



УДК 550.832.9:556.34.042

Г. Н. Копылова, С. В. Болдина, Е. Г. Сизова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683 006;
e-mail: gala@emsd.ru*

Изменения уровня воды в скважине Е-1 в связи с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг.*

В пьезометрической скважине Е-1, Восточная Камчатка, расположенной на расстоянии 11 км от действующего вулкана Корякский, с середины 2006 по декабрь 2009 гг. происходило повышение уровня воды с аномально высокой скоростью. Такое повышение уровня рассматривается как реакция резервуара подземных вод в вулканогенно-осадочных отложениях Авачинской вулканотектонической депрессии на развитие деформации объёмного сжатия при подготовке и реализации роя слабых ($K_S \leq 8,3$) землетрясений в районе влк. Корякский и усиления его парогазовой деятельности. Продемонстрирована возможность локальной оценки величины объёмного сжатия по амплитуде повышения уровня воды с учётом упругих параметров резервуара.

Введение

Вулкан Корякский является одним из двух действующих вулканов Авачинско-Корякской группы, расположенной в пределах Авачинской вулканотектонической депрессии (рис.1). В 2008–2009 гг. вулкан Корякский проявлял повышенную активность в виде усиления сейсмичности и фумарольной паро-газовой деятельности [1, 8]. На рис. 1 мелкими кружками показаны эпицентры землетрясений с $K_S = 4,0-8,3$, произошедшие в марте 2008 – декабре 2009 гг. Гипоцентры располагались в диапазоне глубин от 38 км до поверхности земли, в т. ч. в постройке вулкана. Большая их часть была сосредоточена на глубинах 4–5 км и концентрировалась в пределах субмеридиональной зоны длиной 11 км и шириной 4–5 км.

Крупными кружками показаны пункты наблюдений за режимом подземных вод, в т. ч. пьезометрические скважины Е-1 и ЮЗ-5 Камчатского филиала Геофизической службы РАН и скважина 1303 ОАО «Камчатгеология», на которых проводится регистрация уровня воды, и три пункта наблюдений за химическим составом подземных вод КФ ГС РАН (рис. 1). Скважина Е-1 расположена на расстоянии 17 км от его вершины и в 9 км от его подножья. В работе рассматриваются вариации уровня воды в скв. Е-1, которые предшествовали и сопутствовали активизации влк. Корякский.

Характеристика скважины и данных уровнемерных наблюдений

Скв. Е-1 вскрывает в диапазоне глубин 625–647 м слабообводнённые туфы алнейской серии нео-

гена (рис. 2). По данным экспресс-налива водопроницаемость водовмещающих пород составляет $T = 0,005 \text{ м}^2/\text{сут}$. Состав подземной воды — хлоридно-гидрокарбонатный натриевый с минерализацией 1,5 г/л. В составе воды присутствует газ метаново-азотного состава.

С 1987 г. на скважине проводятся уровнемерные наблюдения с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений [3, 5]. Используемая в 2005–2010 гг. прецизионная цифровая аппаратура для измерений уровня воды и методика обработки данных обеспечивают возможность анализировать вариации уровня воды с амплитудами $\pm 0,1$ см.

Основной особенностью режима скважины являются проявления трендов повышения и понижения уровня воды продолжительностью 3–6 лет с амплитудами от первых десятков см до 1,5 м. На фоне трендов проявляются слабые барометрические вариации уровня и его изменения, связанные с наиболее сильными региональными землетрясениями [3, 5]. Величина барометрической эффективности вариаций уровня воды в диапазоне периодов сутки — десятки суток весьма мала (0,01 см/гПа). Для сравнения, аналогичные величины для скважин ЮЗ-5 и 1303 составляют 0,4 см/гПа. В изменениях уровня воды в скв. Е-1 не проявляются приливные вариации, а также годовые сезонные вариации.

