

УДК 550.832.9:556.34.042

ОТКЛИК УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5 НА КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 26 ДЕКАБРЯ 2004 г., М=9

Г.Н. Копылова^{1,2}, С.В. Болдина²

¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, E-mail: gala@emsd.iks.ru

² Камчатский государственный университет, Петропавловск-Камчатский, 683032, E-mail: booldina@mail.iks.ru

Введение

Уровнемерные наблюдения в пьезометрических скважинах включают синхронную регистрацию изменений уровней воды и атмосферного давления и традиционно рассматриваются в качестве эффективного способа контроля напряженного состояния верхних горизонтов земной коры. Например, отклик уровней воды на земные приливы показывает, что уровнемерные наблюдения могут быть использованы для обнаружения небольших деформаций в земной коре порядка 10^{-8} - 10^{-9} .

Особый интерес к такому виду геофизических наблюдений в сейсмоактивных регионах вызван тем, что в изменениях уровней воды скважин обнаруживаются разнообразные вариации не только в результате произошедших землетрясений, но и гидрогеодинамические предвестники перед сильными землетрясениями [1-3]. Это указывает на необходимость углубленного изучения процессов в системе «скважина-резервуар» под влиянием сейсмичности.

Известно, что воздействие поверхностных сейсмических волн от сильных удаленных землетрясений может вызывать заметные вариации уровней воды в скважинах [1,6]. На рис. 1 приводится график изменения уровня воды в скважине Хейбаарт, Бельгия, в результате сильнейшего Аляскинского землетрясения 28.03.1964 г. с $M_w=8.8$ [7]. После этого землетрясения имелось много сообщений об изменениях уровней воды в скважинах на расстояниях до 11 тысяч километров от очага. Продолжительность вариаций уровней воды с амплитудами от первых сантиметров до 4.5 метров составляла от часов до одних суток [1].

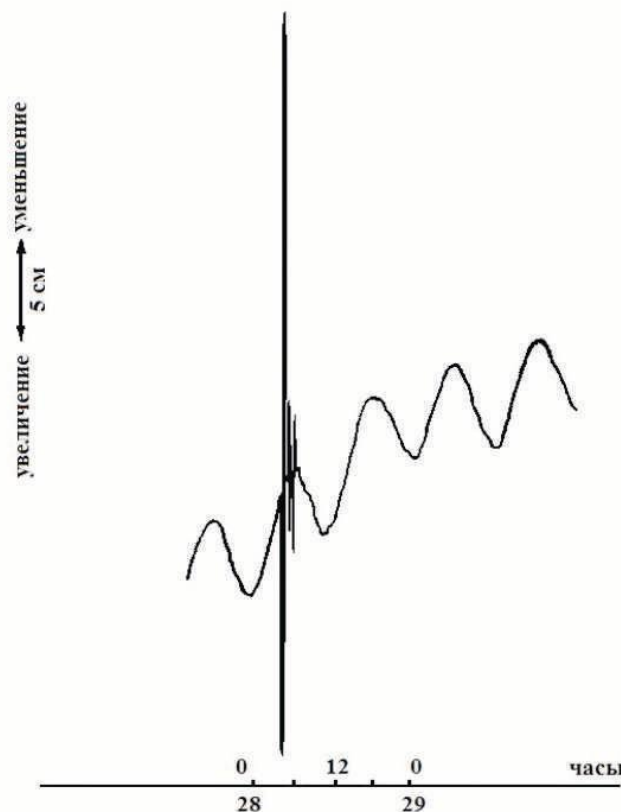


Рис. 1. Изменения уровня воды в скважине Хейбаарт, Бельгия, во время Аляскинского землетрясения 28.03.1964 г. Глубина скважины 1660 м, эпицентральное расстояние 10115 км [1]

Интересным фактом является то, что в близко расположенных скважинах отклики уровней воды на прохождение сейсмических волн могут существенно различаться по амплитуде. Изучение таких вариаций уровней воды имеет интерес для геофизиков, сейсмологов и гидрогеологов, во-первых, с позиции использования систем «скважина-резервуар» в качестве своеобразных приемников сейсмических сигналов, и, во-вторых, для оценки свойств резервуара, в первую очередь его водопроницаемости.

Отклик уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, на землетрясение 26.12.2004 г.

