

УДК 556.33:550.348

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ ДЛЯ ПОИСКА ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ КАМЧАТКИ)

© 2009 г. Г.Н. Копылова

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, Россия

На примере двух камчатских наблюдательных скважин, обладающих контрастными деформометрическими свойствами, – скв. Е1 и скв. ЮЗ-5 – рассматриваются этапы оценки их информативности для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений на основе особенностей отклика уровня воды на барометрическое, приливное и косейсмическое воздействия. Привлекаются данные о проявлении гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды в обеих скважинах перед Кроноцким землетрясением (05.12.1997 г., $M=7.8$). Приводятся результаты ретроспективной оценки сейсмопрогностической эффективности гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скв. Е1 для прогноза землетрясений с $M=5-7$ на расстояниях до 350 км. Рассматриваются два механизма чувствительности уровня воды к процессам подготовки землетрясений: упругий и неупругий (сложный, являющийся следствием развития трещинной дилатансии в водовмещающих породах и увеличения их емкости).

Ключевые слова: скважина, уровень воды, землетрясение, гидрогеодинамические предвестники, барометрический отклик, приливная чувствительность, сейсмопрогностическая эффективность.

Введение

Уровнемерные наблюдения в скважинах – традиционный компонент системы геофизического мониторинга и поиска предвестников землетрясений. В сейсмоактивных районах России такие наблюдения целенаправленно проводятся в течение последних десятилетий [Вартамян, Куликов, 1982; Киссин, 1993; Копылова и др., 2000; Копылова, 2001, 2006а, 2007; Стажило-Алексеев, 2007]. Но, несмотря на их широкое проведение и в России, и в других странах мира, недостаточное внимание уделяется вопросам оценки информативности метода для поиска предвестников землетрясений. В настоящей работе демонстрируется, что в основе такой оценки может быть изучение откликов уровня воды в отдельных наблюдательных скважинах на барометрическое, приливное и сейсмическое воздействия.

Переменная барометрическая нагрузка, земные приливы и землетрясения сопровождаются изменением уровня воды в скважинах за счет вариаций упругого состояния резервуаров подземных вод. Если скважина вскрывает изолированный резервуар, фильтрацией воды в котором можно пренебречь, а водообмен между резервуаром и стволом скважины не искажает реакцию уровня на изменение порового давления, то перепады атмосферного давления будут сопровождаться откликом уровня, амплитуда которого Δh линейно связана с вертикальной нагрузкой Δb :

$$\Delta h = -(1/\rho_w g) \left[1 - (B/3)(1 + \nu_u)/(1 - \nu_u) \right] \Delta b. \quad (1)$$

Здесь и в (2) ρ_v – плотность воды, g – ускорение свободного падения. Коэффициенты связи в (1) и (2) определяются упругими параметрами резервуара – модулем сдвига G , коэффициентом Скемптона B и коэффициентами Пуассона для недренированных условий ν_u [Roeloffs, 1988].

Приливы в твердой Земле сопровождаются объемной деформацией водонасыщенных горных пород. В этом случае амплитуда приливного отклика уровня воды в скважине пропорциональна амплитуде объемной деформации $\Delta\varepsilon$:

$$\Delta h = -(1/\rho_v g)(2GB/3)[(1 + \nu_u)/(1 - 2\nu_u)]\Delta\varepsilon. \quad (2)$$

В практике уровневых наблюдений для характеристики барометрического отклика уровня используется величина барометрической эффективности $E_b = \Delta h / \Delta b$ и ее зависимость от периода вариаций. Если в некотором диапазоне периодов обнаруживаются постоянные значения E_b , это означает, что в данном диапазоне фильтрация воды в резервуаре и водообмен между скважиной и резервуаром не оказывают искажающего влияния на проявление барометрического отклика уровня в скважине.

Для характеристики приливного воздействия определяются амплитуды отдельных приливных волн в изменениях уровня воды и фазовые соотношения между приливными вариациями уровня и соответствующими компонентами приливного гравитационного потенциала. Оценивается также величина приливной чувствительности уровня воды $A_v = -\Delta h / \Delta\varepsilon$ по отношению к теоретическим или экспериментально зарегистрированным приливным деформациям флюидонасыщенных горных пород.

При изучении сейсмического воздействия необходимо разделять отклики уровня воды в скважине на землетрясения и на процессы их подготовки. При коровых землетрясениях происходит образование разрывов в очагах и излучение сейсмических волн. Образование разрывов сопровождается изменением статического поля напряжений в верхних горизонтах земной коры и упругой деформацией водовмещающих пород на значительных территориях. Площадь и распределение деформаций сжатия и расширения водовмещающих пород определяются величиной сейсмического момента и параметрами очага землетрясения. Такой тип сейсмического воздействия проявляется в кратковременных косейсмических скачках уровня воды, амплитуды которых пропорциональны амплитудам деформации по (2). Характер скачка (понижение или повышение) определяется преобладающим типом деформации водовмещающих пород в районе скважины [Wakita, 1975; Roeloffs, 1988; Копылова, 2006а].

Излучение сейсмических волн может сопровождаться различными ко- и постсейсмическими вариациями уровня воды, которые имеют сложный механизм формирования, зависящий от параметров землетрясений (соотношения магнитуды и расстояния до скважины), локальных гидрогеологических условий и строения скважины [Копылова, 2006б].

