

УДК 550.34:550.832.9

ПРИРОДНЫЕ ЗОНДИРУЮЩИЕ СИГНАЛЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ
ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Г.Н. Копылова

*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683006. E-mail: gala@emsd.iks.ru*

Гидрогеодинамический мониторинг в сейсмоактивных регионах проводится с целью оценки состояния резервуаров подземных вод и включает проведение наблюдений на скважинах и источниках за изменением гидрогеодинамических параметров - пластового давле-

ния, уровней воды, дебитов. При этом предполагается, что аномальные состояния резервуаров подземных вод могут быть вызваны процессами подготовки сильных землетрясений.

При обработке данных гидрогеодинамических наблюдений используются два методических подхода. Традиционный подход заключается в выделении из вариаций наблюдаемого параметра, например, из вариаций уровня воды, сигналов изменения пластового давления, зашумленного влиянием факторов-помех. Метод неоднократно показывал свою эффективность при выделении косейсмических сигналов и предвестников землетрясений в изменениях уровней воды в скважинах [2,3]. Вместе с тем, выделение «чистого сигнала» изменения пластового давления, позволяющего однозначно диагностировать аномальное состояние резервуаров подземных вод, не всегда возможно, в первую очередь, из-за сложности процессов их водного питания [3].

В настоящем сообщении демонстрируются методы обработки и анализа данных гидрогеодинамических наблюдений, основанные на изучении откликов резервуаров подземных вод на постоянно или эпизодически действующие природные зондирующие сигналы. В качестве таких сигналов рассматриваются атмосферное давление, земные приливы и слабые землетрясения.

Атмосферное давление (АД) представляет постоянно действующий широкополосный сигнал с амплитудами от десятых долей до первых десятков гектопаскалей. АД имеет двойной механизм воздействия на резервуары подземных вод. Во-первых, атмосферное давление оказывает прямое воздействие на резервуар через его кровлю. В этом случае при росте АД резервуар сжимается, и пластовое давление в нем повышается. Кроме этого, АД непосредственно воздействует на зеркало воды в скважине. В этом случае повышение АД «заталкивает» воду из ствола скважины в резервуар и вызывает соответствующие изменения уровня воды. Второй механизм воздействия АД на изменения уровней воды преобладает в скважинах, вскрывающих изолированные от поверхности резервуары подземных вод.

Отклик уровня воды на атмосферное давление характеризуется величиной барометрической эффективности E_e , равной отношению изменений уровня к соответствующим изменениям атмосферного давления. Величина E_e индивидуальна для каждой скважины и определяется фильтрационными и упругими характеристиками резервуара, а также степенью его изоляции от атмосферы [1, с.115]. Таким образом, величина E_e представляет интегральную характеристику свойств резервуара и перекрывающей толщи.

В [3-5] представлен способ оценки изменчивости барометрического отклика уровней воды в скважинах путем построения частотно-временных диаграмм эволюции амплитудной частотной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды. Анализ таких диаграмм позволяет качественно проследить изменчивость свойств резервуара и перекрывающей толщи одновременно в частотной и временной областях. Интер-

претация таких диаграмм заключается в выделении временных интервалов и частотных полос с проявлением повышенного или пониженного барометрического отклика уровня воды в скважине. При этом рост барометрического отклика может указывать на повышение упругих свойств резервуара и на улучшение изоляции резервуара от атмосферы, т.е. на общее упрочнение среды. Ослабление барометрического отклика, наоборот, может указывать на понижение упругих свойств резервуара и на улучшение связи резервуара с атмосферой, т.е. на его разупрочнение.