Наблюдение на скважине ЮЗ-5 (53.169° с.ш., 158.414° в.д., глубина 800 м) проводится Камчатским филиалом Геофизической службы РАН с использованием цифровой системы регистрации уровня воды и атмосферного давления «Кедр А2» (ООО «Полином», г. Хабаровск). Частота регистрации - 10 минут. Точность регистрации уровня воды составляет 0.1 см, атмосферного давления - 0.2 мбар (более подробно см. в [2-4]).

26 декабря 2004 года в 0 часов 58 минут в районе острова Суматра, Индонезия, произошло землетрясение с магнитудой $M_w=9$, которое вызвало катастрофическое цунами и огромные человеческие жертвы в странах Юго-Восточной Азии. Координаты эпицентра землетрясения 3.30° с.ш. и 95.78° в.д., глубина 10 км, эпицентральное расстояние до скв. ЮЗ-5 составляет 8250 км. Это землетрясение было зарегистрировано на сейсмостанции Петропавловск (53.024° с.ш., 158.653° в.д), расположенной на расстоянии около 20 км от скв.

ЮЗ-5. В работе использована запись этого землетрясения на канале LHZ (<http://www.iris.washington.edu/>).

Сейсмические волны регистрировались более 50 минут: с 1 часа 10 минут до примерно двух часов. Амплитуда вертикального смещения достигала 2 см (рис. 2).

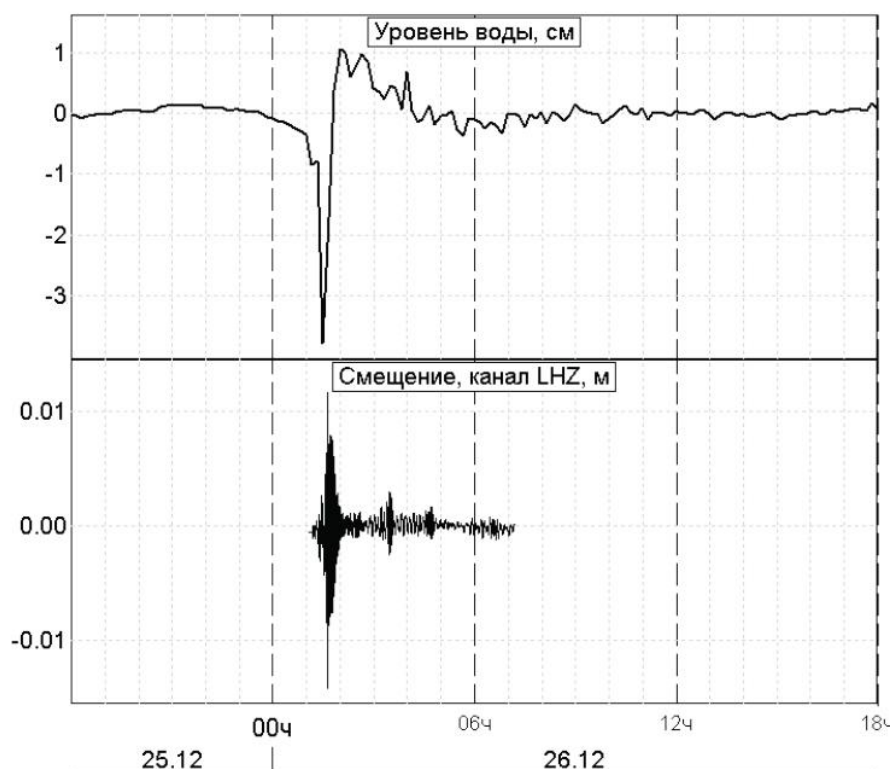


Рис. 2. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5 во время землетрясения 26.12.2004 г., $M_w=9$, о. Суматра, в сопоставлении с записью смещений на канале LHZ, с/ст. Петропавловск.

В спектре мощности смещений по каналу LHZ выделяются максимумы на периодах 17-20 с и примерно 45 секунд (рис. 3). Максимальная мощность смещений приходится на поверхностные волны с периодом около 45 секунд.

