

УДК 556.3+550.34

СКВАЖИННЫЕ УРОВНЕМЕРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В СИСТЕМЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА КАМЧАТКЕ

Копылова Г.Н., Болдина С.В.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru, boldina@emsd.ru

Введение

Уровнемерные наблюдения в скважинах используются для изучения современных сейсмотектонических процессов вследствие чувствительности давления порово-трещинных флюидов к изменениям напряженно-деформированного состояния водовмещающих горных пород при развитии в них квазиупругой деформации и трещиной дилатансии на стадиях подготовки сильных землетрясений, образования их магистральных разрывов и воздействия сейсмических волн [5, 10, 13]. В результате многолетних наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН обнаружены разнообразны́е эффекты в изменениях уровня (давления) подземных вод, в т. ч. гидрогеодинамические предвестники местных сильных землетрясений (ГП), косейсмические скачки при образовании магистральных разрывов (КС) и гидрогеосейсмические вариации при вибрационном воздействии сейсмических волн от местных и сильнейших телесейсмических событий (ГГСВ) [3, 8-13].

В настоящей работе рассматриваются ГП, которые имеют практическое значение для оценки времени возникновения сильных землетрясений на Камчатке. Наиболее примечательные данные о ГП получены для скважины Е-1, в которой выделены два вида ГП перед землетрясениями Камчатской сейсмоактивной зоны с $M_w \geq 6.0$. Заблаговременность их проявления составляет сутки-первые месяцы (ГП_I) и первые годы (ГП_II) [10]. Указанные виды предвестников используются в комплексе с другими сейсмопогностическими данными при оценке опасности возникновения сильного землетрясения в Камчатском крае [17].

В скважине ЮЗ-5 выделены ГП в течение недель-первых месяцев перед Кроноцким землетрясением 5 декабря 1997 г., $M_w = 7.8$ и перед Жупановским землетрясением 30 января 2016 г., $M_w = 7.2$. Они проявлялись в нарушении среднесезонного тренда уровня воды [3, 5, 10]. В настоящей работе рассматриваются два новых метода исследования ГП в этой скважине: (1) на основе применения статистической процедуры выделения аномальных состояний 5-минутного временного ряда уровнемерных данных [14] и (2) с использованием вариаций во времени величины барометрической эффективности и параметров приливных волн в изменениях уровня воды.

В первом методе применялась совокупность алгоритмов статистического анализа уровнемерных данных, предложенная и впервые реализованная в [14, 16] для выделения краткосрочных аномальных состояний исходных временных рядов уровня воды. По данным наблюдений на скв. ЮЗ-5 были построены вектора восьми статистических свойств 5-минутного ряда в окне одни сутки и выделены четыре состояния временного ряда, между которыми происходят переключения во времени. Три из выделенных состояний ряда проявлялись с суммарной вероятностью 0.987 и рассматривались в качестве фоновых. Анализ «аномальных» состояний ряда, возникающих с вероятностью 0.013, проводился в сопоставлении с сильными землетрясениями, техническими условиями наблюдений и др. факторами. Применение такого метода обработки уровнемерных данных позволяет выделять скрытые в шуме кратковременные аномалии гидрогеодинамического режима скважины, что является существенным дополнением к традиционным методам обработки, направленным на выделение низкочастотных сигналов подготовки землетрясений в изменениях уровня воды.

Основу второго метода составляет применение приливного и барометрического анализа ряда среднечасовых данных уровнемерных наблюдений в окне длиной 30 сут с шагом одни сутки с использованием программы ETERNA 3.0 [21]. В результате такого подхода построены временные ряды барометрической эффективности и параметров приливных волн в изменениях уровня воды - амплитуд, амплитудных факторов и фазовых сдвигов. На стадиях подготовки землетрясений 28 февраля 2013 г., $M_w = 6.8$ и 30 января 2016 г., $M_w = 7.2$ были обнаружены эффекты уменьшения величины регрессионного коэффициента связи между вариациями уровня воды и атмосферного давления (РС - аналог величины барометрической эффективности уровня воды E_b , см/гПа), а также уменьшение амплитуд приливных волн и увеличение фазовых сдвигов между откликами уровня воды на приливную деформацию.

