

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ В ЦЕЛЯХ МОНИТОРИНГА СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Болдина С.В., Копылова Г.Н.

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,  
boldina@emsd.ru, gala@emsd.ru*

**Аннотация.** В работе рассматриваются методические вопросы построения феноменологических моделей гидрогеодинамических процессов формирования различных типов вариаций уровня воды, зарегистрированных в скважинах Камчатки на стадиях подготовки и реализации сильных землетрясений.

**Ключевые слова:** *скважина, землетрясение, водовмещающая порода, моделирование*

**Abstract.** The methodical questions in the case of hydrogeodynamic processes simulations of water level variations due to strong earthquakes are considered in the paper by way of example wells on Kamchatka.

**Key words:** *well, earthquake, water-bearing rock, simulation*

**Введение.** В результате проведения многолетних уровнемерных наблюдений на скважинах Камчатки и в других сейсмоактивных регионах мира были зарегистрированы разнообразные вариации уровня воды в связи с сильными землетрясениями [2, 11]. По времени проявления по отношению к моментам землетрясений такие вариации уровня разделяются на гидрогеодинамические предвестники, ко- и постсейсмические эффекты. Типизация гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, учитывающая их морфологические особенности и факторы сейсмического воздействия на состояние системы скважина – водовмещающая порода приводится в [2].

В [1, 6] показано, что многообразие и особенности гидрогеосейсмических вариаций уровня воды можно объяснить на основе построения феноменологических моделей гидрогеодинамических процессов их формирования с привлечением комплекса данных о технических характеристиках скважин и локальных геолого-гидрогеологических условий. С использованием таких моделей может проводиться оценка информативности отдельных скважин для геофизического мониторинга современных геодинамических процессов. В [1, 3-6] приводятся примеры построения таких моделей и их использования для решения задач геофизического мониторинга. Основаниями для разработки таких моделей являются: 1 - выявленные типы гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в отдельных скважинах [2]; 2 - результаты барометрического и приливного анализа вариаций уровня воды и оценки величин барометрической эффективности и приливной чувствительности уровня воды; 3 - величины фильтрационных и упругих параметров водовмещающих пород; 4 - приложения теории пороупругости для статически изолированных систем «скважина – водовмещающая порода» [10]; 5 - результаты моделирования зарегистрированных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды [1, 3-4] с использованием различных математических моделей, в т. ч. модели инерционности водообмена между скважиной и водовмещающими породами [9]; модели отклик уровня воды в скважине на прохождение поверхностных сейсмических волн [7], модели удаленного точечного источника возмущения напора в водоносном горизонте [8] и др.

На рис. 1 на примере скв. ЮЗ-5 представлены основные этапы построения таких моделей и содержание каждого из этапов.

С использованием результатов анализа барометрического и приливного откликов уровней воды в скважинах оцениваются величины барометрической эффективности  $E_b$  (табл., рис. 1) и приливной чувствительности вариаций уровня воды по отношению к теоретической площадной  $A_s$  или объемной  $A_v$  деформации водовмещающих пород в районе скважин (табл.); принимается (или не принимается) гипотеза о статически изолированных условиях в системе скважина – водовмещающая порода с оценкой частотного диапазона проявления [1-6]; оцениваются упругие и фильтрационные

