения геосреды И.Л. Писаренко рассматривал флюидную систему как высокочувствительный объемный тензодатчик. В его моделях вариации гидрогеологических параметров интерпретируются сквозь призму нелинейной механики деформирования трещиновато-пористых коллекторов при квазистатических тектонических нагрузках. Было показано, что флюидодинамические отклики зависят от пространственного положения наблюдательной скважины относительно крупных разломных зон и границ геодинамических блоков.

Экспериментальное подтверждение теоретических моделей потребовало развертывания национальных сетей гидрогеосейсмологического мониторинга в сейсмоактивных регионах мира.

Китай располагает одной из самых разветвленных и исторически непрерывных систем мониторинга, созданной после разрушительного Хайченгского землетрясения (1975 г.). Сеть включает сотни глубоких специализированных скважин. Основной акцент сделан на фиксацию предвестников в вариациях уровня воды, температуры и концентрации газов (радон, гелий, водород). Современные исследования в КНР сфокусированы на анализе частотно-зависимых гидродинамических характеристик водоносных горизонтов с использованием приливного метода (анализ отклика на земные твердые приливы) для оценки предсейсмического изменения модулей упругости коры [15].

Японская сеть мониторинга (координируемая AIST и JMA) характеризуется максимальной степенью автоматизации и метрологической точности. Особое внимание уделяется сопряженным наблюдениям за пьезометрическим давлением в глубоких скважинах и поровым давлением на морском дне (в зонах субдукции). Японские ученые (в частности, К. Kano, М. Takahashi) внесли огромный вклад в

выделение «чистого» сейсмогенного сигнала путем прецизионной фильтрации барометрических и приливных флуктуаций [10,14].

В США основные полигоны сосредоточены вдоль разлома Сан-Андреас (Калифорния). Американский подход традиционно опирается на строгую физико-математическую валидацию данных. Исследования Геологической службы США (USGS) направлены на оценку влияния сейсмических волн на гидрологический режим речных бассейнов и дебит родников, а также на изучение наведенной (индуцированной) сейсмичности, вызванной закачкой флюидов в глубокие горизонты [8,9].

В Тайване имеется уникальная плотность режимных гидрогеологических станций, развернутых преимущественно на аллювиальных равнинах и вблизи надвигов (после землетрясения Чи-Чи 1999 г.). Тайваньский опыт ценен фиксацией крупномасштабных косейсмических шагов уровня воды и последующей многолетней релаксацией гидравлической проводимости аквиферов в ближней зоне разломов [9,12].

Анализ накопленных данных позволил установить устойчивые закономерности между кинематическими/динамическими параметрами землетрясений и морфологией гидрогеологических откликов. Вариации уровня воды (пьезометрического давления) классифицируются на три типа: предвестниковые (пресейсмические), косейсмические (происходящие непосредственно в момент прохождения волн) и постсейсмические (длиннопериодные тренды восстановления).

1. Локальные и близкие землетрясения (Near-field): В этой зоне (на расстояниях, сопоставимых с линейными размерами очага) преобладают косейсмические знаковые скачки уровня. Знак скачка (подъем или падение) жестко контролируется квадратной схемой статического поля упругих деформаций (модель Окады): в зонах сжатия пласта уровень необратимо возрастает, в зонах растяжения – падает. Амплитуда скачков экспоненциально затухает с увеличением эпицентрального расстояния.

2. Удаленные землетрясения (Far-field): На расстояниях в тысячи километров от эпицентра статические деформации пренебрежимо малы. Здесь флюидные системы реагируют исключительно на динамические напряжения, переносимые длиннопериодными поверхностными волнами Рэлея и Лява. Отклики проявляются в виде высокочастотных косейсмических осцилляций «скважина-пласт» (резонансные явления) и последующих куполообразных или ступенчатых постсейсмических изменений уровня, обусловленных раскрытием микротрещин или разрушением гидрогеологических барьеров.