С использованием выявленных тенденций в изменениях барометрического и приливного откликов уровня воды и работ [1, 2, 18] сделаны оценки изменений упругих и фильтрационных свойств водовмещающих пород на стадиях подготовки сильных землетрясений.

Исходные данные, методика обработки и результаты

В скважине ЮЗ-5 (53.17° с. ш., 158.41° в. д., открытый интервал 310-800 м, водовмещающие породы представлены сланцами и алевролитами, уровень на глубине 1.5 м, вода пресная) проводились измерения уровня воды и атмосферного давления с периодичностью 5 минут [12]. Обеспечивалась точность регистрации вариаций уровня воды ± 0.1 см, атмосферного давления ± 0.1 гПа. Технический контроль функционирования системы наблюдений на скважине проводился не реже одного раза в квартал с фиксацией выполняемых работ в электронном журнале. Обработка данных проводилась оператором ежедневно. В [3-13] приводятся данные о строении скважины, упругих и фильтрационных свойствах водовмещающих пород, закономерностях гидрогеодинамического режима и описание зарегистрированных ГП, КС и ГГСВ при землетрясениях 1997-2018 гг.

При разработке метода выделения краткосрочных аномалий гидрогеодинамического режима скважины использовались 5-минутные данные регистрации уровня воды и атмосферного давления с 27.07.2012 г по 01.02.2018 г (2015 сут, 580605 5-минутных отсчетов). Данные примечательны высоким качеством, а также тем, что в течение наблюдений произошли пять землетрясений с $M_w = 6.5-8.3$ в Камчатской сейсмоактивной зоне и в западной части Алеутской сейсмоактивной зоны на эпицентральных расстояниях $d_e = 80-700$ км (см. таблицу в [14]).

Алгоритм обработки 5-минутного ряда уровневых данных с компенсированными баровариациями включал последовательное применение комплекса статистических методов, описание которых приводится в [14, 16]: (1) создание временных рядов 8-ми статистик, характеризующих различные свойства исходного временного ряда, в окне одни сутки; (2) выделение различных состояний ряда уровневых данных с использованием кластерного анализа 8-мерного ряда статистических признаков при понижении его размерности с использованием факторного анализа. Всего было выделено три ортогональных общих фактора и четыре кластера (рис. 1).

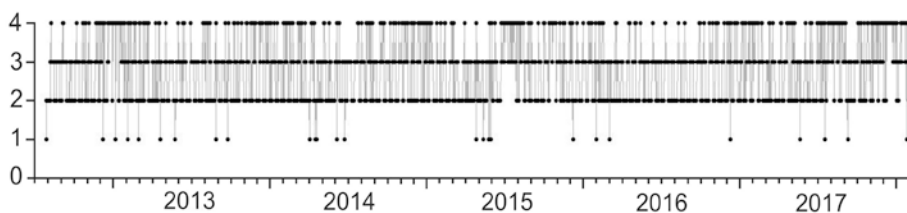


Рис. 1. Последовательность переходов между четырьмя кластерами статистических свойств временного ряда уровня воды для фрагментов длиной 1 сут (по вертикальной оси показаны номера кластеров 1-4).

Далее проводился анализ связи между проявлениями «аномального» кластера 1 (см. рис. 1) и нарушенными состояниями гидрогеодинамического режима скважины вследствие ГГСВ при пяти сильных землетрясениях (см. таблицу в [14]) и в пяти случаях проведения технических работ с внедрением в ствол скважины; общее число таких известных воздействий составляло 10 (рис. 2). Из пяти дат возникновения сильных местных землетрясений в четырех случаях (землетрясения 1-2, 4-5) проявлялся кластер 1 (рис. 2, а). Событие 3 с наименьшей магнитудой не сопровождалось проявлением кластера 1. Во всех пяти случаях нарушения гидрогеодинамического режима при проведении технических работ проявлялся кластер 1. Таким образом, из десяти известных случаев слабых возмущений гидрогеодинамического режима скважины (в течение первых часов) в девяти случаях проявлялся «аномальный» кластер 1, что является свидетельством достаточной чувствительности рассматриваемого метода обработки уровневых данных для диагностики кратковременных возмущений гидрогеодинамического режима наблюдательной скважины.