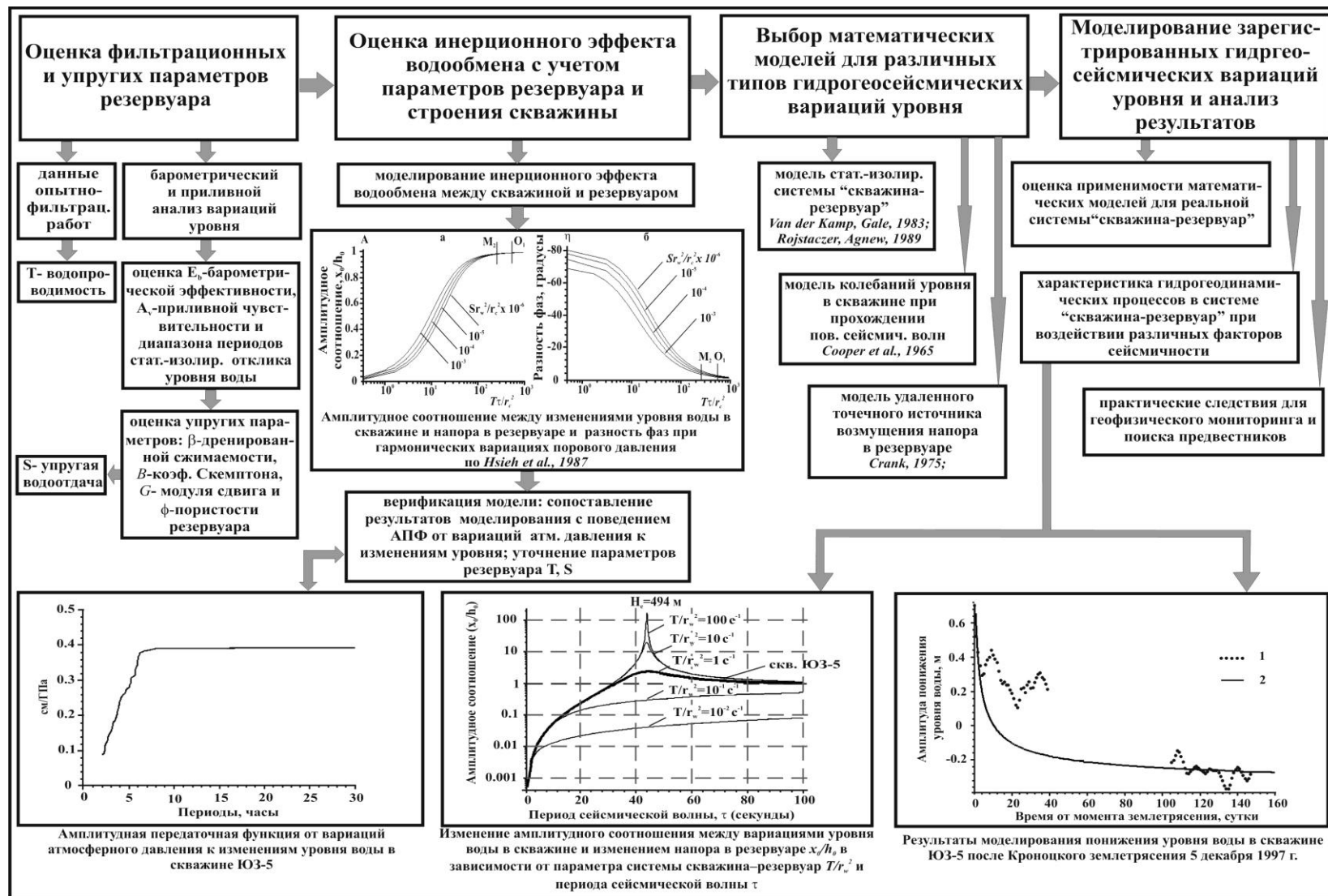


Рис.1 – Основные этапы построения модели гидрогеосейсмических вариаций уровня воды и оценки информативности скважины (на примере скважины ЮЗ-5).