В Российской Федерации данные методы получили наиболее глубокое развитие на Камчатском (КФ ФИЦ ЕГС РАН, ИКИР ДВО РАН) и Байкаль-

ском (ИЗК СО РАН) прогностических полигонах. Отечественными исследователями (Г.Н. Копылова, А.А. Любушин, Р.М. Семенов) доказано, что многомерный статистический анализ временных рядов уровня воды в глубоких скважинах позволяет выявлять скрытые синхронизированные геодинамические сигналы на стадиях задолго до макросейсмического проявления катастрофических событий [3,6,7,11].

Специфика и опыт гидрогеологических исследований на Камчатке

Переход от глобальных теоретических моделей к решению прикладных задач прогноза землетрясений требует учета региональной специфики флюидодинамических систем. Камчатский край представляет собой уникальный полигон субдукционного типа. Экстремально высокая плотность сейсмических и вулканических событий предопределила развертывание здесь в 1977 году специализированной сети наблюдений, признанной в мировом сообществе одной из наиболее репрезентативных.

Научное осмысление собранного за десятилетия массива данных обеспечено кооперацией Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Ключевую роль в формировании методологии сыграли многолетние исследования Г. Н. Копыловой, С. В. Болдиной и Ю. М. Хаткевича [1-3,6].

Фундаментальный вклад Г. Н. Копыловой [3] заключается в разработке строгих критериев сепарации сейсмогенных сигналов в системе «скважина – водовмещающая порода» от фоновых шумов (атмосферное давление, океанические приливы). Ю.М. Хаткевич [6] детализировал закономерности динамики химического и газового состава гидротермальных систем. Он доказал их высокую индикаторную чувствительность к региональным перестройкам полей напряжений. В работах С.В. Болдиной [1,2] осуществлено математическое моделирование фильтрационных процессов в прискважинных зонах при динамическом нагружении. Это позволило увязать амплитудно-частотные параметры гидрогеологических откликов с тензочувствительностью и упругими модулями водовмещающих коллекторов.

Опыт эксплуатации Камчатского геодинамического полигона позволил разработать генетическую классификацию сейсмогидрогеологических эффектов, разделяющую их на три временных этапа относительно момента генерации сейсмического события:

1. Гидрогеологические предвестники (пресейсмические аномалии): Возникают на стадии квазистатической подготовки очага землетрясения за недели или месяцы (среднесрочные) либо за сутки и часы (краткосрочные) до главного толчка.

2. Косейсмические эффекты: Мгновенные ступенчатые или осцилляторные изменения

гидродинамических параметров непосредственно в момент прохождения объемных и поверхностных сейсмических волн.

3. Постсейсмические изменения: Долговременная (от недель до месяцев) релаксация пластового давления и стабилизация макрокомпонентного состава подземных вод.

Ключевой методологический элемент камчатской системы мониторинга – использование глубоких параметрических скважин в качестве высокочувствительных объемных деформометров. Скважина, вскрывающая напорный водоносный горизонт под мощным водоупором, выступает в роли природного гидравлического усилителя тектонических движений.

Механизмы формирования гидрогеодинамических и гидрогеохимических аномалий

Понимание физической природы и генезиса флюидодинамических и геохимических аномалий, индуцированных сеймотектоническими процессами, необходимо для корректной интерпретации данных гидрогеосейсмологического мониторинга. Современные представления о механизмах взаимодействия в системе «горная порода-флюид» позволяют количественно связать наблюдаемые вариации параметров подземных вод с динамическими и статическими изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающей среды.

В основе формирования гидрогеодинамических откликов лежат фундаментальные принципы пороупругости Био-Френкеля, согласно которым изменение объемной деформации матрицы породы приводит к пропорциональному изменению порового (пластового) давления. Под воздействием тектонических напряжений и при прохождении сейсмических волн в коллекторах развиваются знакопеременные упругие нагрузки.

