

УДК 550.832.9:556.34.042

О СВЯЗИ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ Е-1, КАМЧАТКА, С АКТИВИЗАЦИЕЙ ВУЛКАНА КОРЯКСКИЙ В 2008–2009 гг. И СИЛЬНЫМИ ($M \geq 5$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

© 2012 г. Г. Н. Копылова, С. В. Болдина

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН
683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9,
e-mail: gala@emsd.ru*

Поступила в редакцию 25.01.2012 г.

Рассматриваются изменения уровня воды в скважине Е-1 за период времени с мая 2006 по 2010 гг. С середины 2006 по декабрь 2009 гг. в скважине развивался тренд повышения уровня с аномально высокой скоростью. Такое повышение уровня рассматривается как реакция резервуара газонасыщенных подземных вод в вулканогенно-осадочных отложениях Авачинской вулканотектонической депрессии на развитие деформации объемного сжатия при подготовке и реализации роя слабых землетрясений ($K_{S_{\max}} = 8.3$) в районе вулкана Корякский и его фреатического извержения. По величине амплитуды повышения уровня воды с учетом упругих параметров водовмещающих пород оценена величина объемного сжатия $\Delta \epsilon = -(4.1 \times 10^{-6} - 1.5 \times 10^{-5})$. Во время действия источника деформации наблюдалось понижение чувствительности гидродинамического режима скважины к процессами подготовки сильных ($M \geq 5.0$) тектонических землетрясений.

ВВЕДЕНИЕ

При проведении мониторинга действующих вулканов с целью прогноза их извержений используются сейсмологические, геодезические и комплекс дистанционных методов. В отдельных случаях информативными для прогноза извержений являются наблюдения за химическим составом, температурой и тепловой мощностью фумарол. Данные уровнемерных и других видов гидрогеологических наблюдений используются значительно реже вследствие удаленности наблюдательных скважин и источников от вулканов и слабой изученности влияния вулканотектонических процессов на гидродинамический и гидрогеохимический режим подземных вод на стадиях подготовки извержений.

Уровнемерные наблюдения в пьезометрических скважинах рассматриваются в качестве эффективного метода диагностики сигналов современной геодинамической активности, в частности, гидрогеодинамических предвестников сильных землетрясений. Сигналы сеймотектонической деформации в изменениях уровня воды могут полностью подавляться или могут проявляться в искаженном виде вследствие инерционности водообмена между подземными водами в водовмещающих породах и в стволе скважины [Болдина, Копылова, 2006; Hsieh et al., 1987; Rojstaczer, 1988], а также из-за возможного воздействия гидрогеодинамических факторов, связанных с изменением количества подземной

воды и граничных условий в области влияния скважины.

Диапазон периодов проявления эффекта инерционности водообмена в различных скважинах может изменяться от минут–часов до суток и определяется степенью изоляции контролируемого резервуара, фильтрационными и упругими параметрами водовмещающих пород, а также совершенством связи между водовмещающими породами и стволом скважины. Если влияние гидрогеодинамических факторов на изменения уровня воды в наблюдательной скважине отсутствует, то при развитии сеймотектонической деформации на периодах, составляющих не менее суток–десятков суток, эффектом инерционности водообмена можно пренебречь и полагать, что вариации уровня прямо связаны с изменениями давления подземных вод вследствие деформации водовмещающих пород. В таком случае возможно получение количественных оценок сеймотектонической деформации по выделенным амплитудам аномальных вариаций уровня воды с учетом деформометрических свойств наблюдательной скважины. Деформометрические свойства отдельной скважины определяются наличием в ней статически изолированного отклика уровня воды на барометрические, приливные и сеймотектонические воздействия, диапазоном периодов его проявления, а также величиной деформометрической чувствительности уровня воды [Копылова, 2006, 2009].