Такие особенности гидродинамического режима скв. Е-1 связаны с тем, что она контролирует подземные воды зоны затруднённого водообмена, а также с тем, что состав порового флюида включает газовую фазу. Присутствие газа повышает сжимаемость флюида по сравнению с величиной сжимаемости обычных подземных вод без газа. Именно из-за повышенной сжимаемости флюида ослабляется баро-

* Печатается по материалам конференции, посвящённой Дню вулканолога 2010 г.

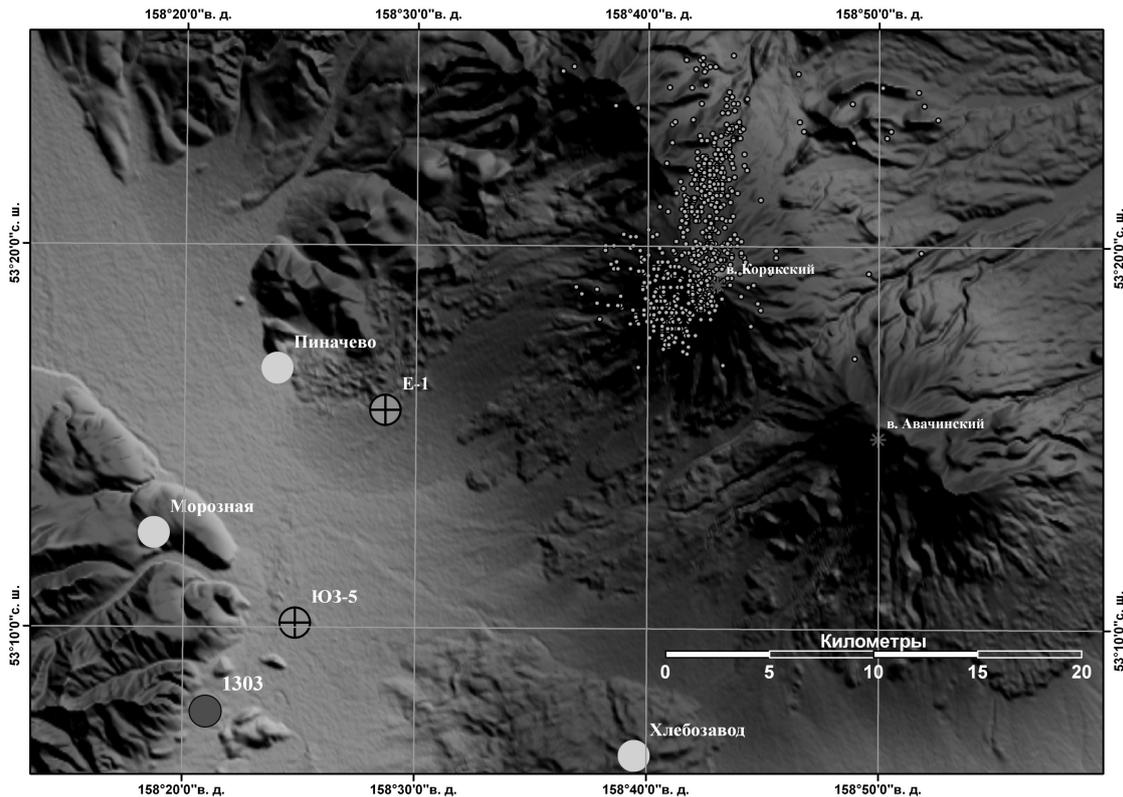


Рис. 1. Карта района Авачинской вулканно-тектонической депрессии и её обрамления. Пояснения см. в тексте.