Механизм косейсмического и предвестникового падения пластового давления (и адекватного снижения уровня воды в скважинах) преимущественно связывается с эффектом дилатансии – неупругого объемного расширения трещиновато-пористых пород при сдвиговых деформациях. В условиях тектонического растяжения или знакопеременного акустического воздействия происходит раскрытие существующих и генерация новых микротрещин. Это приводит к резкому увеличению эффективной пористости и емкости коллектора при неизменном объеме насыщающего флюида, вытягивая воду из прискважинной зоны и вызывая падение пьезометрического напора. Напротив, в зонах упругого сжатия уменьшение объема пор генерирует положительные скачки давления. Дополнительным фактором долгоживущих постсейсмических изменений уровня является сейсмогенное изменение проницаемости массива. Динамические напряжения вызывают разрушение коагуляционных про-

бок в трещинах, переупаковку зерен слабосцементированных грунтов и разрушение гидравлических барьеров, что перестраивает локальную фильтрационную сеть и перераспределяет пластовое давление.

Динамическое воздействие сейсмических волн на водоносные комплексы инициирует не только гидродинамические, но и выраженные гидрогеохимические инверсии. Они проявляются в кратковременном или устойчивом изменении минерализации, газового режима и концентраций макрокомпонентных индикаторных ионов.

Основным физическим механизмом, объясняющим данные инверсии, признан процесс межпластового (вертикального) перетока флюидов. В естественных условиях водоносные горизонты с различным химическим составом, возрастом и термобарическими параметрами изолированы друг от друга слабопроницаемыми разделяющими пластами (глинистыми или плотными кристаллическими толщами). Во время сейсмического процесса происходит нарушение сплошности и гидроизолирующих свойств этих разделов путем генерации субвертикальных микротрещин или деструкции локальных геохимических барьеров. Из-за существования градиентов пластового давления активизируется гидравлическое смешивание вод из смежных горизонтов. Поступление глубоких высокотермальных или высокоминерализованных флюидов в наблюдательный пласт приводит к резкому сдвигу химического равновесия, что фиксируется на устье скважин по изменению соотношений индикаторных ионов. После затухания сейсмической активности и релаксации напряжений под влиянием процессов гравитационного уплотнения и коагуляции трещин происходит восстановление нарушений, и химический состав подземных вод постепенно стабилизируется [4].

Современный этап развития гидрогеосейсмологии характеризуется переходом от качественного описания аномалий к их строгому математическому моделированию. Установление количественных корреляций между параметрами сейсмического источника и гидрогеологическими откликами позволяет использовать скважины как калиброванные деформометры.

Результаты исследований и их обсуждение

В рамках исследований проанализирован комплексный научно-исследовательский цикл, направленный на изучение гидрогеосейсмологических откликов флюидодинамических систем на современные геодинамические процессы.

Анализ эволюции гидрогеосейсмологических наблюдений показывает качественный переход от дискретного (ручного) отбора проб к автоматизированным измерительным комплексам в реальном времени. В международной практике (особенно в Японии, США и Тайване) акцент сместился на

создание сверхглубоких мониторинговых скважин. Используются высокоточные кварцевые датчики давления с разрешением до первых миллиметров водяного столба. Внедрен непрерывный масс-спектрометрический анализ изотопного состава подземных флюидов.

В отечественной науке сформировалась сильная фундаментальная база, опирающаяся на концепцию гидрогеодеформационного (ГГД) поля Земли. Современный этап развития методов в России характеризуется интеграцией гидрогеологических наблюдений в единые телеметрические сети комплексного геофизического мониторинга. Это позволяет сопоставлять гидродинамические вариации с сейсмичностью, деформациями земной коры и эманиями подпочвенных газов.

Камчатский регион обладает уникальной спецификой, обусловленной активным субдукционным режимом и интенсивным вулканизмом. Опыт многолетних наблюдений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне выявил ряд региональных особенностей [1-3].

Одинаковые по магнитуде сейсмические события вызывают разнонаправленные реакции (как подъем, так и падение уровней) даже в близкорасположенных скважинах. Это указывает на доминирующую роль локальной геоструктурной позиции каждого наблюдательного пункта.