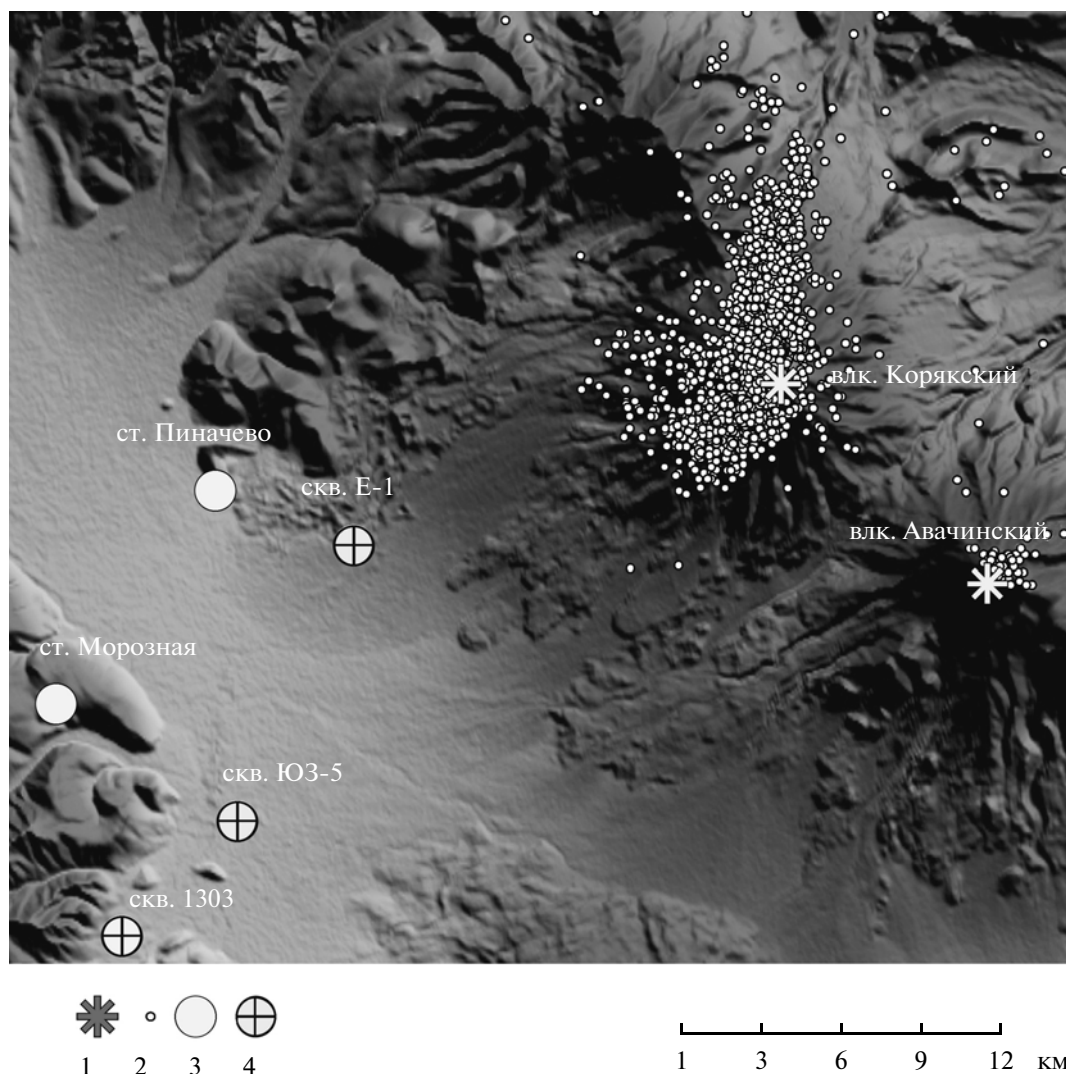


Рис. 1. Карта района Авачинской вулканотектонической депрессии и ее обрамления.

1 – действующие вулканы; 2 – эпицентры роя землетрясений в районе вулкана Корякский 2008–2010 гг., $K_S = 3.1–8.3$; 3 – пункты наблюдений за химическим составом подземных вод; 4 – наблюдательные пьезометрические скважины.