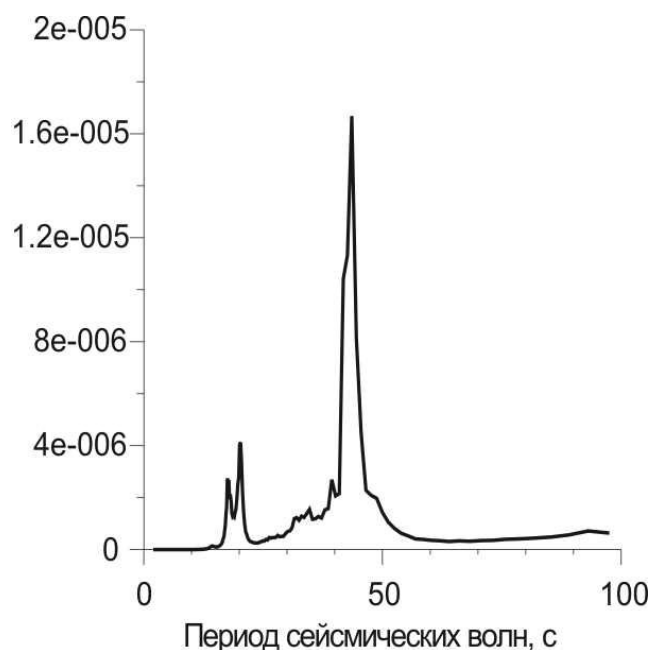


Рис. 3. Спектр мощности смещений по каналу LHZ, с/ст. Петропавловск.

На рис. 4. представлен динамический спектр мощности смещений по каналу LHZ, построенный в окне 10 минут с шагом 2 минуты. Длина записи составляет 365 минут и включает 5 минут до вступления P -волн и 360 минут после вступления P -волн.

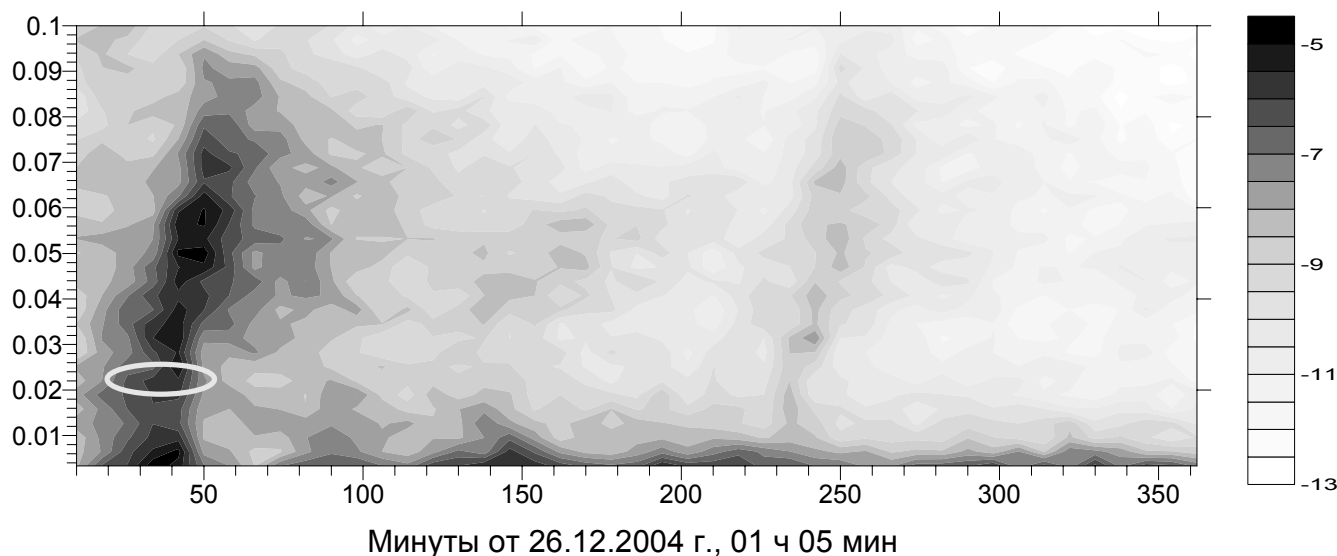


Рис. 4. Динамический спектр записи смещений по каналу LHZ, с/ст. Петропавловск, при землетрясении 26.12.2004 г. Пояснение см. в тексте.