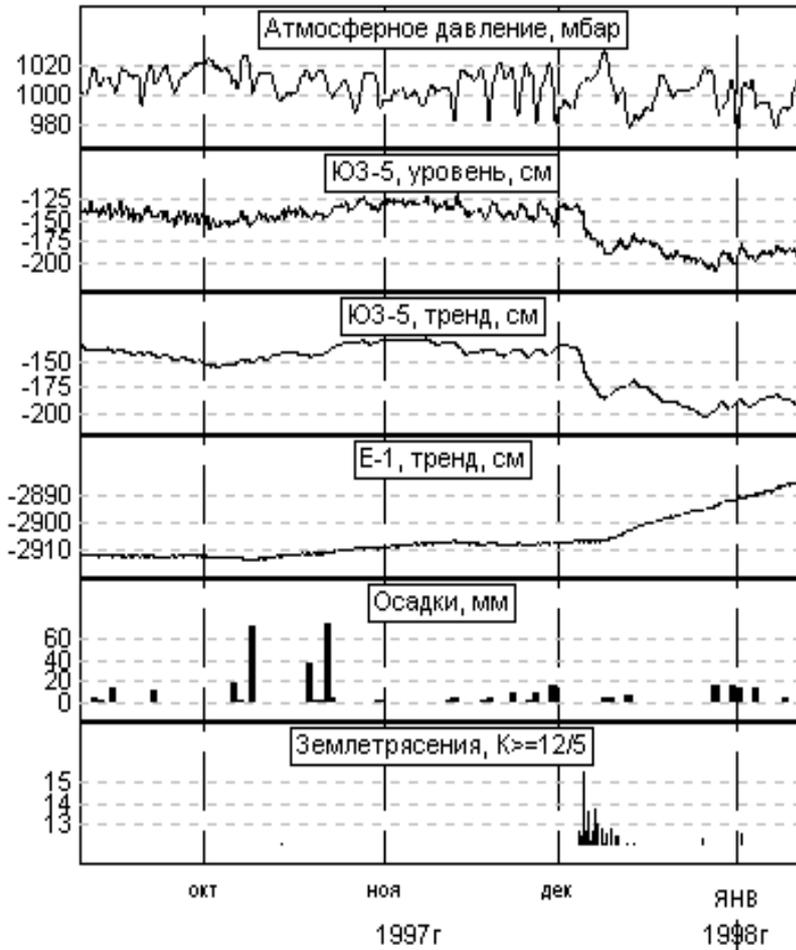
Приливное воздействие представляет постоянно действующий зондирующий сигнал, обусловленный гравитационным взаимодействием масс в системе Земля-Луна-Солнце. В результате этого взаимодействия генерируется серия приливных волн с известными периодами, амплитудами и фазами. Теория земных приливов позволяет рассчитывать параметры приливных волн (их амплитуды и фазы) для любой точки на поверхности Земли [6,7].

Приливные волны вызывают объемные деформации резервуаров подземных вод с амплитудами $n \times 10^{-8}$ - $n \times 10^{-9}$, которые проявляются в изменениях уровней воды в скважинах. Приливной отклик резервуара (или его приливно-деформометрическая чувствительность) является характеристикой сжимаемости резервуара и его способности реагировать на деформации. Приливный анализ вариаций уровня воды в скважинах [7] позволяет получить приливные параметры системы «скважина-резервуар», а именно, амплитуды приливных волн, разности фаз между выделенной фазой соответствующей волны и теоретической фазой приливной волны. В результате оценивается деформометрическая чувствительность системы «скважина-резервуар» как отношение выделенных из вариаций уровня воды амплитуд отдельных волн к соответствующим амплитудам изменения объемной деформации. Например, для периода наблюдений с 26.05 по 5.11.2003 г. на скважине ЮЗ-5 ее деформометрическая чувствительность по отдельным волнам составляет от 0.13 до 0.21 см/ 10^{-9} , в среднем 0.18 см/ 10^{-9} .