Для мониторинга современных сейсмотектонических процессов наиболее предпочтительны глубокие скважины, вскрывающие изолированные плотные водовмещающие породы на глубинах не менее 200 м [Копылова и др., 2007]. Такие скважины также характеризуются относительно слабыми сезонными вариациями уровня воды или их отсутствием. К таким объектам относится скважина Е-1, Восточная Камчатка, расположенная на расстоянии 17 км от вершины действующего вулкана Корякский (рис. 1).

В скв. Е-1 с середины 2006 по декабрь 2009 гг. регистрировался восходящий тренд повышения уровня воды с аномально высокой скоростью. Повышение уровня началось за 1.9 года до начала роя землетрясений ($K_{S_{\max}} = 8.3$) в пределах субме-

ридиональной зоны, включающей постройку вулкана Корякский (см. рис. 1), и за 2.5 года до усиления его фумарольной активности. Повышение уровня воды закончилось примерно одновременно с окончанием роя землетрясений и фумарольной активизации вулкана. Продолжительность аномального изменения уровня воды составила около 3.5 лет, амплитуда повышения уровня воды – 1.22 м.

Ранее по данным многолетних наблюдений (с 1987 г. по настоящее время) была установлена чувствительность гидродинамического режима скв. Е-1 к процессам подготовки тектонических землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$, возникающих в процессе поддвига Тихоокеанской океанической плиты под Охотоморскую плиту континентального типа [Копылова, 2001, 2008]. Пони-

жения уровня воды с повышенной скоростью в течение недели — первых месяцев регистрировались примерно перед 70% таких землетрясений на гипоцентральных расстояниях $R \leq 350$ км от скважины. Во время интенсивного повышения уровня воды в 2006–2009 гг. наблюдалось ослабление чувствительности скважины к процессам подготовки тектонических землетрясений. С 2010 г., т.е. после окончания повышения уровня воды, чувствительность скважины Е-1 к процессам подготовки землетрясений с $M \geq 5.0$ восстановилась.

В работе рассматриваются особенности гидродинамического режима скважины Е-1 в 2005–2010 гг. в сопоставлении с развитием роя землетрясений в районе вулкана Корякский и его фумарольной активностью, а также с субдукционными тектоническими землетрясениями с $M \geq 5.0$. По амплитуде суммарного повышения уровня воды и с учетом оцененных упругих параметров водовмещающих пород оценена величина деформации объемного сжатия в районе скв. Е-1 в период, предшествующий и сопутствующий сейсмической и фумарольной активизации вулкана Корякский. Рассматриваются возможные механизмы формирования источника деформации объемного сжатия в районе скважины.

Используемые данные о сейсмической и фумарольной активности в районе вулкана Корякский получены лабораторией исследования сейсмической и вулканической активности Камчатского филиала Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН).

Характеристика района и активизация вулкана Корякский

Вулкан Корякский (координаты вершины 53.32° с. ш., 158.72° в. д., высота 3456 м) является одним из двух действующих вулканов Авачинско-Корякской группы, расположенной в пределах Авачинской вулканотектонической депрессии (см. рис. 1). В 2008–2009 гг. вулкан Корякский проявлял повышенную активность в виде усиления сейсмичности и фумарольной паро-газовой деятельности [Гордеев и др., 2009; Селиверстов, 2009; Сениуков, Нуждина, 2010].

На рис. 1 показаны эпицентры землетрясений с $K_s = 3.1$ – 8.3 , произошедшие в марте 2008–декабре 2009 гг. и зарегистрированные сейсмическими станциями КФ ГС РАН. Гипоцентры землетрясений располагались в диапазоне глубин от 20 км до поверхности земли, в т.ч. в застройке вулкана [Сениуков, Нуждина, 2010]. Большая их часть была сосредоточена на глубинах 5–9 км и концентрировалась в пределах субмеридиональной зоны длиной 11 км и шириной 4–5 км. Максимумы сейсмической активности наблюдались в марте и октябре 2008 г. и в апреле и августе 2009 г. В

эти месяцы происходило 600–1000 событий с $K_s = 3.1$ – 8.3 при средних месячных суммах таких землетрясений от 0 до 130 шт. Выделившаяся сейсмическая энергия землетрясений в пределах субмеридиональной зоны (см. рис. 1) за период с марта 2008 по декабрь 2009 гг. составляла 5.4×10^8 Дж.