Прохождение сейсмических волн от этого землетрясения вызвало заметные колебания уровня воды в скважине ЮЗ-5. Вступление P -волн (01 ч 10 м 09 с) и S -волн (01 ч 20 м 49 с) сопровождалось колебаниями уровня воды с амплитудой до 0.5 см. Вступление L -волн (01 ч 32 м 57 с) сопровождалось изменениями уровня воды с амплитудой не менее 5 см. Затем в течение примерно десяти часов наблюдались затухающие осцилляции уровня воды с амплитудами до 0.5 см (рис. 2). Отношение максимальной амплитуды изменений уровня воды в скважине к максимальному смещению поверхности земли во время прохождения L -волн составляет не менее 2.5. К сожалению, частота наблюдений 10 минут не позволяет более точно оценить максимальную амплитуду изменений уровня воды.

Моделирование эффекта сейсмического воздействия на поведение системы «скважина-резервуар» по модели [6]

Вариации уровня воды в скважине при прохождении сейсмических волн могут быть обусловлены изменениями порового давления в резервуаре и вертикальными смещениями поверхности земли (рис. 5). В работе [6] показано, что степень, с которой уровень воды в скважине реагирует на землетрясение, определяется не только характеристиками скважины и вскрытого резервуара, но и в значительной степени зависит от вида и периода сейсмической волны. В случае Релеевских волн, когда их период равен или больше резонансной частоты скважины ω_w , изменения уровня воды практически полностью определяются изменениями порового давления в резервуаре $p_0 = \rho g h_0$, где ρ - плотность воды, g - ускорение силы тяжести, h_0 - амплитуда изменения напора.

Резонансная частота ω_w зависит, в основном, от эффективной высоты столба воды в скважине $H_e = H + 3d/8$, где H - высота столба воды в обсаженном стволе скважины, d - высота столба воды в области вскрытого резервуара.

Для скважины ЮЗ-5 эффективная высота столба воды H_e составляет 494 м. Резонансная частота скважины определяется как $\omega_w \approx (g/H_e)^{1/2}$. Отсюда можно оценить периоды сейсмических волн, которые могут вызывать резонансные эффекты в изменениях уровня воды при гармонических вариациях порового давления в резервуаре: $\tau \geq 2\pi/\omega_w$. В случае скважины ЮЗ-5 резонансный эффект может возникать при прохождении волн с периодом не менее 44.6 секунд. На рис. 4 эллипсом показан частотный диапазон

сейсмических волн, способных вызывать резонансные эффекты в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 при землетрясении 26.12.04 г.