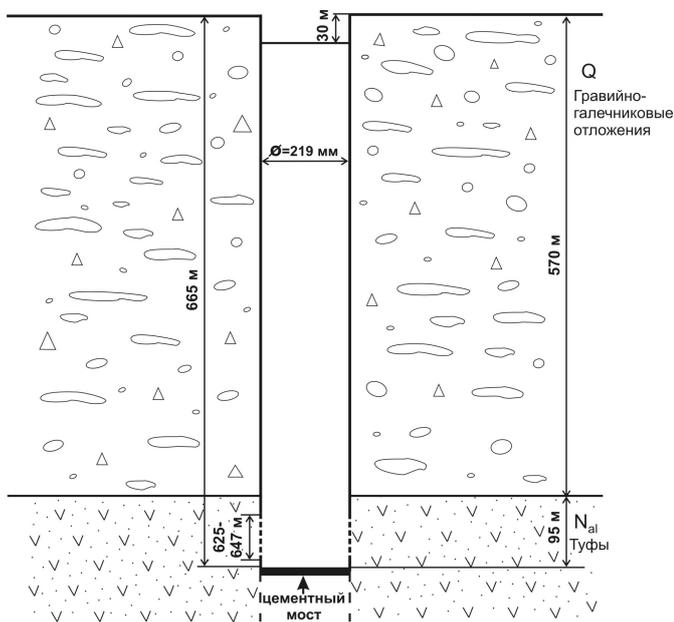


Рис. 2. Строение скважины Е-1

метрический отклик и не проявляются приливные вариации в изменениях уровня воды.

Уникальной особенностью гидродинамического режима скв. Е-1 является проявление гидродинамического предвестника в форме увеличения скорости понижения уровня воды в течение недель-

первых месяцев перед землетрясениями с $M \geq 5$ на расстояниях до 350 км [3, 5]. По данным наблюдений 1997–2007 гг. величина параметра связи предвестника и землетрясений составляет 0,7. Это означает, что предвестник проявляется перед 70% таких землетрясений [5]. Для событий с $M \geq 6,6$ величина параметра связи предвестников и землетрясений увеличивается до 0,86 [3]. Ретроспективная прогнозная эффективность предвестника [2] составляет 2–3 и показывает, что его использование может улучшить прогнозирование землетрясений в 2–3 раза, по сравнению со случайным угадыванием.

С середины 2006 г. развивался тренд повышения уровня воды в скв. Е-1 с аномально высокой скоростью, составляющей в среднем 0,1 см/сут (рис. 3). Такое повышение уровня показывало рост флюидного давления в резервуаре при возникновении источника деформации объёмного сжатия, который мог быть связан с подготовкой и развитием активизации влк. Корякского. Ниже рассматриваются вопросы оценки величины деформации объёмного сжатия в районе скважины, природы и местоположения источника такой деформации, а также влияния такого источника на проявление гидродинамического предвестника региональных землетрясений в изменениях уровня воды.

Оценка деформации объёмного сжатия в районе скважины Е-1

Суммарная амплитуда повышения уровня с мая 2006 по январь 2010 гг. составила $\Delta h = 122$ см. Для

Таблица 1. Величины пороупругих и фильтрационных параметров резервуаров подземных вод, вскрытых скважинами Е-1 и 1303.

Скважина/ открытый ствол d , м	Е-1/20	1303/200
Барометрическая эффективность E_b , см/гПа	0,01	0,43
Приливная чувствительность A_S/A_V , м/10 ⁻⁷	0,010/0,015	0,143/0,215
Дренированная сжимаемость скелета β , Па ⁻¹ · 10 ⁻¹¹	7,59	7,37
Модуль сдвига G , Па · 10 ¹⁰	0,79	0,81
Коэффициент Скемптона B	0,044 ÷ 0,17	0,64
Удельная упругая ёмкость S_S , м ⁻¹ · 10 ⁻⁷	29,0	9,81
Пористость φ	0,05	0,06
Величина водоотдачи, $S = S_S d$	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент водопроницаемости T , м ² /с	$6,3 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент фильтрации, $k = T/d$, м/с	$3,2 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
Пьезопроводность, $c = k/S_S$, м ² /с	0,11	0,25

оценки величины объёмного сжатия использовалась формула связи изменений флюидного давления Δp и объёмной деформации $\Delta \epsilon$ для статически изолированных условий, т. е. для таких условий, когда течением воды в резервуаре можно пренебречь: $\Delta p = -(2GB/3) [(1 + \nu_u)/(1 - 2\nu_u)] \Delta \epsilon$ [11]. Такая связь определяется упругими параметрами резервуара: коэффициентом Пуассона для недренированных условий ν_u , модулем сдвига G и коэффициентом Скемптона B . Полагая, что амплитуда повышения уровня воды Δh полностью определяется приращением давления в резервуаре, можно записать

$$\Delta \epsilon = -(\rho g \Delta h) / \left(\frac{2}{3} GB \frac{1 + \nu_u}{1 - 2\nu_u} \right), \quad (1)$$

где ρ — плотность флюида, g — ускорение свободного падения.