Повышенная фумарольная активность вулкана Корякский по данным КФ ГС РАН и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН наблюдалась в течение времени с ноября 2008 г. по август 2009 г. и периодически сопровождалась мощными паро-газовыми шлейфами (рис. 2а–2в). В отдельные дни в паро-газовых выбросах и шлейфах присутствовал резургентный пепел. По данным тепловизионных наблюдений [Гордеев, Дрознин, 2010; Дрознин, Дубровская, 2010] в течение 250 сут (с конца декабря 2008 по конец августа 2009 гг.) максимальная температура паро-газовых выбросов составляла 430°C , средний расход перегретого пара — 35 кг/с. За время извержения масса поступившего на поверхность водяного пара составила 10^6 т, суммарная энергия парогазовой разгрузки — 3×10^9 Дж.

На рис. 1 показаны пункты наблюдений за режимом подземных вод, в т.ч. пьезометрические скважины Е-1 и ЮЗ-5 КФ ГС РАН и скв. 1303 ОАО “Камчатгеология”, на которых проводится регистрация уровня воды и атмосферного давления с периодичностью 10 мин. Характеристика скважин приводится в табл. 1. На рис. 1 также показано расположение двух пунктов наблюдений КФ ГС РАН за химическим составом подземных вод. Аномальные изменения параметров режима подземных вод в наблюдательных скважинах и источниках в связи с активизацией вулкана Корякский, за исключением скв. Е-1, не были зарегистрированы.

Характеристика скважины Е-1 и данных уровнемерных наблюдений

Скв. Е-1 расположена на расстоянии 17 км от вершины вулкана Корякский и в 9 км от его подножия. Она вскрывает в диапазоне глубин 625–647 м слабообводненные туфы алнейской серии неогена (см. табл. 1; рис. 3). По данным экспресс-налива в скважину в 1991 г. водопроницаемость водовмещающих пород составляет $T = 0.005$ м²/сут.

По данным опробования интервала 625–647 м в процессе бурения скважины в 1984 г. химический состав подземной воды — хлоридно-карбонатный натриево-кальциевый и соответствовал формуле $M_{2.5}(\text{CO}_3^{2-}78\text{Cl}^-22)/(\text{Ca}^{2+}56\text{Na}^{+}40)$, где M — минерализация воды в г/л; концентрации анионов и катионов представлены в %-эквивалентах, $\text{pH} = 12.4$. Химический анализ выполнен в Центральной химической лаборатории Института вулканологии ДВО РАН.



а



б



в



г



д

Рис. 2. Изменение парогазовой активности вулкана Коржакский в 2009–2011 гг.: а – 10 января 2009 г., интенсивная парогазовая деятельность, фото Д.В. Мельникова; б – 9 апреля 2009 г., интенсивная парогазовая деятельность с присутствием пепла, фото С.В. Ушакова; в – 27 августа 2009 г., интенсивная парогазовая деятельность с присутствием пепла, фото О.А. Гириной; г – 19 октября 2009 г., парогазовая деятельность, фото С.В. Ушакова; д – 30 января 2011 г., спокойное состояние, фото А.А. Нуждаева.

Таблица 1. Характеристика наблюдательных скважин

Скважина, абс. отм., м	Координаты, градусы		Глубина скважины/уровень, м	Радиус ствола в области колебаний уровня r_c /радиус в области связи с резервуаром r_w , м	Диапазон глубин вскрытия резервуара/длина открытой части ствола, d , м	Технические условия связи скважины и резервуара	Водовмещающие породы, возраст, состав	Поровый флюид	Водопроницаемость T , м ² /сут
	с.ш.	в.д.							
Е-1, 180	53.26	158.48	665/28	0.109/0.109	625–647/22	дырчатый фильтр	N, туфы	вода + газ N ₂ –CH ₄	0.005
ЮЗ-5, 70	53.17	158.41	800/1.5	0.122/0.084	310–800/490	открытый ствол	K ₂ , алевролиты, аргиллиты	вода	7.8
1303, 31	53.08	158.21	800/25	0.122/0.046	517–717/200	открытый ствол	N, туфопесчаники, туфобрекчии, туфоалевролиты	вода	0.32