Близость океанического побережья накладывает на гидродинамический режим мощный фон барометрических и приливных флуктуаций. Для выделения тектонических предвестников требуется

обязательное применение процедур математической фильтрации (компенсации атмосферного давления и лунно-солнечных приливов).

Под действием нарастающих тектонических напряжений происходит упругая деформация водонасыщенных пород. Изменение порового давления в водоносных горизонтах приводит к изменению уровней и дебитов подземных вод. Одновременно с этим микроразрывы и раскрытие субвертикальных трещин активизируют процессы выщелачивания минеральной матрицы. Это вызывает скачкообразный рост концентрации макро- и микрокомпонентов (гидрогеохимический отклик). Прохождение сейсмических волн вызывает динамическое сжатие или растяжение коллекторов, а также наведенную сейсмическую консолидацию грунтов. Происходит мгновенная разгрузка напряжений, часто сопровождающаяся гидродинамическими «ударами» и разрушением изолирующих экранов в водоносных комплексах. После прохождения основного процесса гидрогеологическая система стремится к новому термодинамическому равновесию.

Заключение

Сопоставление мирового опыта с результатами, полученными на Петропавловск-Камчатском полигоне, подтверждает, что гидрогеологический мониторинг является неотъемлемым элементом систем раннего оповещения. Главная проблема гидрогеосейсмологии – непостоянство пространственно-временного проявления предвестников – на Камчатке успешно решается за счет перехода к комплексированию методов.

Данная работа составлена в рамках реализации следующих программ КамГУ имени Витуса Беринга: Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030. Дальний Восток» и выполнения госзадания «Развитие системы комплексного геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений, функционирующей на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона» (FZSS-2025-0007).

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w=7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. №4. С. 863-880.
2. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Исследование косейсмических изменений давления подземных вод на Камчатке по данным высокоточных измерений // Физика Земли. 2023. №3. С. 78-95.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе «скважина – водовмещающая порода» (на примере Камчатки). Владивосток: Дальнаука. 2012. 195 с.
4. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С. 6-29.
5. Линьков А.А. Механика деформирования блочных сред и флюидодинамические эффекты // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7. №2. С. 15-32.
6. Хаткевич Ю.М. Сейсмогидрогеохимические предвестники землетрясений на Камчатке (по результатам многолетних наблюдений в Пиначевской флюидодинамической системе) // Вулканология и сейсмология. 2001. №6. С. 53-64.
7. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. №4. С. 34-42.
8. Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquake. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003. V. 108. No. B8. Art. No. 2390. DOI: 10.1029/2002JB002321.
9. Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C. Seismic waves increase permeability. Nature. 2006. V. 441. No. 7097. Pp. 1135-1138. DOI: 10.1038/nature04798.
10. Kano Y., Yanagidani T. Poroelastic response of water level in a deep well in Toki, Japan, to seismic waves. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2006. V. 111. No. B7. Art. No. B07301. DOI: 10.1029/2005JB003874.
11. Khatkevich Yu.M., Ryabinin G.V. Geochemical and Ground-Water Studies in Kamchatka in the Search for Earthquake Precursors. Journal of Volcanology and Seismology. 2006. No. 4. Pp. 235-242.

12. Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E. et al. Seismic permeability enhancement: A review of mechanisms. *Pramana*. 2012. V. 79. No. 5. Pp. 967-983. DOI: 10.1007/s12043-012-0432-1.
13. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*. 1973. V. 181. No. 4102. Pp. 803-810. DOI: 10.1126/science.181.4102.803.
14. Tsunogai U., Wakita H. Anomalous changes in groundwater chemistry before the Kobe earthquake. *Science*. 1995. Vol. 269. No. 5220. Pp. 61-63. DOI: 10.1126/science.269.5220.61.
15. Wang C.-Y., Manga M. *Earthquakes and Water*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010. 226 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8.
16. Wang C.-Y., Manga M. Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*. 2010. V. 10. No. 1-2. Pp. 206-216. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00279.x.