Если убрать из рассмотрения 9 случаев проявления кластера 1, связанных с известными возмущениями гидрогеодинамического режима скважины, то остается еще 18 случаев его проявления (67 %) (см. рис. 2, в). К возможным причинам появления кластера 1 мы относим: флуктуации гидрогеодинамического напора при интенсивном питании подземных вод в апреле-мае; ГГСВ при сильных удаленных землетрясениях; экстремальные метеорологические условия; техногенные воздействия на скважину, а также процессы подготовки сильных землетрясений.

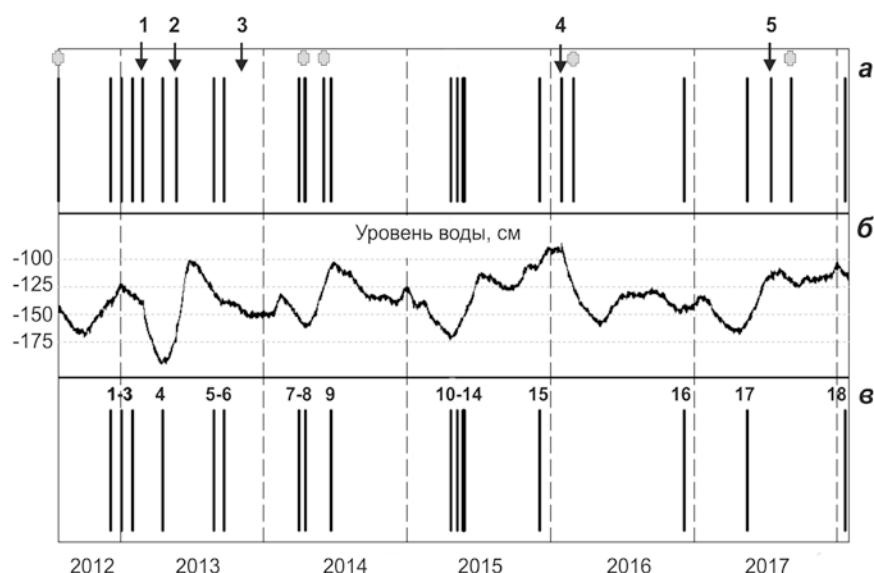


Рис. 2. Распределение во времени кластера 1 (а) в сопоставлении с временным рядом вариаций уровня воды (б), сильными землетрясениями (показаны стрелками: 1 – 28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км; 2 – 24.05.2013 г., $M_w = 8.3$, $d_e = 350$ км; 3 – 12.11.2013 г., $M_w = 6.5$, $d_e = 300$ км; 4 – 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км; 5 – 17.07.2017 г., $M_w = 7.8$, $d_e = 700$ км) и датами работ на скважине, сопровождающихся внедрением в ее ствол (показаны серыми крестами). Пояснения по графику (в) даны в тексте.

С учетом общих закономерностей связи гидрогеологических предвестников и сильных землетрясений [10] можно полагать, что девять случаев проявления кластера 1 (№№ 1-3, 4, 5-6, 15 и 16-17 на рис. 2, в) могли быть вызваны слабыми вариациями давления подземных вод при подготовке землетрясений 1-5 (рис. 2, а). В таком случае, заблаговременность проявления кластера 1 перед сильными землетрясениями составляет 25-220 сут при средней величине 72 сут или 2.4 мес.

Детальный приливной и барометрический анализ вариаций уровня воды включал расчет RC и параметров суточной группы (O_1 , Q_1) и полусуточной группы (S_2K_2 , N_2 , M_2) приливных волн по среднечасовым вариациям уровня воды. Расчеты проводились по программе ETERNA 3.0 для всего периода наблюдений 27.07.2012 - 03.02.2018 гг. и в скользящем окне 30 сут с шагом 1 сут. В результате были получены временные ряды RC и приливных параметров по отдельным волнам – величин амплитуд, амплитудных факторов и фазовых сдвигов по отношению к соответствующим величинам теоретической деформации в районе скважины, а также отношений сигнал/шум и ошибок определения приливных параметров для всего ряда и в скользящем 30-суточном окне.