Современные теоретические и экспериментальные данные показывают, что подготовка землетрясения может сопровождаться двумя различными типами деформационных процессов в геологической среде: квазиупругой деформацией при возникновении предсейсмических движений в области очага и развитием в горных породах трещинной дилатансии [Roeloffs, 1988; Копылова, 2006а,б]. Эти процессы определяют два основных механизма образования гидрогеодинамических предвестников землетрясений – один за счет упругой деформации водовмещающих пород, второй за счет развития трещинной дилатансии в них. В первом случае амплитуды изменений уровня могут быть пропорциональными амплитудам деформации. Во втором – преимущественно будет развиваться понижение уровня воды из-за увеличения емкости водовмещающих пород.

Ранее в качестве критериев информативности уровнемерных наблюдений в скважинах для поиска предвестников землетрясений рассматривались различные признаки, которые можно разделить на две группы.

Первая группа включает наличие приливных вариаций уровня [Киссин, 1993; Методические..., 2000], обнаружение статически изолированного отклика уровня воды на барометрическое и приливное воздействие с оценкой диапазона периодов его проявления [Rojstaczer, 1989; Копылова, 2006а; Копылова, Болдина, 2006; Копылова, Куликов, Тимофеев, 2007], соответствие амплитуды и направления косейсмических скачков уровня воды величине и характеру косейсмической деформации водовмещающих пород при образовании разрыва в очаге землетрясения [Wakita, 1975]. Показатели этой группы демонстрируют способность уровня воды реагировать на упругую деформацию водовмещающих пород.

В работах [Rojstaczer, 1988, 1989; Копылова, 2006а,б; Копылова, Куликов, Тимофеев, 2007] в качестве важного показателя информативности уровнемерных наблюдений рассматривается обнаружение статически изолированного отклика уровня воды в скважинах наблюдательной сети и его параметры – диапазон периодов проявления и величина приливной чувствительности. Проявление такого отклика показывает, что скважина вскрывает изолированный резервуар напорных подземных вод, в котором их гидравлическая связь со свободной поверхностью и с другими водоносными горизонтами является не существенной по сравнению с изменениями порового давления при деформировании резервуара. Установленный диапазон периодов проявления рассматриваемого отклика свидетельствует, что в нем можно пренебречь течением (фильтрацией) воды в резервуаре, а отклик уровня на изменения порового давления не искажается процессами водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод. Статически изолированный отклик уровня воды линейно связан с деформацией водовмещающих пород и управляется упругими параметрами резервуара.

Границы диапазона периодов статически изолированного отклика уровня воды в высокочастотной области определяются инерционными свойствами системы скважина–резервуар, в низкочастотной области – процессами течения воды в резервуаре и эффектами формирования сезонного гидростатического напора в районе скважины [Копылова, 2006а]. Для скважин, вскрывающих изолированные горизонты напорных подземных вод, диапазон периодов проявления статически изолированного отклика уровня воды может меняться в широких пределах: от минут–первых часов до суток–десятков суток.

Определение статически изолированного отклика уровня воды в скважине дает возможность количественной оценки деформации водовмещающих пород на стадии подготовки землетрясения при их упругом деформировании. Однако результаты экспериментов по разрушению образцов, численное моделирование процессов подготовки землетрясений и экспериментальные данные свидетельствуют – при подготовке землетрясения может происходить не только упругое, но и неупругое изменение напряженно-деформированного состояния горных пород за счет развития в них трещинной дилатансии [Копылова, 2006б]. Такое явление может сопровождаться изменением емкости водовмещающих пород и фильтрационных связей в пределах контролируемого резервуара подземных вод. Поэтому обнаружение статически изолированного отклика уровня воды не является определяющим признаком информативности уровнемерных наблюдений. Механизмы чувствительности уровня воды к процессам подготовки землетрясений могут определяться как упругой реакцией порового давления на деформацию водовмещающих пород, так и реакцией порового давления на изменение их емкостных свойств и фильтрационных связей в пределах резервуара подземных вод.

При наличии газовой фазы в составе порового флюида в механизм чувствительности уровня воды к процессам подготовки землетрясения может включаться изменение фазового состояния флюида, его плотности и высоты пьезометрического напора [Копылова, 2001, 2006б].

Ко второй группе признаков информативности скважин для поиска предвестников землетрясений относятся проявления разнообразных гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды в скважинах [Киссин, 1993] и величина сейсмопрогностической эффективности гидрогеодинамических предвестников [Копылова, 2001]. Величина эффективности использования предвестника для прогноза землетрясений показывает, во сколько раз его использование улучшает прогнозирование по сравнению со случайным угадыванием [Гусев, 1974].

Достоверное обнаружение гидрогеодинамических предвестников свидетельствует о способности уровня воды в скважине реагировать на процесс подготовки землетрясения независимо от механизма, который может быть как упругим, так и неупругим, более сложным, связанным с развитием дилатансии в водовмещающих породах. Величина эффективности гидрогеодинамических предвестников, определяемая на основе их ретроспективного (или в режиме реального времени) статистического анализа, представляет наиболее объективную оценку информативности уровневых наблюдений в скважине также независимо от механизма образования предвестников. Но такой вероятностно-статистический подход к оценке информативности уровневых наблюдений возможен только при регулярном проявлении гидрогеодинамических предвестников в конкретной скважине и не может быть применен при их отсутствии или единичном проявлении. В последнем случае оценка информативности уровневых наблюдений для поиска гидрогеодинамических предвестников может осуществляться путем комплексного анализа откликов уровня воды в скважине на барометрическое, приливное и сейсмическое воздействия.