По результатам анализа водных проб, отобранных в 1998–2011 гг. в верхней части водной колонны в стволе скважины, химический состав воды – карбонатно-хлоридный натриевый и соответствовал формуле:

$$M_{1.0-1.5} \left[Cl^{-} 65-40(CO_3^{2-} + HCO_3^{-}) 45-33 \right. \\ \left. SO_4^{2-} 6-1 \right] / (Na^{+} 91-78 Ca^{2+} 11-1 K^{+} 7-8), \\ pH \ 11.5-12.1.$$

Химические анализы воды выполнены в лаборатории гидросейсмологии КФ ГС РАН.

В области распространения туфов алнейской серии на глубинах 570–1060 м химический состав растворенного в воде газа определялся в процессе бурения в интервале 910–920 м: N₂ – 60 об. %, CH₄ – 29 об. %, O₂ – 10 об. %, Ar – 0.6 об. %, CO₂ – 0.3 об. %, H₂ – 0.2 об. %, тяжелые углеводороды (от C₂H₄ до C₆H₁₄) – 0.02 об. %, He – 0.006 об. % (данные Центральной химической лаборатории Института вулканологии ДВО РАН). Для полученного состава растворенного газа характерны избыточные концентрации метана и других углеводородных газов, по сравнению с растворенным в воде газом, находящемся в равновесии с атмосферным воздухом. Это свидетельствует о том, что в районе скв. Е-1 в алнейских вулканитах происходит генерация или транспортировка газа углеводородно-азотного состава. В работе [Поздеев, 2003] продемонстрировано с использованием данных по газовому составу глубоких скважин, в т. ч. скважин Е-1 и ГК-1П, станция Пиначево (см. рис. 1), что в недрах Авачинской вулканотектонической депрессии концентрируются углеводородсодержащие газы от раннемелового до плейстоценового возраста в пределах одних площадей и скважин. Это свидетельствует о достаточной закрытости локальных гидрогеологических структур в недрах Авачин-

ской депрессии и возможности вертикальной миграции газа.

С 1987 г. на скважине проводятся уровнемерные наблюдения с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений [Копылова, 2001]. В 2002 г. на скважине установлена цифровая аппаратура Кедр А2 (ООО “Полином”, г. Хабаровск), оборудованная ультразвуковым датчиком уровня воды (чувствительность ±0.01 см) и датчиком атмосферного давления (чувствительность ±0.2 гПа). Синхронное измерение уровня воды и атмосферного давления осуществляются с периодичностью 10 мин. Используемая система наблюдений и методика обработки данных обеспечивают возможность анализировать вариации уровня воды с амплитудами ≥0.01 см на суточных периодах [Копылова, 2001, 2008].

Характерной особенностью естественного гидродинамического режима скважины являются плавные повышения и понижения уровня воды продолжительность 3–6 лет с амплитудами от первых десятков см до 1.5 м и со средними скоростями менее 0.1 см/сут. На фоне таких трендов проявляются слабые барометрические вариации уровня и его изменения, связанные с сильными тектоническими землетрясениями.

В изменениях уровня воды в скв. Е-1, в отличие от других наблюдательных скважин (см. рис. 1, табл. 1), не проявляются приливные вариации, а также годовые сезонные вариации. Такие особенности гидродинамического режима скважины связаны с тем, что она контролирует подземные воды гидродинамической зоны затрудненного водообмена, а также с тем, что в составе подземной воды в водовмещающих породах и в стволе скважины содержится газ метаново-азотного состава. На это указывают результаты химического анализа растворенного газа, отобранного в интервале 910–920 м (см. выше), и наличие газовых пузырьков, скапливающихся на стенках