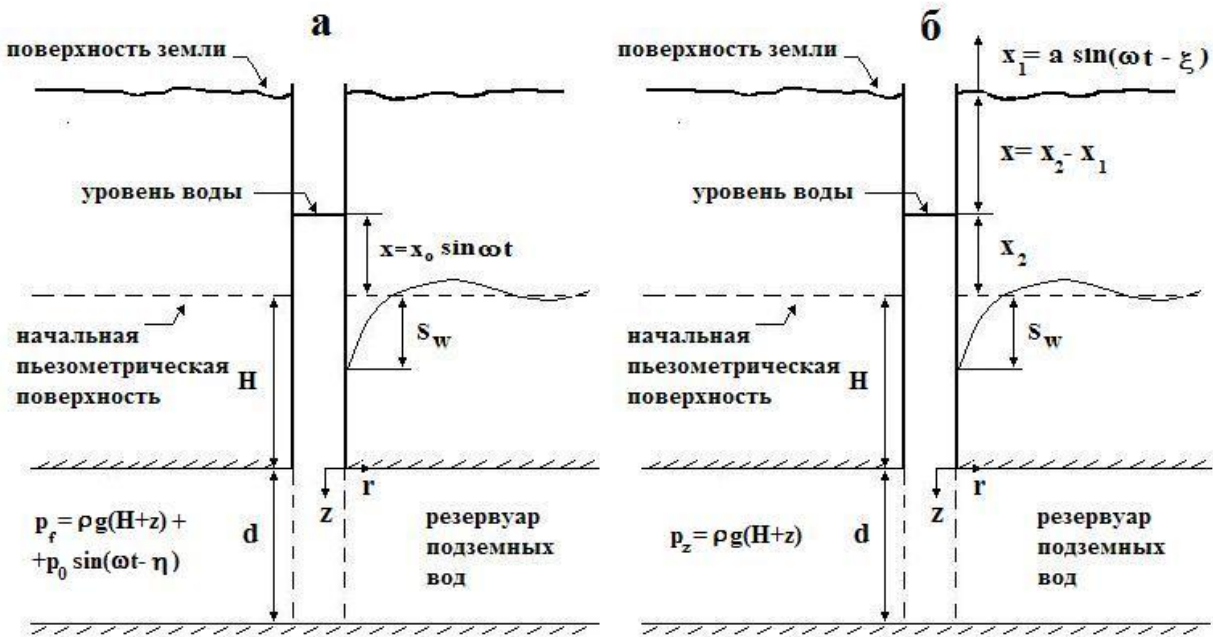


Рис. 5. Схемы формирования отклика уровня воды в скважине на гармонические вариации порового давления в резервуаре (а) и на вертикальные смещения системы «скважина-резервуар» (б) при прохождении сейсмических волн: H - высота водной колонны в обсаженном стволе скважины, d - мощность вскрытого резервуара подземных вод (длина открытого интервала ствола скважины), x , x_2 - смещение уровня воды в скважине, x_0 - амплитуда изменений уровня воды при гармонических вариациях порового давления $p_f = \rho g(H+z) + p_0 \sin(\omega t - \eta) = p_z + p_0 \sin(\omega t - \eta)$, x_1 - смещение системы «скважина - резервуар», a - амплитуда смещения поверхности земли, ω - угловая частота сейсмической волны, t - время, η , ξ - углы сдвига фаз, s_w - изменение напора в резервуаре, z - глубина ниже обсадки скважины, r - горизонтальное расстояние от центра скважины [6].

Усиление вариаций уровня воды по отношению к изменению напора в резервуаре для резонансных частот выражается по [6] как

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

где x_0 - амплитуда изменения уровня воды, h_0 - амплитуда изменения напора, $\alpha_w = r_w (\omega S_s / T)^{1/2}$ - безразмерная функция частоты, выраженная через параметры резервуара и геометрические параметры скважины: r_w - радиус скважины в области ее связи с резервуаром, S_s - удельная упругая емкость, T - коэффициент водопроницаемости резервуара ($T = kd$, где k - коэффициент фильтрации в законе Дарси), $\text{Ker}\alpha_w$, $\text{Kei}\alpha_w$ - действительная и мнимая части функции Кельвина нулевого порядка.

Усиление изменений уровня воды по отношению к вертикальному смещению поверхности земли a выражается как

$$A' = x_0/a = \frac{4\pi^2 H_e}{\tau^2 g} A. \quad (2)$$

В случае скважины ЮЗ-5 отношение усиления напора к усилению вертикального смещения поверхности земли, проявляющихся в изменениях уровня воды на резонансных частотах $\tau \geq 44.6$ с, практически равно единице ($A/A' \approx 1$). Принимая $A = A' \geq 2.5$, можно по (1) оценить водопроницаемость резервуара подземных вод, вскрытого скважиной ЮЗ-5. Для

этого рассчитывалась зависимость усиления вариаций уровня воды по отношению к изменению напора в резервуаре $A = x_0/h_0$ в зависимости от периода сейсмической волны τ . Принималось, что величина водопроницаемости резервуара может изменяться в диапазоне четырех порядков (рис. 6), а величина удельной упругой емкости S_S постоянна и с учетом сжимаемости воды и дренированной сжимаемости резервуара составляет $20 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ [4].