В настоящей работе на примере двух камчатских наблюдательных скважин, обладающих контрастными деформометрическими свойствами, рассматриваются этапы оценки их информативности на основе особенностей барометрического и приливного откликов, а также отклика уровня воды на косейсмическую деформацию. Используются данные о проявлении гидрогеодинамического предвестника в обеих скважинах перед Кроноцким землетрясением 5 декабря 1997 г., $M=7.8$ и приводятся результаты ретроспективного статистического анализа эффективности использования для прогноза землетрясений гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня в скв. Е1.

В качестве основных показателей (критериев) информативности уровневых наблюдений в конкретной скважине рассматриваются определение механизма чувствительности уровня воды к процессам подготовки землетрясения, достоверное выделение гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровня воды, результаты статистической оценки эффективности гидрогеодинамических предвестников для прогноза. Анализируются два механизма чувствительности уровня воды к процессам подготовки землетрясений: преимущественно упругий, представляющий реакцию порового давления на упругую деформацию водовмещающих пород, и неупругий (сложный), обусловленный развитием трещинной дилатансии в водовмещающих породах и увеличением их емкости. Показано, что изучение особенностей откликов уровня воды на барометрическое, приливное и сейсмическое воздействия позволяет оценивать преобладающие механизмы чувствительности уровня воды в отдельных скважинах к процессам подготовки землетрясений.

Скважины и данные наблюдений

Характеристика наблюдательных скважин Е1 и ЮЗ-5 приведена в таблице; более подробная информация о них содержится в работах [Копылова и др., 2000; Копылова, 2001, 2006а; Копылова, Болдина, 2006; Копылова, Куликов, Тимофеев, 2007].

Скв. ЮЗ-5 вскрывает напорные пресные подземные воды в зоне активного водообмена с обычными физическими свойствами, скв. Е1 – напорные слабосолоноватые подземные воды, расположенные в зоне затрудненного водообмена. В составе порового флюида присутствует газ метано-азотного состава. Пузырьки газа увеличивают сжимаемость порового флюида на порядки по сравнению с обычной водой, в связи с чем упругие свойства резервуара становятся резко отличными от свойств резервуаров, содержащих обычную воду.

Различие скважин проявляется в особенностях вариаций уровня воды (рис. 1). Запись уровня в скв. ЮЗ-5 типична для скважин, вскрывающих напорные пресные воды.

Характеристики наблюдательных скважин

	Скв. Е1	Скв. ЮЗ-5
Координаты	53.264° с.ш., 158.478° в.д.	53.169° с.ш., 158.414° в.д.
Глубина, м	665	800
Ствол	перфорация обсадной колонны в интервале 625–645 м	открытый ствол в интервале 310–800 м
Глубина уровня воды, м	29	1.5
Водовмещающие породы	туфы неогенового возраста	алевролиты и аргиллиты позднемелового возраста

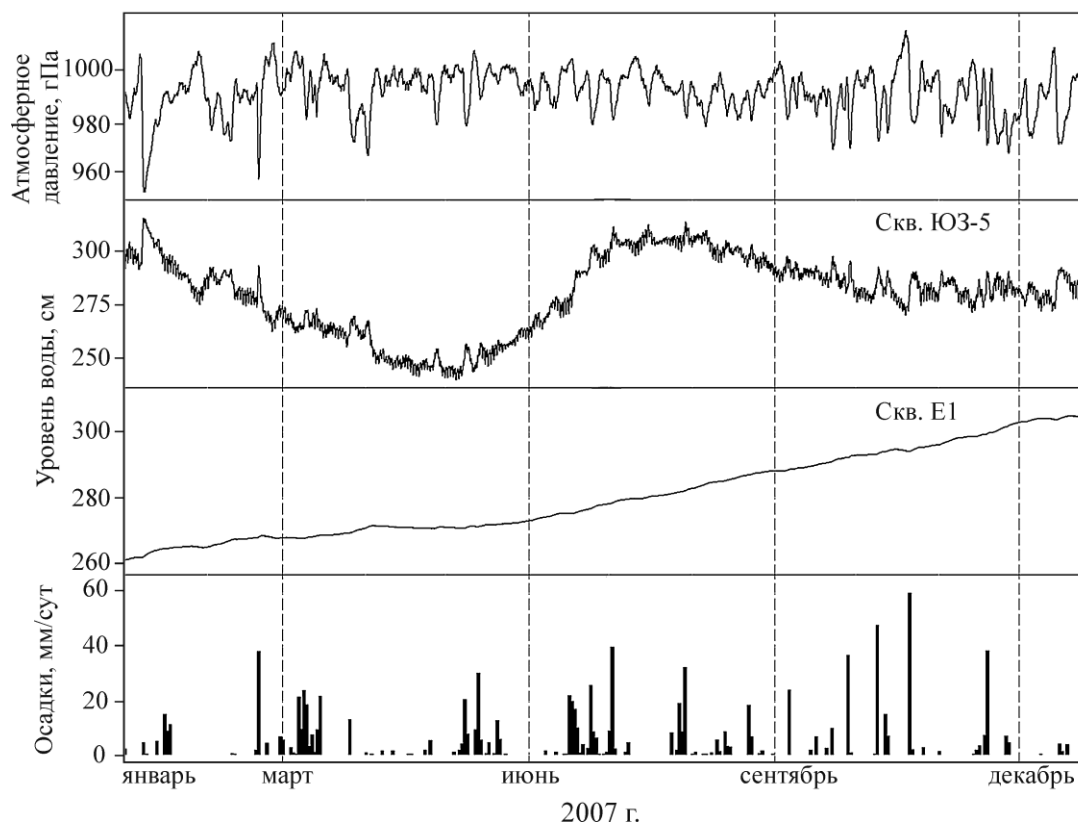


Рис. 1. Изменения уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 в 2007 г. в сопоставлении с атмосферным давлением и осадками

В изменениях уровня наблюдаются сезонный тренд, барометрические, приливные вариации и реакция на выпадение атмосферных осадков. В изменениях уровня в скв. Е1 присутствует многолетний тренд, годовая сезонность и приливы отсутствуют, барометрические вариации выражены слабо.