Табл. - Упругие и фильтрационные параметры водовмещающих пород в районе скважин

| Скважина | Барометрическая эффективность $E_b$ , см/гПа | Приливная чувствительность $A_S/A_V$ , м/10 <sup>-7</sup> | Дренирующая сжимаемость скелета $\beta$ , Па <sup>-1</sup> ·10 <sup>-11</sup> | Модуль сдвига $G$ , Па·10 <sup>10</sup> | Коэффициент Скемптона $B$ | Удельная упругая емкость $S_S$ , м <sup>-1</sup> ·10 <sup>-7</sup> | Пористость $\phi$ | Величина водоотдачи, $S=S_Sd$ | Коэффициент водопроводимости $T$ , м <sup>2</sup> /с |
|----------|--|---|---|---|---------------------------|--|-------------------|-------------------------------|--|
| ЮЗ-5     | 0.39   | 0.096/0.161   | 15.2  | 0.39                                    | 0.67                      | 21.4   | 0.15              | 21.4·10 <sup>-5</sup>         | 9·10 <sup>-5</sup>                                   |
| 1303     | 0.43   | 0.143/-   | 7.4   | 0.81                                    | 0.64                      | 9.81   | 0.06              | 20·10 <sup>-5</sup>           | 0.4·10 <sup>-5</sup>                                 |
| 1309     | 0.45   | 0.108/-   | 10.2  | 0.72                                    | 0.61                      | 29.7   | 0.09              | 8·10 <sup>-5</sup>            | 13·10 <sup>-5</sup>                                  |
| E-1      | 0.01/0.10                                    | 0.02/0.03   | 7.59  | 0.79                                    | 0.07-0.17                 | 29.0   | 0.05              | 5.8·10 <sup>-5</sup>          | 6.3·10 <sup>-8</sup>                                 |

параметры водовмещающих пород с использованием данных опытно-фильтрационных работ (табл.) [1, 3-6].

В случае скв. ЮЗ-5 результаты моделирования реакции уровня воды на периодические изменения напора с учетом определенных упругих и фильтрационных параметров водовмещающих пород и строения скважин хорошо согласуются с изменением амплитудных передаточных функций от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды (рис. 1). Это показывает, что на периодах, соответствующих диапазону действия приливных и медленных сейсмотектонических деформаций водовмещающих пород, искажение отклика уровня воды в скважинах на изменения порового давления не ожидается. Это позволяет принять для скв. ЮЗ-5 условие *статически изолированной системы «скважина – водовмещающая порода»* [10] для оценки изменений объемной деформации водовмещающих пород  $D$  по амплитудам аномальных изменений уровня воды  $\Delta h = \Delta p / \rho g$ , где  $\Delta p$  - изменение порового давления,  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения, в диапазоне периодов вариаций уровня воды от минут-часов до первых десятков суток.

На примере скв. ЮЗ-5 и 1309 показана принципиальная возможность использования ряда теоретических моделей для моделирования и описания гидрогеодинамических процессов формирования наблюдаемых гидрогеосейсмических вариаций уровня воды [1, 4-5], в частности:

- модели статически изолированной системы «скважина – водовмещающая порода»:

$$D = -\Delta h / A_v, \quad (1)$$

где «+» - соответствует деформации растяжения, «-» - соответствует деформации сжатия.

- модели удаленного точечного источника возмущения напора в водоносном горизонте [8]:

$$x = x_0 - \Delta h \cdot \operatorname{erfc}(R / \sqrt{4ct}), \quad (2)$$

где  $x$  – уровень воды в скважине,  $x_0$  – начальный уровень воды в скважине,  $R$  – расстояние от скважины до точечного источника падения порового давления,  $c$  – пьезопроводность,  $t$  – длительность понижения уровня.

- модели колебаний уровня воды в скважине при прохождении поверхностных сейсмических волн [7]:

$$A = x_0 / h_0 = \left[ \left( 1 - \frac{\pi r_w^2}{T\tau} \operatorname{Kei}\alpha_w - \frac{4\pi^2 H_e}{\tau^2 g} \right)^2 + \left( \frac{\pi r_w^2}{T\tau} \operatorname{Ker}\alpha_w \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

где  $H_e$  - эффективная высота столба воды в скважине,  $\tau$  - период сейсмической волны,  $\alpha_w = r_w(\omega S/T)^{1/2}$  – безразмерная функция частоты, выраженная через параметры водовмещающих пород и геометрические параметры скважины:  $T$  - коэффициент водопроводимости,  $r_w$  - радиус скважины в области фильтра.

**Результаты.** По формуле (1) оценена величина деформации расширения водовмещающих пород в районе скв. ЮЗ-5 на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения (КЗ) (5.12.1997 г.,  $M=7.8$ )  $D = (68 \pm 4) \cdot 10^{-9}$  (рис. 1) [1] и величины объемной косейсмической

деформации для шести местных землетрясений ( $D = 75 - 1.6 \cdot 10^{-9}$ ), а также характер деформации водовмещающих пород по направлению изменения уровня воды [1, 5].