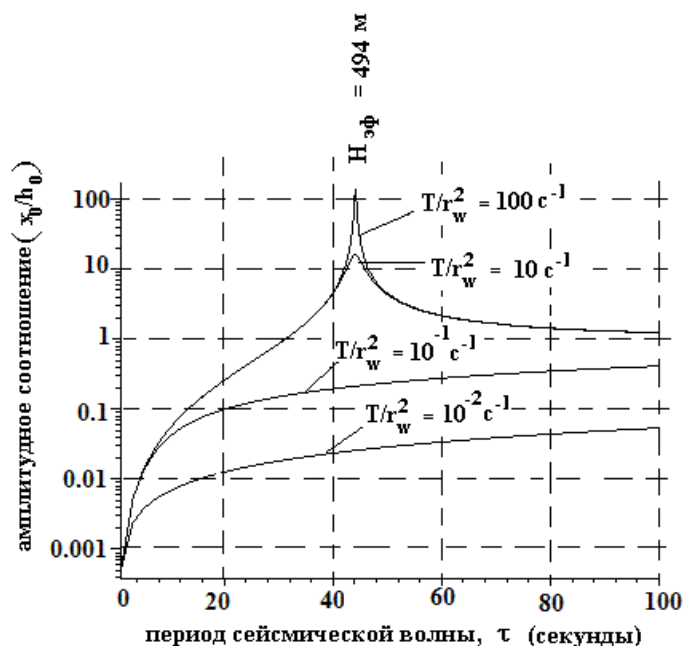


Рис. 6. Зависимость усиления изменений уровня воды по отношению к изменениям напора x_0/h_0 в зависимости от периода сейсмической волны τ .

Результаты моделирования показывают, что усиление вариаций уровня воды по отношению к изменению напора в резервуаре скважины ЮЗ-5 могло произойти при величине T/r_w^2 не менее 10 с^{-1} . Ранее на основе анализа приливного и барометрического откликов уровня воды в скважине ЮЗ-5 было получено, что наиболее вероятные значения величины T/r_w^2 составляют не более $3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ [4]. Оценка водопроницаемости резервуара по данным откачки из скважины также дает сопоставимую величину $T/r_w^2 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Таким образом, оценки величин водопроницаемости резервуара по приливному анализу и по эффекту прохождения сейсмических волн от землетрясения 26.12.04 г. различаются на три порядка. Различие в величинах водопроницаемости резервуара при относительно медленных вариациях порового давления, вызванных приливными, барометрическими и искусственными воздействиями, и при более быстрых изменениях порового давления при прохождении поверхностных сейсмических волн можно объяснить на основе предположения о резком увеличении проницаемости водовмещающих пород. Следует отметить, что подобные эффекты в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 не наблюдаются при возникновении местных землетрясений с магнитудами от 5 до 7.9 [2]. Это объясняется весьма слабой генерацией длиннопериодных поверхностных волн в очагах местных землетрясений на гипоцентральных расстояниях не более первых сотен километров.

На рис. 7 представлены результаты физического моделирования влияния сейсмической вибрации на проницаемость водонасыщенных образцов базальтов, габбро известняков [5]. В эксперименте регистрировалось обжимающее давление, моделирующее сейсмическую волну; поровое давление в образце и эффективное давление в скелете породы. Частота осцилляций составляла 0.065 Гц, длительность воздействия - 0.25-22 ч. Было обнаружено, что при величине давления обжима ниже порового давления после сейсмического воздействия проницаемость образцов резко возрастала в 1.2-3.7 раза в результате нарушения его структуры.