Далее, в качестве примера, рассматриваются временные ряды приливных параметров для волны M_2 (период 12.42 ч), которая является одной из наиболее мощных и наименее зашумленных. Средняя величина амплитуды волны $M_2 = 0.92$ см при отношении сигнал/шум 270. Средние величины амплитудных факторов - $0.138 \text{ см}/10^{-9}$ объемной деформации A_v (volume strain) или $0.092 \text{ см}/10^{-9}$ площадной деформации A_s (areal strain) и сдвига фазы $\eta -17^\circ$. Средняя величина RC составляет 0.39 см/гПа .

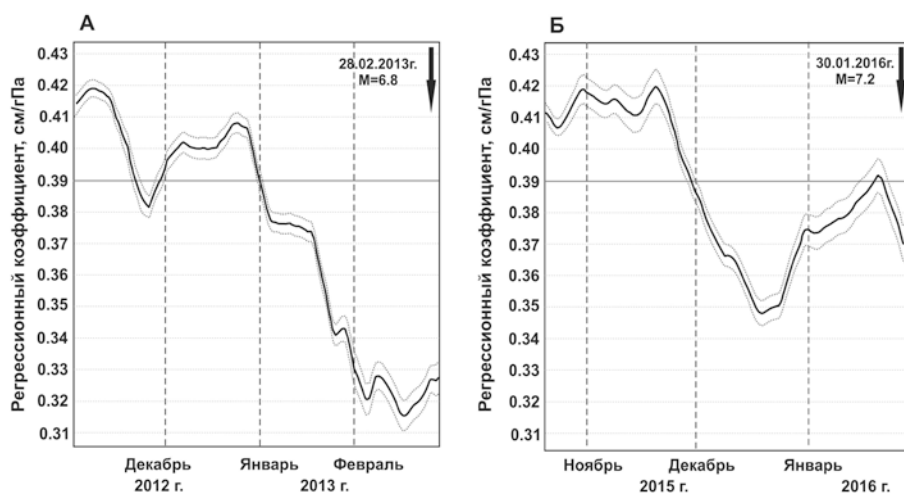


Рис. 3. Уменьшение регрессионного коэффициента (RC – черная линия) перед землетрясениями 28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км (А) и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км (Б). Серые линии показывают диапазон определения RC с учетом ошибок определения.

На рис. 3-5 представлены графики изменения RC, амплитуды и фазового сдвига для волны M_2 в периоды, предшествующие двум сильным землетрясениям. Из представленных примеров видно, что перед этими землетрясениями на интервалах времени в первые месяцы происходило уменьшение величин RC, амплитуды волны M_2 и возрастание сдвига фазы между волной M_2 в изменениях уровня воды и соответствующей компонентой приливного гравитационного потенциала. Аналогичные тенденции в

изменениях амплитуд и фазовых сдвигов перед этими землетрясениями прослеживаются и для других приливных волн в изменениях уровня воды.

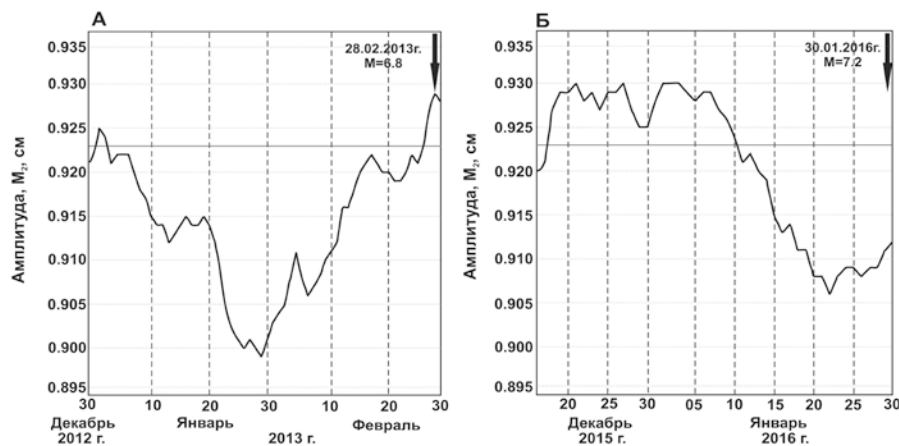


Рис. 4. Уменьшение амплитуды волны M_2 в изменениях уровня воды перед землетрясениями 28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км (А) и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км (Б).