Определение упругих параметров резервуара G и B проводилось по формулам теории пороупругости для недренированных условий с учётом оценённых величин деформометрической чувствительности уровня по отношению к площадной деформации A_S и объёмной деформации A_V , а также сжимаемостей скелета породы β , твёрдой фазы скелета β_u

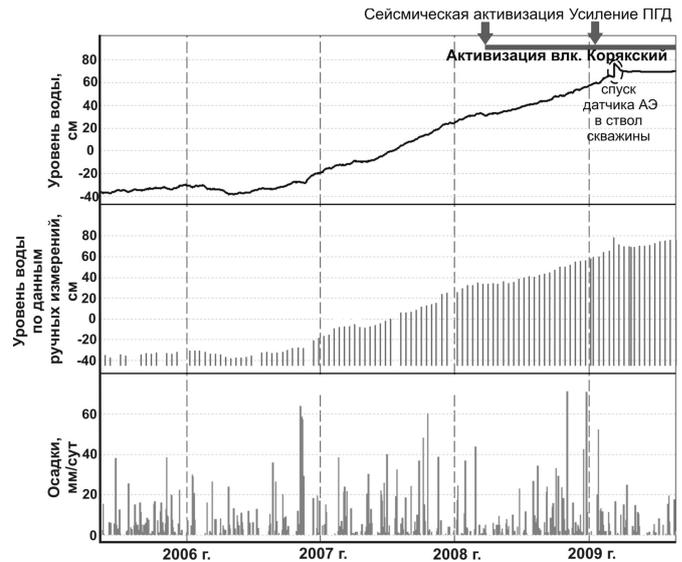


Рис. 3. Изменение уровня воды в скважине Е-1 в 2005 — августе 2009 гг. по данным цифровых и ручных измерений в сопоставлении с осадками (по данным метеостанции Пионерская) и активностью вулкана Корякский (по данным лаборатории исследования сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН). ПГД — паро-газовая деятельность, АЭ — акустическая эмиссия.

и флюида β_f [6, 12, 13]:

$$B = (\rho g A_S \beta) / [1 + \rho g A_S (\beta - \beta_u)],$$

$$B = (\beta - \beta_u) / [(\beta - \beta_u) + \varphi(\beta_f + \beta_u)],$$

$$B = \rho g \beta_u A_V,$$

$$G = 3/2[(1 - 2\nu)/\beta(1 + \nu)],$$

где φ — пористость, величина которой принималась равной 0,05 по аналогии с туфогенно-осадочными неогеновыми отложениями, вскрытыми скв. 1303; ν — коэффициент Пуассона для дренированных условий ($\nu = 0,25$), $\beta_u = 0,3 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹ (кварц) (табл. 1).

Обычно в качестве показателей деформометрической чувствительности уровня воды в пьезометрических скважинах используются величины его приливной чувствительности, определяемые по результатам приливного анализа вариаций уровня воды [4]. В изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1303 (рис. 1), вскрывающих пресные подземные воды, приливные вариации проявляются достаточно отчётливо. Для этих скважин оценены величины приливной чувствительности уровня воды и, соответственно, величины упругих параметров и пористости водовмещающих пород для статически изолированных условий [6] (табл. 1).