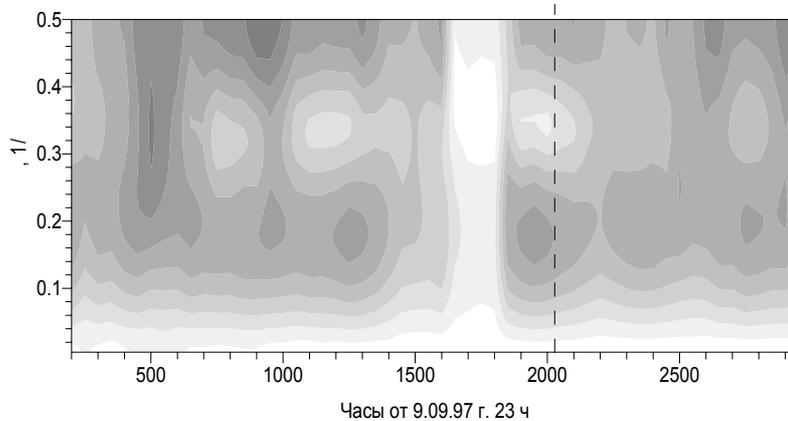
Оценивание в скользящем временном окне амплитуд наиболее мощных и наименее зашумленных волн M_2 , O_1 и их разностей фаз позволяет проследить изменчивость приливных параметров системы «скважина-резервуар» во времени. Интерпретация графиков изменения выделенных амплитуд и разностей фаз может быть следующей. Если в поведении приливных параметров присутствуют изменения, то они могут быть связаны с изменением свойств резервуара.

Изменения уровней воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 в период Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M=7.9$ (КЗ) представлены на рис.1а. Это землетрясение вызвало интенсивные ко- и постсейсмические вариации уровней воды (рис.1а), на фоне которых изменения уровней, предшествующие КЗ, проявляются слабо. Поэтому на рис. 1в показаны изменения

А



Б



В

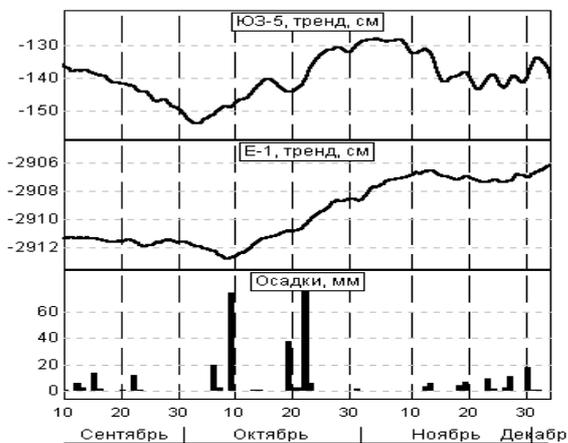


Рис.1. А – Данные наблюдений за атмосферным давлением и вариациями уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 в сентябре 1997 г.-январе 1998 г. в период Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M=7.9$ (КЗ); Б – диаграмма эволюции амплитудной частотной передаточной функции от вариаций атмосферно давления к изменениям уровня воды в скв. ЮЗ-5; пунктирная линия – КЗ; В – изменения трендов уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е1 в сентябре-декабре 1997 г. до момента КЗ.

трендов уровней воды в обеих скважинах до момента землетрясения. До КЗ наблюдается синхронизация в изменении уровней воды в обеих скважинах с октября 1997 г. В течение октября-первой декады ноября уровни повышались. Это указывает на развитие деформаций сжатия резервуаров. Со второй декады ноября в изменениях уровней развивались бухтообразные понижения (рис. 1в). В скважине ЮЗ-5 амплитуда понижения уровня воды составила 11 см, а в скв. Е1 – 1 см. В это же время наблюдалась аномалия резкого уменьшения барометрического отклика уровня воды в скв. ЮЗ-5 (рис. 1б), показывающая понижение упругих свойств резервуара и улучшение его связи с атмосферой. По результатам приливного анализа вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 в ноябре происходило уменьшение амплитуды приливной волны M_2 с 11.5 мм до 9 мм, т.е. примерно на 20%.

Совокупность выявленных признаков аномального состояния резервуаров подземных вод скважин ЮЗ-5 и Е1 показывает, что примерно за три недели до Кроноцкого землетрясения происходило не только понижение в них пластового давления вследствие развития деформаций расширения резервуара, но и изменение физических свойств пород резервуаров и перекрывающих толщ в сторону их разупрочнения.