Особенности откликов уровня воды в скважинах на барометрическое, приливное и сейсмическое воздействия

Исследование откликов уровня воды в скважинах на барометрическое, приливное и сейсмическое воздействия позволяет оценить способность уровня воды в конкретной скважине реагировать на изменение напряженно-деформированного состояния водо-вмещающих пород, деформометрические свойства скважины и определить преобладающий механизм чувствительности уровня к процессам подготовки землетрясения.

Барометрическое воздействие определяется переменной вертикальной нагрузкой атмосферного воздуха на поверхность Земли и кровлю резервуара, а также на столб воды в скважине через ее открытое устье. Такая переменная нагрузка сопровождается барометрическими вариациями уровня воды в диапазоне периодов от минут до десятков-сотен суток. Кросс-спектральный анализ синхронных временных рядов уровня и атмосферного давления позволяет получить параметры барометрического отклика: величины когерентности, амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды и разности фаз в зависимости от периода.

На рис. 2, *а* приведено сопоставление функций квадрата модуля спектра когерентности и амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды в двух скважинах в диапазоне часовых периодов. Для скв. ЮЗ-5 величина когерентности близка к 1, величина амплитудной передаточной функции на периодах ≥ 6 ч постоянна и составляет 0.4 см/гПа. Искажение отклика уровня на изменения атмосферного давления по фазе не превышает 8° .

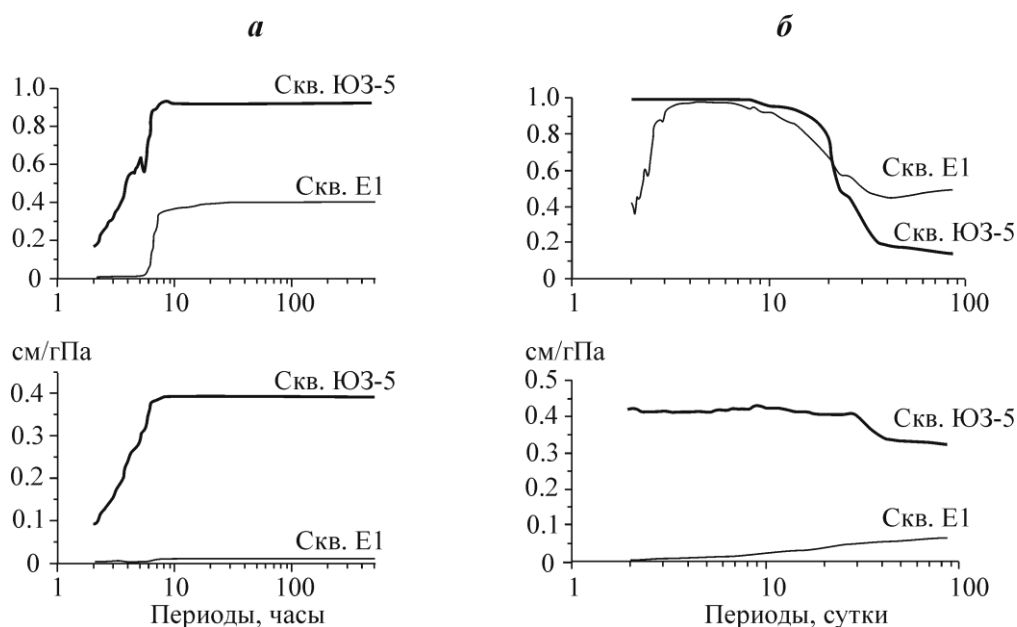


Рис. 2. Результаты кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления в скважинах ЮЗ-5 и Е1 по часовым (*а*) и по среднесуточным (*б*) данным. На вертикальных осях: вверху – квадрат модуля спектра когерентности, внизу – амплитудная передаточная функция

Для скв. Е1 максимальная когерентность составляет 0.42, величина передаточной функции не превышает 0.01 см/гПа, искажение отклика по фазе достигает 71°. Построение функций когерентности и амплитудной передаточной функции по среднесуточным данным (рис. 2, б) позволяет проследить особенности затухания барометрического отклика с увеличением периода вариаций. В скв. ЮЗ-5 резкое затухание барометрического отклика происходит на периодах 20–30 сут. В скв. Е1 изменение когерентности вариаций уровня воды и атмосферного давления более сложное: в первые сутки когерентность возрастает от 0.4 почти до единицы, затем плавно уменьшается. Величина передаточной функции мала, с ростом периодов она увеличивается от 0.01 до 0.05 см/гПа.

Как видно, параметры барометрического отклика уровня воды в двух скважинах существенно различны. В скв. ЮЗ-5 барометрический отклик уровня характеризуется величиной барометрической эффективности 0.40 см/гПа, постоянным в диапазоне периодов от первых часов до ~20 сут; затем с ростом периодов отклик резко затухает. В скв. Е1 барометрический отклик уровня в диапазоне периодов от часов до десятков суток неустойчив, величина амплитудной передаточной функции не превышает 0.01–0.05 см/гПа.