По результатам моделирования постсейсмического понижения уровня воды после КЗ в скв. ЮЗ-5 и понижения уровня в скв. 1309 после Олюторского землетрясения (ОЗ) (20.04.2006 г.,  $M=7.6$ ) оценены величины пьезопроводности водовмещающих пород ( $c = 0.42 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $1.62 \text{ м}^2/\text{с}$ ) и расстояния до источников падения напора ( $R = 450 \text{ м}$  и  $190 \text{ м}$ ) [1].

Результаты моделирования колебаний уровня воды в скв. ЮЗ-5 и 1309 по (3), вызванных Суматра – Андаманским землетрясением (САЗ) (26.12.2004 г.,  $M = 9$ ,  $R = 8250 \text{ км}$ ) и Симуширским землетрясением (СЗ) (15.11.2006 г.,  $M = 8.3$ ,  $R=1120 \text{ км}$ ), показывают, что такие колебания уровня в скв. ЮЗ-5 возникают при прохождении сейсмических волн с периодами  $\tau = 44.6 \text{ с}$  (рис. 1) и  $\tau = 33 \text{ с}$  - в скв. 1309 при величинах  $T/r_w^2 \geq 1 \text{ с}^{-1}$  [1, 4].

*Характеристика гидрогеодинамических процессов в системе «скважина - водовмещающая порода».* Гидрогеодинамический предвестник КЗ и косейсмические скачки уровня при сильных местных землетрясениях в скв. ЮЗ-5 объясняются неискаженной упругой реакцией порового давления на деформацию водовмещающих пород. Определены характер и величины объемной ко- и предсейсмической деформации водовмещающих пород по амплитудам аномального изменения уровня воды и величине его приливной чувствительности [1, 5].

Постсейсмическое понижение уровня воды в скв. ЮЗ-5 после КЗ и в скв. 1309 после ОЗ могло быть вызвано падением напора на некотором удалении от скважин вследствие локального улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях [1].

Колебания уровня воды в обеих скважинах при прохождении поверхностных сейсмических волн возникают, в основном, вследствие резонансного усиления вариаций порового давления в стволе скважины. Дополнительное влияние может оказывать временное улучшение фильтрационных свойств водовмещающих пород за счет нарушения структуры трещинно-порового пространства и резкого увеличения их проницаемости при прохождении сейсмических волн [1, 4].

*Анализ и интерпретация результатов наблюдений на скважине Е-1.* В скв. Е-1 ( $53.26^\circ \text{ с.ш.}$ ,  $158.48^\circ \text{ в.д.}$ , глубина 665 м, фильтр 625-645 м, уровень на глубине 28 м ниже поверхности земли) с середины 2006 по декабрь 2009 гг. наблюдалось уникальное явление: повышение уровня воды на 1 м 22 см с аномально высокой скоростью (рис. 2а). В [6] такое повышение рассматривается как реакция водовмещающих пород на развитие деформации объемного сжатия при подготовке и реализации роя землетрясений в районе влк. Корякский и его извержении (рис. 2б, в). Применение предложенного выше подхода для оценки величины деформации объемного сжатия водовмещающих пород вызвало необходимость его адаптации для условий, когда в изменениях уровня воды не проявляется реакция на земные приливы и поэтому невозможно определить величину его приливной чувствительности. Особенности скв. Е-1 также являются малая водопроницаемость водовмещающих пород ( $T = 0.005 \text{ м}^2/\text{сут}$ ) и замедленный характер водообмена между стволом скважины и водовмещающими породами, а также повышенная сжимаемость подземной воды из-за присутствия газа в ее составе.