Отметим, что в работе [15] впервые был продемонстрирован эффект ослабления барометрического отклика уровня воды в скважине, о. Шикотан, перед сильным

землетрясением. При этом использовался кросс-спектральный анализ с построением СВАН-диаграммы эволюции амплитудно-частотной передаточной функции от изменений атмосферного давления к вариациям уровня воды в скользящем временном окне. Применение аналогичного метода обработки к данным наблюдений 1996–1997 гг. на скв. Ю3-5 позволило обнаружить эффект резкого уменьшения амплитуды барометрического отклика уровня воды в диапазоне частот $0.5-0.1 \text{ ч}^{-1}$ в течение трех недель перед Кроноцким землетрясением 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$, $d_e = 300$ км [7].

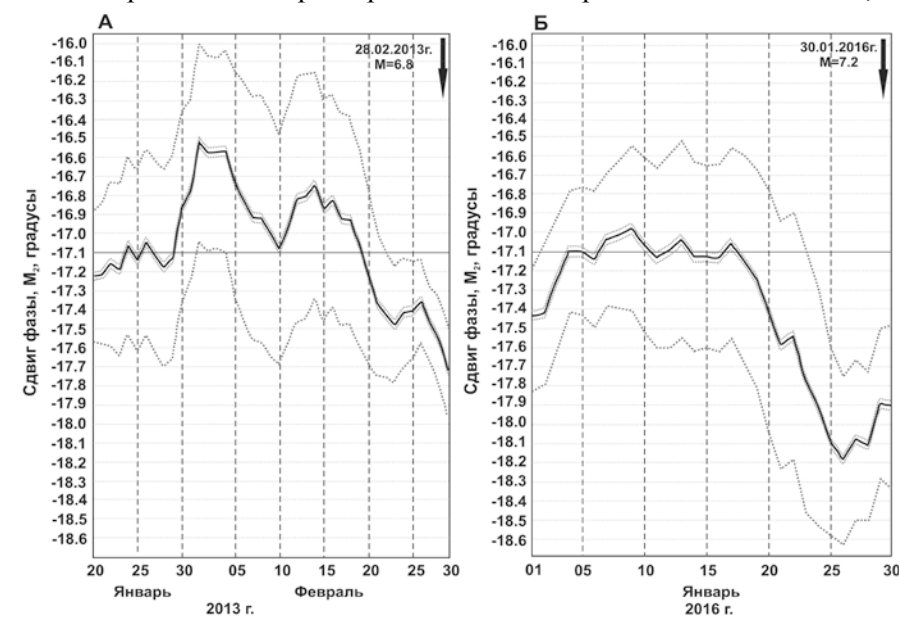


Рис. 5. Уменьшение фазового сдвига волны M_2 в изменениях уровня воды перед землетрясениями 28.03.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км (А) и 30.01.2016 г., $M_w = 7.2$, $d_e = 80$ км (Б).

Эффекты изменения амплитуды и фазового сдвига волны M_2 в изменениях уровня воды в периоды сильных землетрясений в Японии и Китае ранее демонстрировались в работах зарубежных исследователей [19, 20]. Для их выделения также

применялась специализированная программа приливного анализа ВАУТАР-G для обработки рядов уровнемерных наблюдений в скользящем временном окне.

Обнаруженный эффект уменьшения барометрической эффективности и приливной чувствительности вариаций уровня воды перед сильными землетрясениями (рис. 3, 4) дает возможность оценить характер изменчивости упругих свойств водовмещающих пород - дренированной сжимаемости, коэффициента Скемптона, удельной упругой емкости и пористости, на основе модели поведения системы «скважина – водовмещающая порода» в статически изолированных условиях [2]. На рис. 6 приводятся диаграммы, демонстрирующие увеличение пористости (рис. 6, Б) и дренированной сжимаемости водовмещающих пород (рис. 6, А) на стадиях подготовки двух землетрясений. Аналогичная тенденция увеличения величин упругих параметров также прослеживается для коэффициента Скемптона и удельной упругой емкости водовмещающих пород.