Приливное воздействие. Приливной анализ часовых вариаций уровня в обеих скважинах проводился по программе ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994]. В изменениях уровня в скв. ЮЗ-5 выделены восемь волн с амплитудами 1.3–0.04 см. Амплитудные факторы по отношению к величинам теоретической объемной деформации изменяются в пределах 0.14–0.20 см/10⁻⁹. На рис. 3 показана зависимость амплитуд выделенных приливных волн в изменениях уровня воды от соответствующих величин объемной деформации. Наклон графика зависимости соответствует 0.161 см/10⁻⁹ и характеризует приливную чувствительность уровня воды A_v во всем диапазоне суточных и полусуточных приливных волн.

В скв. Е1 приливные волны не выделены, что указывает на неспособность уровня воды в ней реагировать на изменение объемной деформации водовмещающих пород с амплитудами порядка $n \cdot 10^{-9}$ на суточных и полусуточных периодах.

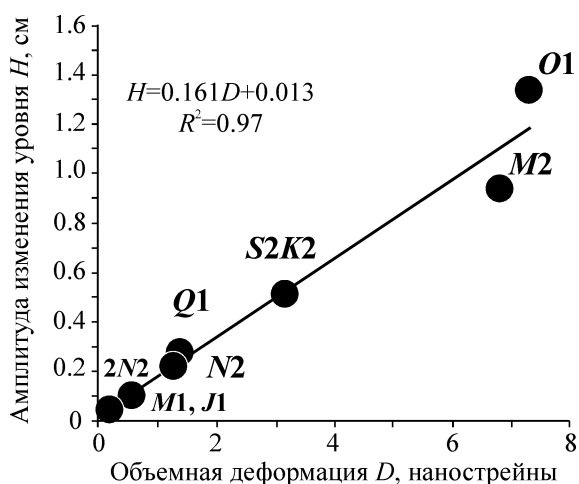


Рис. 3. Зависимость выделенных приливных амплитуд в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 (H) от соответствующих величин теоретической объемной деформации (D). Q1, O1, M1, J1, S2K2, M2, N2, 2N2 – суточные и полусуточные приливные волны

Оценка статически изолированного отклика уровня воды в скважинах на основе барометрического и приливного анализа. Приведенные результаты барометрического и приливного анализа позволяют оценить наличие статически изолированного отклика уровня воды в скважинах и его параметры – диапазон периодов проявления и величину приливной чувствительности. В скв. ЮЗ-5 отклик уровня может проявляться в диапазоне периодов часы–первые десятки суток; приливная чувствительность уровня

$A_v=0.161 \text{ см}/10^{-9}$. В скв. Е1 барометрический отклик искажен, приливов нет и приливная чувствительность уровня отсутствует. Таким образом, скв. ЮЗ-5 в указанном диапазоне периодов может работать как деформометр, а скв. Е1 такой способностью не обладает, по крайней мере, в диапазоне приливных деформаций водовмещающих пород (суточных и полусуточных).

Сейсмотектоническое воздействие: косейсмические скачки уровня воды, гидрогеодинамические предвестники. Регистрация косейсмических скачков уровня в скв. ЮЗ-5 во время местных землетрясений – еще один показатель ее деформометрической способности [Копылова, 2006а]. Амплитуды скачков Δh на 10-минутном интервале, включающем землетрясение, изменялись от 0.25 до 12 см (см. рис. 5 в работе [Копылова, 2006а]). По амплитудам скачков с использованием величины приливной чувствительности A_v в качестве нормирующего коэффициента оценены величины амплитуды косейсмической деформации водовмещающих пород $D = -\Delta h/A_v$ ($D=74.5-1.6 \cdot 10^{-9}$). Характер деформации оценивается по направлению скачка: понижение уровня указывает на деформацию расширения, повышение – на деформацию сжатия водовмещающих пород.

В изменениях уровня воды в скв. Е1 приливы и косейсмические скачки не проявляются. Но в ней регулярно за сутки–первые десятки суток перед землетрясениями с $M=5-7$ регистрируются их гидрогеодинамические предвестники, проявляющиеся в увеличении скорости понижения уровня воды [Копылова, 2001]. В 2007 г. такой предвестник в скв. Е1 проявлялся трижды, и в каждом случае он сопровождался последующим ощутимым землетрясением (рис. 4, а, в).