На последней стадии подготовки КЗ деформация расширения резервуара скважины ЮЗ-5 составляла не менее 0.6×10^{-7} в соответствии с амплитудой понижения уровня воды на 11 см и величиной ее приливной деформометрической чувствительности $0.18 \text{ см}/10^{-9}$.

В изменениях уровня воды в скв. Е1 приливные вариации не выделяются, поэтому величина ее деформометрической чувствительности неизвестна. На основании предположения о примерном соответствии величин деформации резервуаров скв. Е1 и скв. ЮЗ-5 на последней стадии подготовки КЗ получена оценка деформометрической чувствительности скважины Е1 $0.17 \text{ см}/10^{-8}$. Как видно, полученная величина на порядок меньше, чем для скв. ЮЗ-5 и согласуется с тем фактом, что приливные воздействия не проявляются в изменениях уровня воды в скв. Е1.

Относительно слабые землетрясения* с известными энергетическими параметрами и местоположением очагов также можно рассматривать в качестве эпизодически действующих зондирующих сигналов состояния резервуаров подземных вод, если они вызывают косейсмические отклики в изменениях дебитов источников и уровней воды в скважинах. Если предположить, что свойства резервуара, питающего режимный источник или вскрытого пьезометрической скважиной, изменяются в процессе подготовки сильного землетрясения, то, на основе статистического анализа проявлений косейсмического отклика гидрогеодинамических параметров на множество слабых землетрясений, могут быть разработаны эмпирические критерии состояния резервуара, указывающие на опасность подготовки сейсмической катастрофы.

На основе анализа изменений косейсмического отклика Пиначевского источника 1 в 1977-1995 гг. выявлены периоды относительного понижения реакции его дебита на зондирующее сейсмическое воздействие, которые предшествовали возникновению сильных землетрясений с $M \geq 6.8$. Проявлением такого эффекта является группирование во времени землетрясений, вызывающих относительно слабую косейсмическую реакцию дебита источника. Это может указывать на изменение состояния и свойств питающего источник резервуара в связи с процессами подготовки сильных землетрясений. В частности, группирование событий с пониженной реакцией дебита источника на относительно слабые землетрясения проявлялось в течение 0.5 года до возникновения двух землетрясений с $M \geq 6.8$ в 1983-1984 гг. (I на рис.2в) и в течение 2-2.5 лет до возникновения трех землетрясений 1992-1993 гг. с $M \geq 7.1$ (II на рис.2в).