References

1. Boldina S.V., Kopylova G.N. Effects of the Zhupanov earthquake of January 30, 2016, $M_w=7.2$, in changes in the water level in wells SW-5 and E-1, Kamchatka. *Geodinamika i tektonofizika*. 2017. V. 8. No. 4. Pp. 863-880.
2. Kopylova G.N., Boldina S.V. Study of Coseismic Changes in Groundwater Pressure in Kamchatka Based on High-Precision Measurements. *Fizika Zemli*. 2023. No. 3. Pp. 78-95.
3. Kopylova G.N., Boldina S.V. *Gidrogeodinamicheskiye efekty zemletryaseniy v sisteme «skvazhina – vodovmeshchayushchaya poroda» (na primere Kamchatki)* [Hydrogeodynamic effects of earthquakes in the system «well – water-bearing rock» (on the example of Kamchatka)]. Vladivostok: Dalnauka. 2012. 195 p.
4. Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Fundamentals of Focus Physics and Harbingers of Earthquakes. *Fizika ochaga zemletryaseniya*. Moscow: Nauka. 1975. Pp. 6-29.
5. Linkov A.A. Mechanics of Deformation of Block Media and Fluid-Dynamic Effects. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera*. 2008. V. 7. No. 2. Pp. 15-32.
6. Khatkevich Yu.M. Seismohydrogeochemical Precursors of Earthquakes in Kamchatka (Based on the Results of Long-Term Observations in the Pinachevo Fluid-Dynamic System). *Vulkanologiya i seysmologiya*. 2001. No. 6. Pp. 53-64.
7. Khatkevich Yu.M., Ryabinin G.V. Hydrogeochemical Studies in Kamchatka in Connection with the Search for Earthquake Precursors. *Vulkanologiya i seysmologiya*. 2006. No. 4. Pp. 34-42.
8. Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. V. 108. No. B8. Art. No. 2390. DOI: 10.1029/2002JB002321.
9. Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C. Seismic waves increase permeability. *Nature*. 2006. V. 441. No. 7097. Pp. 1135-1138. DOI: 10.1038/nature04798.
10. Kano Y., Yanagidani T. Poroelastic response of water level in a deep well in Toki, Japan, to seismic waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. V. 111. No. B7. Art. No. B07301. DOI: 10.1029/2005JB003874.
11. Khatkevich Yu.M., Ryabinin G.V. Geochemical and Ground-Water Studies in Kamchatka in the Search for Earthquake Precursors. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2006. No. 4. Pp. 235-242.
12. Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E. et al. Seismic permeability enhancement: A review of mechanisms. *Pramana*. 2012. V. 79. No. 5. Pp. 967-983. DOI: 10.1007/s12043-012-0432-1.
13. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*. 1973. V. 181. No. 4102. Pp. 803-810. DOI: 10.1126/science.181.4102.803.
14. Tsunogai U., Wakita H. Anomalous changes in groundwater chemistry before the Kobe earthquake. *Science*. 1995. Vol. 269. No. 5220. Pp. 61-63. DOI: 10.1126/science.269.5220.61.
15. Wang C.-Y., Manga M. *Earthquakes and Water*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010. 226 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8.
16. Wang C.-Y., Manga M. Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*. 2010. V. 10. No. 1-2. Pp. 206-216. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00279.x.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Павлова Вероника Юрьевна

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры биологии и наук о Земле факультета естественных и технических наук, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга», 683032, Петропавловск-Камчатский, Россия

Гурьевна Наталья Олеговна

магистрантка 2-ого курса кафедры биологии и наук о Земле факультета естественных и технических наук, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга», 683032, Петропавловск-Камчатский, Россия; инженер лаборатории геофизических исследований Камчатского филиала ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 683032, Петропавловск-Камчатский, Россия

Information about authors Affiliations

Pavlova Veronika Yuryevna

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biology and Earth Sciences, Faculty of Natural and Technical Sciences, Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Guryevna Natalia Olegovna

Second-year Master's Student, Department of Biology and Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; Engineer, Geophysical Research Laboratory, Kamchatka Branch, Federal Research Center «Unified Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences», 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Поступила в редакцию 24.04.2026 г.