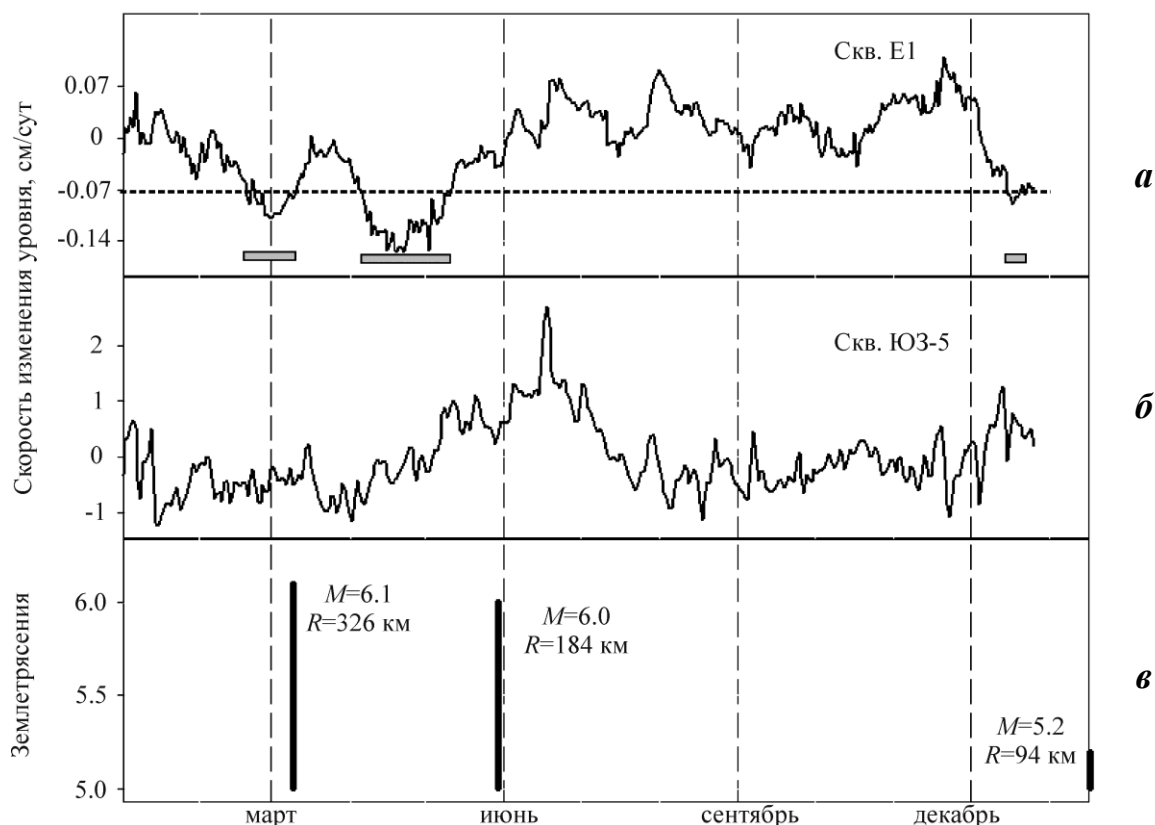


Рис. 4. Суточные скорости изменения уровня воды в скважинах Е1 (а) и ЮЗ-5 (б) по наблюдениям 2007 г. в сопоставлении с ощутимыми землетрясениями, произошедшими в тот же период (в). На а: горизонтальная пунктирная линия – пороговое значение скорости понижения уровня воды при выделении гидрогеодинамического предвестника ($-0.07 \text{ см}/\text{сут}$); горизонтальные серые линии – интервалы времени проявления предвестника. На в: вертикальные линии – землетрясения, возле них M – магнитуда землетрясения, R , км – гипоцентрального расстояния

В скв. ЮЗ-5, обладающей хорошими деформометрическими свойствами, перед этими тремя землетрясениями аномальные вариации уровня воды не проявлялись (см. рис. 1). Не выявлены также и аномальные изменения суточных скоростей вариаций уровня, фоновые значения которой лежат в диапазоне $-1 \dots 1$ см/сут (рис. 4, б). Все это свидетельствует, что в районе скважины на стадиях подготовки этих землетрясений на периодах сутки–первые десятки суток не происходила деформация водовмещающих пород с амплитудами порядка единиц 10^{-8} и больше. Это же указывает на существенное различие механизмов чувствительности уровня в двух скважинах к процессам подготовки землетрясений.

Наиболее значительное сейсмическое событие за время уровнемерных наблюдений на Камчатке – Кроноцкое землетрясение 5.12.1997 г. ($M_w=7.8$). Ему предшествовали зарегистрированные методом GPS-геодезии предсейсмические движения в области очага, продолжавшиеся в течение примерно 20 сут [Gordeev, 2001]. Землетрясение сопровождалось разнообразными изменениями уровня воды в обеих скважинах [Копылова, 2000, 2001, 2006а]. В течение трех недель перед землетрясением в них происходило понижение уровня, рассматриваемое как гидрогеодинамический предвестник [Копылова, 2006а]. Амплитуда понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 составила 11 см, в скв. Е1 – 1 см (см. рис. 6 в [Копылова, 2006а]). Полагая, что механизм таких понижений вызван упругой деформацией расширения водовмещающих пород, оценена ее амплитуда – $D=68 \cdot 10^{-9}$ ($\sim 0.7 \cdot 10^{-7}$). Предположив, что в районе скв. Е1 величина объемной деформации водовмещающих пород примерно такая же, можно оценить деформометрическую чувствительность уровня воды в этой скважине – $A_v \sim 0.15$ см/ 10^{-8} , что примерно на порядок меньше, чем для скв. ЮЗ-5. Если наши предположения справедливы, то такая деформометрическая чувствительность уровня воды в скв. Е1 может проявляться только при длительном развитии деформационного процесса в течение суток–первых десятков суток.

Оценка механизмов чувствительности уровня воды в скважинах к процессам подготовки землетрясений

Приведенные материалы позволяют оценить преобладающий механизм чувствительности уровня воды в конкретной скважине к процессам подготовки землетрясений. В скв. ЮЗ-5 это упругий механизм чувствительности уровня, который может проявляться в диапазоне периодов от минут до первых десятков суток при развитии объемной деформации водовмещающих пород с амплитудами $n \cdot 10^{-9} - n \cdot 10^{-8}$. Деформометрическая чувствительность уровня $A_v=0.161$ см/ 10^{-9} . На периодах более первых десятков суток упругий механизм затухает вследствие течения воды в резервуаре. Данные многолетних наблюдений на скв. ЮЗ-5 показывают, что подготовка камчатских землетрясений с $M=5-7$ на расстояниях $R \geq 100$ км обычно не сопровождается деформацией водовмещающих пород в рассмотренном диапазоне периодов и амплитуд.