Уровень воды в скв. Е-1 не реагирует на приливы. Поэтому деформометрическая чувствительность A_V для этой скважины, необходимая для определения упругих параметров резервуара, оценивалась по данным о проявлении гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря

1997 г., $M_w = 7,8$ (КЗ) в изменениях уровня в скв. Е-1 и ЮЗ-5. Перед КЗ наблюдалось бухтообразное понижение уровня воды в обеих скважинах продолжительностью около трёх недель, синхронное с предсейсмическим перемещением GPS-станций Камчатской сети [4, 10]. Амплитуды понижения уровня воды Δh в скв. Е-1 и ЮЗ-5 составили 1 см и 11 см соответственно. В [4] полагалось, что такие понижения уровней были вызваны квазиупругой деформацией расширения водовмещающих пород при развитии преимущественно асейсмических движений, предшествующих КЗ. Кроме этого, полагалось, что величины предсейсмической деформации расширения были примерно одинаковыми в районах обеих скважин, расположенных на расстоянии около 11 км (рис. 1).

Величина деформометрической чувствительности уровня в скв. Е-1 получена из уравнения $\Delta h^{ЮЗ-5}/A_V^{ЮЗ-5} = \Delta h^{Е-1}/A_V^{Е-1}$, где $A_V^{ЮЗ-5} = 0,161 \text{ м}/10^{-7}$, и составила $A_V^{Е-1} = 0,015 \text{ м}/10^{-7}$. Соответственно величина $A_S^{Е-1}$ составила $0,010 \text{ м}/10^{-7}$ (табл. 1).

Величины сжимаемости флюида β_f и упругой водоотдачи резервуара S оценивались по результатам моделирования восстановления уровня воды после спуска датчика акустической эмиссии в ствол скважины 11 марта 2009 г. Спуск датчика сопровождался повышением уровня воды на 13 см с последующей его стабилизацией в течение 40–45 сут (рис. 3). Данные 10 минутных замеров во время стабилизации уровня воды сравнивались с эталонными кривыми понижения уровня при заданных величинах водопроводимости T и упругой водоотдачи S [9], полученными из решения уравнения нестационарной фильтрации для совершенной скважины по степени и характеру вскрытия напорного однородного, изотропного и неограниченного по протяжённости резервуара (рис. 4). При этом учитывалась величина водопроводимости $T = 0,005 \text{ м}^2/\text{сут}$, полученная по результатам обработки данных по понижению уровня воды при откачке.

Наиболее приемлемой величиной сжимаемости порового флюида при величинах водопроводимости $T = 0,005 \text{ м}^2/\text{сут}$ и $S = 5,8 \cdot 10^{-5}$ является $\beta_f = 4,4 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ (рис. 4). Эта величина на порядок больше, чем сжимаемость обычной воды, и указывает на небольшое содержание свободного газа в поровом пространстве. Величина сжимаемости скелета породы β получена из формулы $S = d[\rho g(\beta + \phi\beta_f)]$, где d — мощность резервуара (табл. 1).

С использованием (1) и оценённых упругих параметров резервуара (табл. 1) величина деформации объёмного сжатия в течение времени аномального повышения уровня воды составила в районе скв. Е-1 $\Delta \epsilon = -(4,1 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-5})$.

О природе источника деформации сжатия в районе скважины Е-1

Повышение уровня воды в скв. Е-1 и активизация сейсмичности в районе влк. Корякский рассматриваются нами как явления, имеющие парагенети-