Оценка упругих и фильтрационных параметров водовмещающих пород (табл.) проводилась на основе моделирования восстановления уровня после спуска датчика акустической эмиссии в ствол скважины. При этом оцененная величина сжимаемости воды оказалась на порядок больше, по сравнению с обычной водой, что указывает на некоторое содержание свободного газа в порово-трещинном пространстве водовмещающей породы. Величина деформометрической чувствительности уровня воды была получена по данным о синхронном проявлении гидрогеодинамического предвестника КЗ в скважинах Е-1 и ЮЗ-5. При этом принималось, что величины деформации водовмещающих пород в районах обеих скважин были примерно одинаковыми на стадии подготовки КЗ. Пористость

водовмещающих пород принималась по аналогии с водовмещающими породами, вскрытыми скв. 1303.

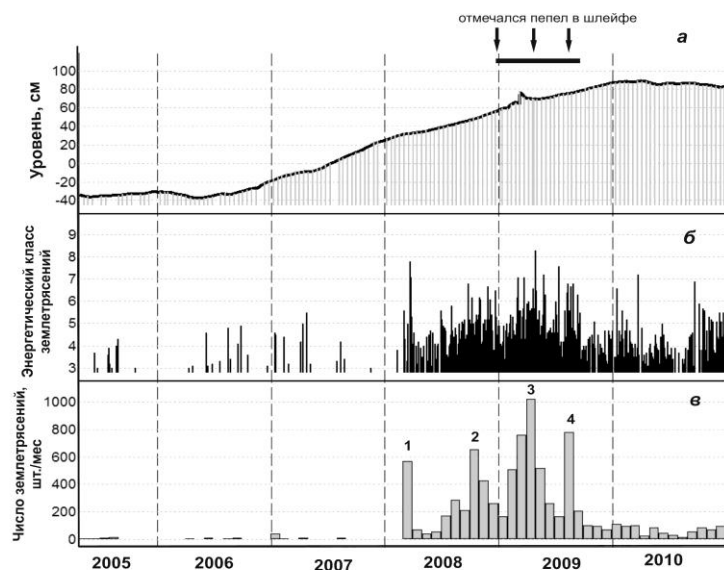


Рис. 2. Изменение уровня воды в скважине Е-1 в 2005 – 2010 гг. в сопоставлении с развитием сейсмичности и парогазовой активности влк. Корякский: а – изменения уровня воды; б – землетрясения с  $K_s=3.1-8.3$  в районе влк. Корякский; в – суммарное за месяц количество землетрясений (цифрами обозначены максимумы сейсмической активности: 1 – март 2008 г., 2 – октябрь 2008 г., 3 – апрель 2009 г., 4 – август 2009 г.).

С использованием оцененных параметров водовмещающих пород и параметров инерционности водообмена в системе скважина – водовмещающая порода величина деформации объемного сжатия в районе скв. Е-1 за время аномального повышения уровня воды составила  $\Delta\varepsilon = -(4.1 \cdot 10^{-6} - 1.5 \cdot 10^{-5})$  [6].

Представленная методология построения феноменологических моделей гидрогеодинамических процессов формирования гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в системе «скважина – водовмещающая порода» апробирована на примере камчатских скважин ЮЗ-5, 1309 и Е-1. Она также может использоваться для обработки и интерпретации данных уровнемерных наблюдений в других скважинах, расположенных в сейсмоактивных районах, для повышения их информативности при проведении геофизического мониторинга, оценки изменений напряженно-деформированного состояния среды и прогнозирования сильных землетрясений.

#### Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Механизмы отклика уровня воды в скважинах на сейсмические воздействия // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: в 2 томах. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 1. Петропавловск-Камчатский. 11-17 ноября 2007г. - Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. - С. 50-54.
2. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. - С. 52-64.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уровнемерных наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. - С. 52-64.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на Суматра-Андаманское землетрясение 26 декабря 2004 г.,  $M=9$  // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. - С. 39-48.
5. Копылова Г.Н., Стеблов Г.М., Болдина С.В., Сдельникова И.А. О возможности оценок косейсмической деформации по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли. 2010. №.1 - С. 51-61.
6. 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.
7. Cooper Н.Н., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennet R.R. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. - P. 3915-3926.
8. Crank J. The Mathematics of Diffusion. Oxford Sci., Oxford, U.K. 1975. - 421 p.
9. Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. - P. 1824-1832.
10. 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.
11. Roeloffs E. A. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. - P. 869-889.