В скв. Е1 преобладает сложный (преимущественно неупругий) механизм чувствительности уровня к процессам подготовки землетрясений с $M=5-7$ на гипоцентральных расстояниях $R \leq 350$ км, который проявляется в понижении уровня воды с повышенной скоростью в течение суток–десятков суток. Такой механизм может быть связан с большей чувствительностью уровня воды к развитию дилатансии в водовмещающих породах и к увеличению их емкости при подготовке землетрясений. Отсутствие чувствительности уровня воды по упругому механизму при приливной и косейсмической де-

формации водовмещающих пород с амплитудами $n \cdot 10^{-9} - n \cdot 10^{-8}$ на меньших периодах (минуты–первые сутки) объясняется повышенной сжимаемостью порового флюида и, возможно, инерционностью системы скважина–резервуар. На примере Кроноцкого землетрясения можно предположить также слабую чувствительность уровня по упругому механизму при развитии деформации водовмещающих пород с амплитудами порядка единиц 10^{-8} на периодах сутки–десять суток при величине деформометрической чувствительности уровня воды $A_v \sim 0.15 \text{ см}/10^{-8}$.

Статистическая оценка эффективности гидрогеодинамического предвестника для прогноза землетрясений

Как уже отмечалось выше, в скв. Е1 гидрогеодинамический предвестник в форме увеличения скорости понижения уровня воды регистрируется регулярно [Копылова, 2001]. На рис. 5 приводится пример такого предвестника перед землетрясением 10.03.2007 г. ($M=6.1$).

Для оценки статистической значимости предвестника его необходимо формализовать, оценить его параметры и параметры сопряженных сейсмических событий. В качестве предвестника рассматривалось понижение уровня воды со скоростью, которая не превышает $-0.07 \text{ см}/\text{сут}$ в течение 5 сут и более. Если в период развития предвестника или в течение не более 30 сут после его окончания происходило землетрясение с $M \geq 5$ на расстоянии $R \leq 350 \text{ км}$, то оно связывалось с данным предвестником. Параметрами предвестника являются его продолжительность $T_{\text{п}}$, заблаговременность $T_{\text{а}}$:

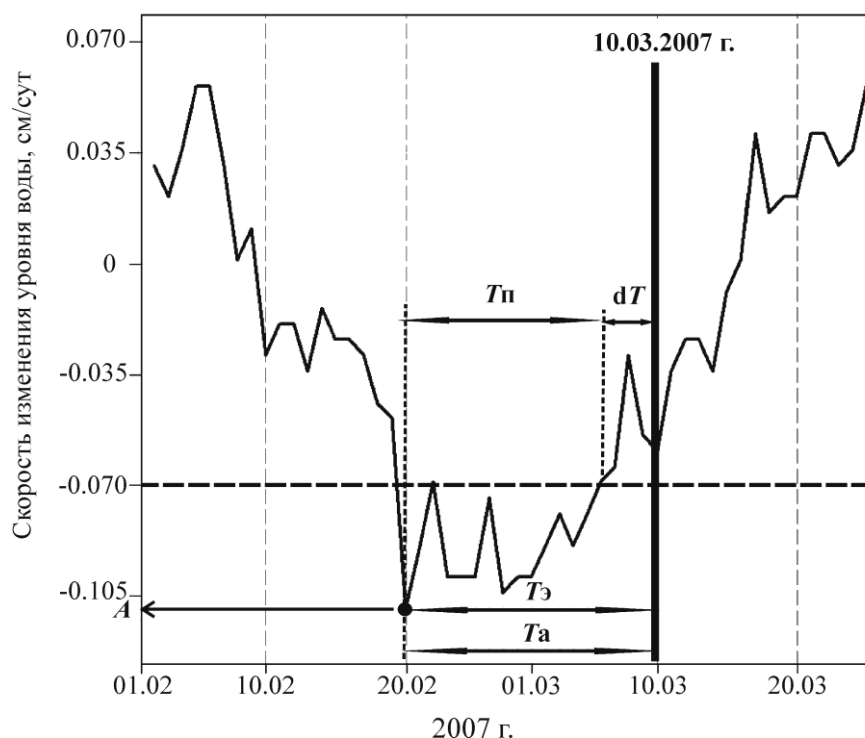


Рис. 5. Проявление гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скв. Е1 перед землетрясением 10.03.2007 г. ($M=6.1$, $R=326 \text{ км}$). Параметры предвестника см. в тексте. Горизонтальной штриховой линией показано пороговое значение скорости понижения уровня воды ($-0.07 \text{ см}/\text{сут}$). Утолщенной вертикальной линией отмечена дата землетрясения

экстремальная амплитуда A , равная максимальной скорости понижения уровня воды, время проявления экстремальной амплитуды до землетрясения T_3 и время от окончания предвестника до землетрясения $dT=T_a-T_n$ (рис. 5).

В период наблюдений с октября 1996 по 2007 гг. произошло 20 землетрясений с $M \geq 5$ и $R \leq 350$ км. Перед четырнадцатью из них проявлялся предвестник в изменениях уровня воды в скв. Е1 (величина вероятности связи предвестника и землетрясений составляет $14/20=0.70$). Параметры предвестника: $T_n = 6-48$ сут, $T_a = 6-57$ сут, $A = -0.07 \dots -0.20$ см/сут, $T_3 = 2-43$ сут, $dT = -15-27$ сут.

Величина эффективности предвестника рассчитывалась по формуле $I=(m/n)/(\tau/t)$, где m – число сейсмических событий, перед которыми проявлялся предвестник; n – общее число сейсмических событий; τ – суммарное время проявления предвестника; t – общее время наблюдений. Величина I показывает различие между отношениями m/n и τ/t . Если эффективность $I > 1$, то такой предвестник считается полезным для прогноза [Гусев, 1974; Копылова, 2001].