С учетом связи между величинами коэффициента водопроницаемости водовмещающих пород T и фазового сдвига волны M_2 в изменениях уровня воды (показана в [18] и применена для скв. Ю3-5 в [1]), построена диаграмма (рис. 7). На ней видно, что при росте фазового сдвига волны M_2 происходит уменьшение величины T на стадиях подготовки двух сильных землетрясений. При этом

принималось, что влияние изменений упругой емкости водовмещающих пород S сравнительно невелико [18]. Это позволяет предполагать, что на стадиях подготовки землетрясений водопроницаемость уменьшается за счет ухудшения фильтрационных свойств водовмещающих пород.

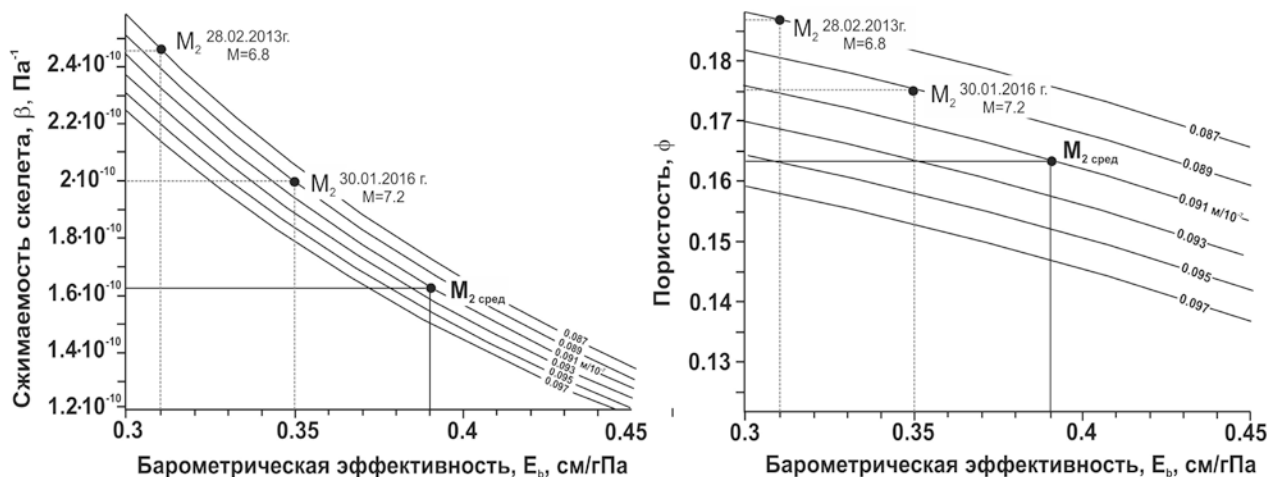


Рис. 6. Эффект увеличения сжимаемости скелета водовмещающей породы β (слева) и пористости ϕ (справа) при уменьшении величин барометрической эффективности $E_b=RC$ и приливной чувствительности уровня воды A_s по отношению к теоретической площадной деформации в диапазоне величин $0.087-0.097$ м/10⁻⁷[2]; $M_{2 \text{ сред}}$ – средняя оценка A_s по волне M_2 для всего ряда наблюдений; также показаны величины A_s , оцененные по волне M_2 в периоды, предшествующие землетрясениям 28.02.2013 г и 30.01.2016 г.

Заключение

Развитие метода скважинных гидрогеодинамических наблюдений, как элемента комплексного геофизического мониторинга и поиска предвестников землетрясений, включает создание новых способов обработки и интерпретации экспериментальных данных, обеспечивающих надежную диагностику сигналов подготовки землетрясений (гидрогеодинамических предвестников ГП), а также расширение представлений о флюидодинамических процессах их формирования.