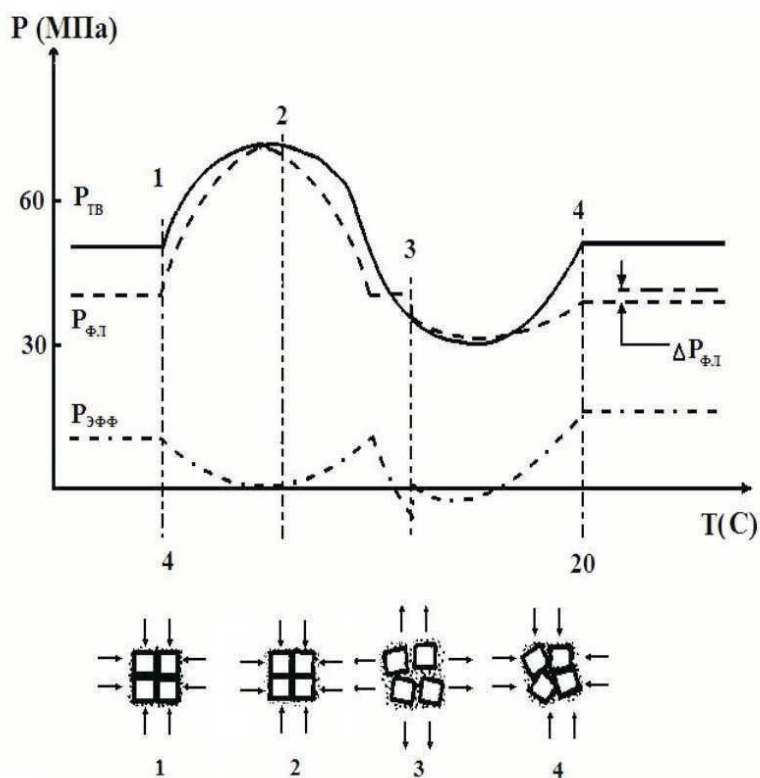


Рис. 7. Изменение обжимающего (P_{TB}), порового ($P_{фл}$) и эффективного ($P_{эфф}$) давлений при прохождении сейсмической волны через горную породу: 1 - исходное состояние системы вода-порода; 2 - фаза повышения обжимающего и порового давлений и сжатия образца; 3 - фаза падения давления обжима, разрушение образца под действием порового давления; 4 - фаза сжатия, механическая дилатансия образца; $\Delta P_{фл}$ - падение порового давления в результате нарушения структуры образца после сейсмической вибрации.

В фазе понижения давления обжима происходило запаздывание в падении порового давления. Это вызывало резкий рост эффективного давления в скелете породы с превышением его предела прочности. В результате происходил гидроразрыв и разрушение исходной структуры образца (рис. 7). Этот механизм может объяснить увеличение проницаемости водонасыщенных пород и, соответственно, значительный рост водопроводимости резервуара при прохождении сейсмических волн.

Выводы

1. В изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 обнаружен эффект прохождения сейсмических волн от землетрясения 26.12.2004 г. $M_w=9$, $R=8250$ км. Максимальная амплитуда вариаций уровня воды составляла не менее 5 см и наблюдалась во время вступления поверхностных сейсмических волн. Максимальные вариации уровня воды наблюдались во время прохождения сейсмических волн с характерным периодом 40-50 секунд. Усиление вариаций уровня воды по отношению к вертикальному смещению поверхности земли составляло не менее 2.5. Общая продолжительность вариаций уровня воды в результате землетрясения составляла около одиннадцати часов.

2. Моделирование эффекта сейсмического воздействия на поведение системы «скважина-резервуар» по модели Cooper et al., 1965, показало, что эффект усиления вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5 по отношению к изменениям порового давления в резервуаре может возникать при величине T/r_w^2 не менее 10 c^{-1} . Полученная оценка параметра резервуара превышает на три порядка аналогичную величину, полученную по приливному и барометрическому анализу и по данным откачки из скважины ($T/r_w^2=1-3 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$).

3. Предложена гипотеза, объясняющая резкое повышение водопроницаемости резервуара подземных вод при прохождении поверхностных сейсмических волн за счет увеличения проницаемости водовмещающих пород.

Авторы выражают благодарность сотрудникам КФ ГС РАН Д.В.Дроздину, Н.П.Козыревой и Е.А.Пантюхину за помощь в получении и в обработке сейсмической записи землетрясения 26.12.2004 г.

Список литературы

1. Каталог предвестников землетрясений. Гидрогеодинамические предвестники. Москва: ИФЗ РАН, 1983. 140 с.
2. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями (по данным наблюдений 1997-2004 гг.) // Настоящий сборник.
3. Копылова Г.Н., Любушин А.А. (мл.), Малугин В.А. и др. Гидродинамические наблюдения на Петропавловском полигоне, Камчатка // Вулканология и сейсмологи. 2000. № 4. С. 69-79.
4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод по данным уровнемерных наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 405-421.
5. Шмонов В.М., Витовтова В.М., Жариков А.В. Влияние сейсмической вибрации на проницаемость пород в связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов // Флюидная проницаемость пород земной коры. М.: Научный мир, 2002. С. 155-161.
6. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopulos I.S. et al. The response of well-aquifer system to seismic waves // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. P. 3915-3926.
7. Sterling A., Smets E. Study of earth tides, earthquakes and terrestrial spectroscopy by analysis of the level fluctuations in Borehole at Haibaart (Belgium) // Geophys. Journal Royal Astronom. Soc. 1971. V. 23. № 2. P. 225-242.