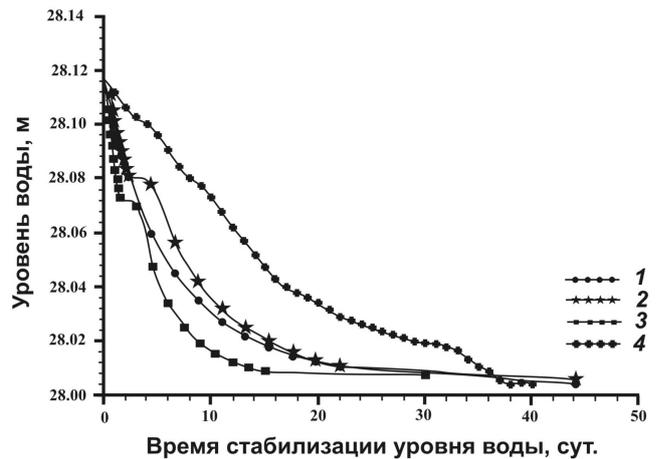


Рис. 4. Стабилизация уровня воды в скважине Е-1 после спуска в ствол датчика акустической эмиссии: 1 — расчётная стабилизация уровня при $T = 0,005 \text{ м}^2/\text{сут}$ и $S = 2 \cdot 10^{-5}$; 2 — расчётная стабилизация уровня при $T = 0,005 \text{ м}^2/\text{сут}$ и $S = 5,8 \cdot 10^{-5}$, $\beta_f = 4,4 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$; 3 — расчётная стабилизация уровня при $T = 0,008 \text{ м}^2/\text{сут}$ и $S = 4,4 \cdot 10^{-4}$; 4 — стабилизация уровня по данным цифровых измерений.

ческую связь. В [8] показано, что усиление сейсмичности началось в марте 2008 г. в северном секторе субмеридиональной зоны (рис. 1, 5). После относительного затихья эпицентры сместились в её юго-западный сектор. В период проявления фумарольной активности примерно с конца декабря 2008 г. и в течение первой половины 2009 г. сейсмичность развивалась в пределах всей субмеридиональной зоны. Землетрясение с максимальной величиной $K_S = 8,3$ произошло 30 апреля 2009 г.

Суммарная сейсмическая энергия, выделившаяся в течение сейсмической активизации с марта 2008 по декабрь 2009 г., составила $5,4 \cdot 10^8$ Дж, что соответствует величине энергетического класса $K_S = 8,7$ и величине магнитуды около 4. Если бы вся сейсмическая энергия выделилась одномоментно, то размеры области очага такого землетрясения по [7] составляют: длина — 2 км, ширина — 1 км, площадь 2 км^2 . Такие размеры очага на порядок меньше реальной области сейсмической активизации в районе влк. Корякский.

Имеются две гипотезы относительно причин активизации влк. Корякский. Первая гипотеза объясняет наблюдаемые явления внедрением магматического флюида в паро-газовый коллектор под вулканом [1]. При этом область сейсмической активизации соответствует расположению предполагаемого коллектора. Если принять эту гипотезу, то источником деформации сжатия в районе скважины является рост флюидного давления в коллекторе и его упругая передача в район скважины.

Вторая гипотеза связывает активизацию сейсмичности в районе влк. Корякский с геодина-