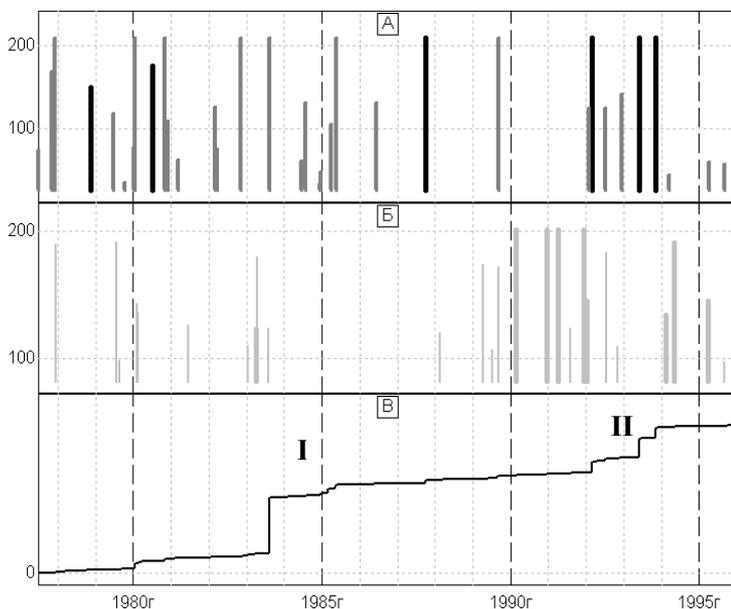


Рис.2. Распределение во времени землетрясений 1977-1995 гг., вызвавших различный отклик в изменении дебита источника 1: А – землетрясения, вызвавшие повышенный (черные вертикальные линии) и нормальный (темно-серые вертикальные линии) типы отклика дебита источника; Б – землетрясения, вызвавшие пониженный тип отклика источника (толстые серые линии) и землетрясения, не вызвавшие изменение дебита (тонкие серые линии); В – кумулятивный график выделения сейсмической энергии на 10-суточных интервалах для землетрясений с $K_s \geq 9.0$, $H=0-200$ км в радиусе до 450 км от п. Пиначево (диапазон изменения от 9.7×10^9 до 6.65×10^{15} Дж). I – период сейсмической активизации 1983 г.-1984 гг.; II – период сейсмической активизации 1992-1993 гг.

*В этом случае сильные и катастрофические землетрясения рассматриваются в качестве объекта прогнозирования при проведении гидрогеодинамического мониторинга.

Основные результаты работы и выводы.

1. Представлены методы анализа барометрического и приливного откликов в изменениях уровней воды в скважинах, которые могут применяться при проведении гидрогеодинамического мониторинга для оценки состояния резервуаров подземных вод.

2. По данным равномерных наблюдений на скважинах ЮЗ-5 и Е1 выявлены признаки аномального состояния резервуаров подземных вод на последней стадии подготовки Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г., $M=7.9$. В течение месяца-трех недель до землетрясения происходило понижение пластового давления, вызванное развитием деформаций расширения резервуаров, а также аномальное уменьшение барометрического отклика уровня воды,

указывающее на изменение физических свойств резервуаров и перекрывающих пород в сторону их разупрочнения. Величина деформации расширения резервуара скв. ЮЗ-5 составляла не менее 0.6×10^{-7} .

Оценена деформометрическая чувствительность скважины Е1, равная $0.17 \text{ см}/10^{-8}$.

3. Обнаружен эффект группирования событий с пониженным типом косейсмического отклика дебита Пиначевского источника 1 в течение 0.5 года перед серией сильных землетрясений 1983-1984 гг. (два землетрясения с магнитудами 6.8 и 7.5) и в течение 2-2.5 лет перед серией сильных землетрясений 1992-1993 гг. (три землетрясения с магнитудами 7.1; 7.4; 7.1). Ослабление косейсмической реакции резервуара подземных вод, питающего источник, указывает на изменение его свойств и состояния на стадии подготовки сейсмических активизаций на Камчатке.

Автор выражает благодарность д. ф.-м. н. Любушину А.А., ИФЗ РАН, к. ф.-м. н. Кролеву А.Н., КГПУ, к. ф.-м. н. Водичару Г.М., КГПУ за предоставление программ анализа временных рядов и полезные консультации.

Список литературы

1. Ковалевский В.С. Формирование режима подземных вод. В кн.: Основы гидрогеологии. Т.2. Гидрогеодинамика. Новосибирск: Наука. 1983. С.106-207.
2. 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.
3. Копылова Г.Н., Бормотов В.А. Эффекты сейсмичности в изменениях уровней воды глубоких скважин сейсмоактивных районов Дальнего Востока: методика диагностики и результаты // Закономерности строения и эволюции геосфер: Матер. VI междунар. междисциплин. научн. симпоз. Хабаровск: ИТИГ ДВО РАН. 2004. С.134-149.
4. Копылова Г.Н., Любушин А.А.(мл.), Малугин А.А. и др. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С.69-79.
5. Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. Статистический анализ отклика уровня подземных вод на вариации атмосферного давления // Физика Земли. 1993. № 12. С.74-80.
6. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир. 1968. 482 с.
7. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // ВИМ. 1994. № 118. P.8719-8721.