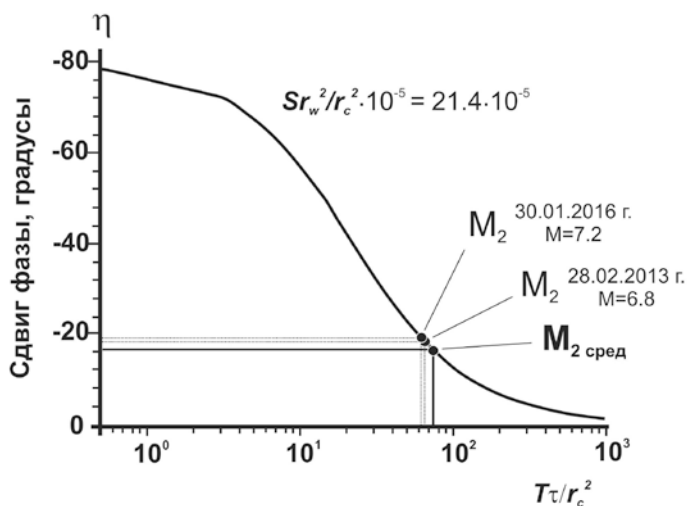


Рис. 7. Изменения фазового сдвига волны M_2 при различных значениях параметра $T\tau/r_c^2$ и $Sr_w^2/r_c^2 = 21.4 \cdot 10^{-5}$ для скв. ЮЗ-5: τ – период волны M_2 (12.42 ч), r_c – радиус скважины в области, где происходят колебания уровня воды, r_w – радиус скважины в области ее связи с водовмещающими породами [1]. При увеличении сдвига фазы происходит смещение оценок параметра $T\tau/r_c^2$ влево.

Представленные два новых метода обработки уровневых данных с использованием статистического и приливного анализа, которые расширяют возможности использования данных скважинных уровневых наблюдений

для выделения средне-краткосрочных аномалий гидрогеодинамического режима наблюдательной скважины.

В результате приливного анализа многолетних данных уровневых наблюдений на скважине ЮЗ-5 продемонстрированы новые эффекты (возможные предвестники) на стадиях подготовки двух сильных землетрясений, проявляющиеся в уменьшении амплитуды и фазового сдвига волны M_2 и в уменьшении барометрической эффективности вариаций уровня воды в течение первых месяцев.

Рассмотрена возможность и впервые получены оценки изменчивости упругих и фильтрационных свойств водовмещающих пород на стадиях подготовки сильных землетрясений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты №№ 18-05-00337, 18-05-00133.

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 2. Вып. № 8. С. 112-119.
2. Болдина С.В., Копылова Г.Н. О возможности получения оценок упругих параметров водовмещающих пород по данным равномерных наблюдений в пьезометрических скважинах // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2013. № 2. Вып. № 22. С. 184-195.
3. 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.
4. Болдина С.В., Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г. Гидрогеодинамические эффекты сильных землетрясений 2017-2018 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Тр. Седьмой научно-техн. конф. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. (настоящий сборник).
5. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
6. Копылова Г.Н. Оценка информативности равномерных наблюдений в скважинах для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 56-68.
7. Копылова Г.Н., Любушин А.А., Малугин В.А., Смирнов А.А., Таранова Л.Н. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 69-79.
8. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г., $M=9.3$ // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 39-48.
9. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Восточная Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008-2009 гг. и сильными ($M \geq 5$) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41-54.
10. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 – 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3-20.
11. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Касимова В.А. Эффекты сильных землетрясений, $M_w=6.8-9.1$, в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Шестой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 1-7 октября 2017 г. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 276-280.
12. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г. Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. № 4, Т. 52. С.43-56.
13. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным равномерных наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. № 1. С. 51-61.
14. Копылова Г.Н., Любушин А.А., Болдина С.В. Статистический анализ прецизионных данных наблюдений за уровнем подземных вод в сейсмоактивном регионе (на примере скважины ЮЗ-5, Камчатка) // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 1. С.5-28.
15. Любушин А.А., Лежнев М.Ю. Анализ изменчивости функции отклика уровня подземных вод на баровариации на Южных Курилах (о. Шикотан) // Физика Земли. 1995. № 8. С.79-84.
16. Любушин А.А., Казанцева О.С., Манукин А.Б. Анализ длительных наблюдений за уровнем подземных вод в асейсмическом регионе // Физика Земли. 2019. № 2. С. 47-67.
17. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
18. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824-1832.
19. Matsumoto N., Roeloffs E. Hydrological response to earthquakes in the Haibara well, central Japan-II. Possible mechanism inferred from time-varying hydraulic properties // Geophys. J. Int. 2003. V. 155. P. 899-913.
20. Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.-Y. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes - insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland // Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 430. P. 66-74.
21. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. P. 8719-8721.