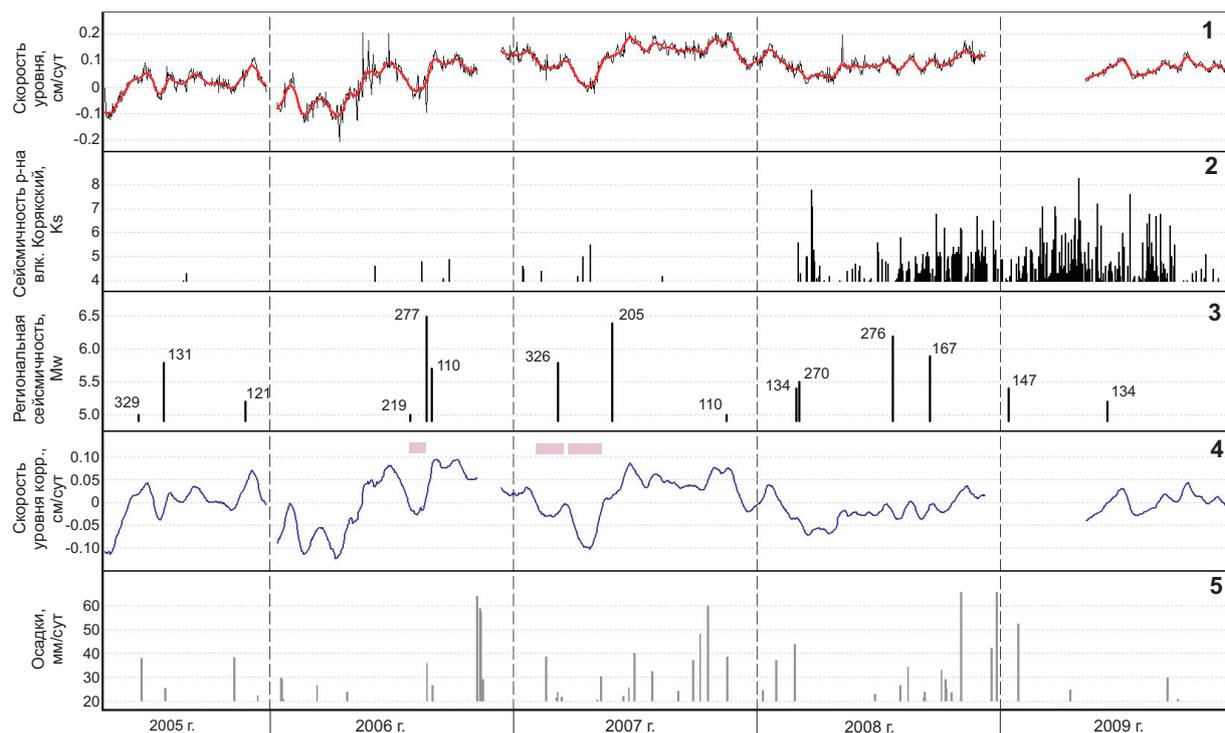


Рис. 5. Вариации уровня воды в скважине Е-1 в сопоставлении с развитием сейсмичности в районе вулкана Корякский, моментами сильных региональных землетрясений и осадками в 2005–2009 гг.: 1 — суточная скорость изменения уровня воды с компенсированными баровариациями (жирной линией показано средние среднесуточных данных в окне 15 сут); 2 — землетрясения в районе влк. Корякский с $K_S \geq 4,0$; 3 — моменты региональных землетрясений с $M_w \geq 5,0$ на расстоянии $R \leq 350$ км от скважины (цифрами обозначено эпицентрального расстояния до скв. Е-1, км); 4 — среднесуточная скорость изменения уровня воды, скорректированная за счёт средней скорости тренда в течение соответствующего фрагмента (жирными серыми линиями обозначены времена проявления гидрогеодинамического предвестника); 5 — суточные суммы осадков по данным метеостанции Пионерская.

мической обстановкой формирования раздвиговой зоны субмеридионального простираения [8]. Деструктивные процессы раздвигания в пределах этой зоны на некотором этапе затронули магмоподводящие пути под вулканом и сопровождалась усилением фумарольной деятельности. В этом случае, основным источником деформации являются тектонические процессы раздвигания, которые сопровождалась сжатием в районе скважины.

Мы отдаём предпочтение второй гипотезе, т. е. источником деформации были тектонические напряжения растяжения в пределах субмеридиональной зоны, которые развивались как до, так и во время сейсмической и фумарольной активизации в районе вулкана.

О проявлении гидрогеодинамического предвестника во время действия источника деформации объёмного сжатия в районе скважины Е-1

На рис. 5 представлен график суточной скорости изменения уровня в скв. Е-1 в сопоставлении с развитием сейсмичности в районе влк. Корякский, моментами сильных региональных землетрясений

и атмосферными осадками за период с мая 2005 по 2009 гг.

По техническим причинам график суточных скоростей изменений уровня состоит из четырёх фрагментов, для каждого из которых можно было корректно выполнить компенсацию баровариаций в изменениях уровня воды. Пунктирной линией показано значение скорости, равное 0 см/сут, поэтому величины, расположенные выше пунктирной линии, соответствуют повышению уровня, ниже линии — понижению уровня.

Устойчивое повышение уровня началось с 20 мая 2006 г. Эту дату можно рассматривать как начало действия источника деформации объёмного сжатия в районе скважины. Максимальные скорости повышения уровня (до 0,15 см/сут) наблюдались в течение июня — начала декабря 2007 г. и предшествовали началу сейсмической активизации в марте 2008 г. В течение сейсмической активизации и усиления паро-газовой деятельности влк. Корякский скорости повышения уровня были меньше и менялись незначительно.