Эффективность гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скв. Е1 составляет $I=3.18$ и, следовательно, этот предвестник является полезным и может быть использован для прогноза землетрясений.

Выводы

На примере анализа откликов уровня воды в двух камчатских скважинах на барометрическое, приливное и сейсмическое воздействия показана возможность проявления различных механизмов чувствительности уровня к процессам подготовки землетрясений. Рассмотрены два таких механизма – реакция порового давления на упругую деформацию водовмещающих пород в диапазоне периодов проявления статически изолированного отклика и понижение уровня воды с повышенной скоростью, возможно, связанное с развитием дилатансии в водовмещающих породах и увеличением их емкости.

Количественная оценка деформации водовмещающих пород на стадиях подготовки землетрясений возможна только для скважин с упругим механизмом чувствительности уровня воды при определении величины его деформометрической чувствительности A_v .

При подготовке камчатских землетрясений с $M=5-7$, удаленных от скважин на расстояние $R \geq 100$ км, упругая деформация водовмещающих пород с амплитудами порядка $10^{-9}-10^{-8}$ обычно не развивается в течение часов-первых десятков суток. Исключением было Кроноцкое землетрясение ($M=7.8$, гипоцентральное расстояние до скважин составляет 310 км, расстояние от центра очаговой области до скважин – 200 км), которое сопровождалось развитием упругой деформации водовмещающих пород с амплитудой $\sim 1 \cdot 10^{-7}$.

Установлено, что обладающая низкими деформометрическими свойствами скв. Е1, в которой отсутствуют приливные вариации уровня воды, является информативным объектом для поиска гидрогеодинамических предвестников камчатских землетрясений. Для нее ретроспективно установлена величина эффективности использования гидрогеодинамического предвестника $I=3.18$ для прогноза землетрясений с $M=5-7$ на расстояниях до 350 км; величина вероятности связи предвестника и землетрясения – 0.7. На примере скв. Е1 показано, что отсутствие приливных вариаций уровня не является показателем низкой информативности скважины.

Многолетние наблюдения на скв. ЮЗ-5 свидетельствуют, что наличие приливных вариаций уровня воды является полезным, но недостаточным признаком информативности скважины для поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений.

Литература

- Вартанян Г.С., Куликов Г.В.* Гидрогеодеформационное поле Земли // Докл. АН СССР. 1982. Т. 262, № 2. С. 310–314.
- Гусев А.А.* Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.
- Киссин И.Г.* Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58–69.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.
- Копылова Г.Н.* Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006а. № 6. С. 53–63.
- Копылова Г.Н.* Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006б. № 1. Вып. № 7. С. 50–66.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В.* Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 17–28.
- Копылова Г.Н., Куликов Г.В., Тимофеев В.М.* Оценка состояния и перспективы развития гидрогеодеформационного мониторинга сейсмоактивных регионов России // Разведка и охрана недр. 2007. № 11. С. 75–83.
- Копылова Г.Н., Любушин А.А., Малугин В.А. и др.* Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 69–79.
- Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (система R-STEPS). М.: ЗАО Геоинформмарк, 2000. 77 с.
- Стажило-Алексев С.К.* Мониторинг геодинамических эндогенных процессов территории РФ // Разведка и охрана недр. 2007. № 7. С. 25–31.
- Gordeev E.I., Gusev A.A., Levin V.E. et al.* Preliminary analysis of deformation at the Eurasia-Pacific-North America plate junction from GPS data // Geophys. J. Int. 2001. V. 147. P. 189–198.
- Roeloffs E.A.* Hydrologic precursors to earthquakes: A review. // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177–209.
- Rojstaczer S.* Intermediate period response of water levels in wells to crustal strain: sensitivity and noise level // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 13619–13634.
- Rojstaczer S., Agnew D.S.* The influence of formation material properties on the response of water levels in wells to Earth tides and atmospheric loading. // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. P. 12403–12411.
- Wakita H.* Water wells as possible indicators of tectonic strain // Science. 1975. V. 189. P. 553–555.
- Wenzel H.G.* Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // ВИМ. 1994. № 118. P. 8719–8721.

Сведения об авторе

КОПЫЛОВА Галина Николаевна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, Камчатский филиал Геофизической службы РАН, 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9, КФ ГС РАН. Тел./факс: 8(4152)431849. E-mail: gala@emsd.ru

THE APPLICATION OF WATER LEVEL OBSERVATIONS IN WELLS FOR SEARCHING EARTHQUAKES PRECURSORS (ON THE EXAMPLE OF KAMCHATKA)

G.N. Kopylova

*Geophysical Survey of the RAS, Kamchatka Branch,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Abstract. The wells E1 and UZ-5, Kamchatka, are characterized by contrast sensitivity to strain. The peculiarities in barometric, tidal and coseismic water level responses are considered as characteristics of different wells for searching of hydrogeological precursors of earthquakes. The data on precursors in water level changes in both wells before the Kronotskoe earthquake of December 5, 1997, $M=7.8$ are used. The retrospective calculation of the forecast efficiency of precursor in water level changes in the well E1 for prediction of earthquakes with $M=5-7$ on distances up to 350 km are presented. Two mechanisms of water level sensitivity to earthquakes preparation processes are considered. One mechanism is elastic and the second mechanism is complicated (non-elastic) owing to development of a crack dilatation in water-saturated reservoir and magnification of his capacity.

Key words: well, water level, earthquake, hydrogeological precursors, barometric response, earth tides, amplitude transfer function, barometric efficiency, tidal sensitivity, forecast efficiency.