При сравнении вариаций скорости изменения уровня с моментами региональных землетрясений

чёткое проявление гидрогеодинамического предвестника фиксировалось перед наиболее сильными землетрясениями с M_w порядка 6 и более в 2006 и первой половине 2007 гг. Со второй половины 2007 г. и в течение последующих 2,5 лет гидрогеодинамический предвестник не проявлялся. Это может указывать на снижение чувствительности скважины к процессам подготовки региональных землетрясений во время действия источника деформации объёмного сжатия.

С января 2010 г. наблюдалось закономерное уменьшение суточной скорости повышения уровня воды. В феврале 2010 г. длительное повышение уровня воды сменилось на его слабое понижение. Это может указывать на окончание действия источника объёмного сжатия в районе скважины, которое сопровождается стабилизацией её гидрогеодинамического режима.

Заключение

В течение времени с 20 мая 2006 г. по январь 2010 г. в резервуаре скважины Е-1 происходило постепенное повышение флюидного давления вследствие развития деформации объёмного сжатия водовмещающих пород. С учётом оценённых упругих параметров резервуара по амплитуде максимального повышения уровня выполнены оценки амплитуды повышения флюидного давления ($\Delta p = 12,2$ кПа или 0,12 бар) и величины деформации объёмного сжатия в районе скважины $\Delta \epsilon = -(4,1 \cdot 10^{-6} - 1,5 \cdot 10^{-5})$.

Источником деформации сжатия могут быть тектоно-магматические процессы формирования субмеридиональной зоны раздвигания земной коры в районе влк. Корякский в соответствии с гипотезой [8]. Альтернативным механизмом может быть рост флюидного давления в паро-газовом коллекторе под влк. Корякский [1]. Для более определённых выводов о природе источника было бы полезно иметь механизмы очагов наиболее сильных землетрясений, произошедших в районе влк. Корякский, а также выполнить моделирование развития тектоно-магматического процесса в районе вулкана с учётом данных уровневых наблюдений, динамики развития сейсмичности, тепловой и массовой разгрузки за счёт фумарольной деятельности.

На основе детального изучения скорости восходящего тренда в изменениях уровня воды обнаружено, что максимальный рост флюидного давления в резервуаре наблюдался с июня по декабрь 2007 г. и предшествовал началу сейсмической активизации в пределах субмеридиональной зоны. В период сейсмической активизации и усиления фумарольной деятельности рост флюидного давления продолжался с меньшей скоростью. С февраля 2010 г. рост флюидного давления в резервуаре прекратился, что может указывать на прекращение или значительное ослабление действия тектоно-магматического источника в районе влк. Корякский.

Вследствие действия тектоно-магматического источника объёмного сжатия и роста флюидного давления в резервуаре скв. Е-1 с середины 2007 по 2009 гг. (в течение 2,5 лет) наблюдалось понижение чувствительности системы «скважина — резервуар» к процессам подготовки сильных региональных землетрясений.

Список литературы

1. Гордеев Е. И., Дроздин В. А., Дубровская И. К., Муравьев Я. Д. Корякский вулкан: современное состояние и активизация 2008–2009 гг. // Вулканизм и геодинамика. Матер. IV Всеросс. симп. по вулканологии и палеовулканологии. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. С. 588–590.
2. 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.
3. 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.
4. Копылова Г. Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52–64.
5. Копылова Г. Н. Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровневых наблюдений на скважине Е1, Камчатка (по данным наблюдений 1996–2007 гг.) // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Тр. региональной научно-техн. конф. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 24–28.
6. Копылова Г. Н., Болдина С. В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уровневых наблюдений на скважине ЮЗ-5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 2. С. 52–64.
7. Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
8. Селиверстов Н. И. Активизация вулкана Корякский на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 7–9.
9. Синдаловский Л. Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2006. 769 с.
10. 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.
11. Roeloffs E. A. Hydrologic precursors to earthquakes: A review. // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177–209.
12. 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.
13. Van der Kamp G., Gale L. E. Theory of Earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains // Water Resour. Res. 1983. V. 19. P. 538–544.