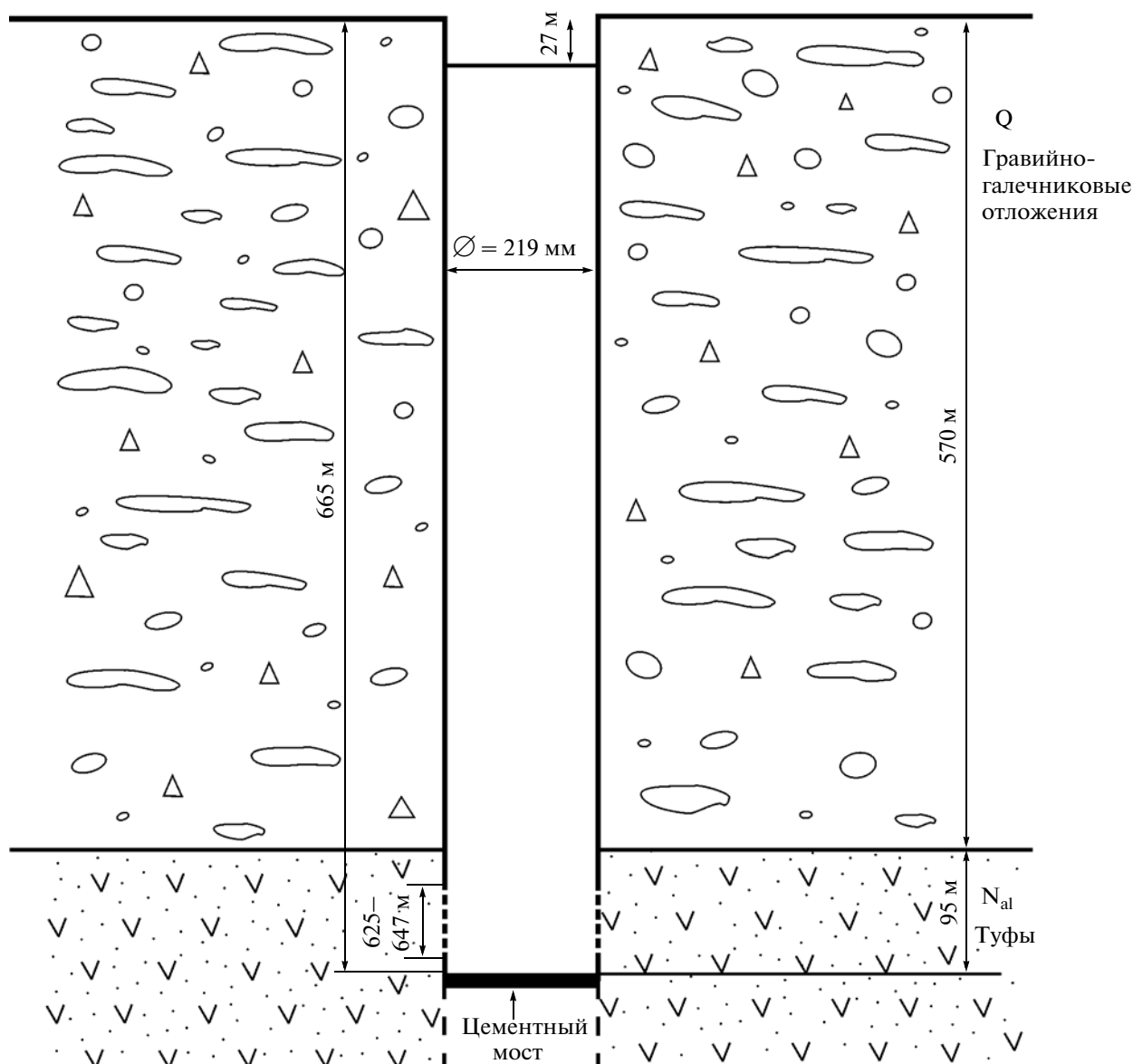


Рис. 3. Строение скважины E-1 и геологический разрез.

бутылок с водными пробами, отобранными из ствола скв. E-1. По нашим наблюдениям, при отборе водных проб из скважин, вскрывающих подземные воды с наличием растворенного газа, находящегося в равновесии с атмосферным воздухом, газовые пузырьки на стенках бутылок не образуются.

Присутствие газа в подземной воде, находящейся в алнейских вулканитах и в водной колонне в стволе скв. E-1, сопровождается повышением сжимаемости флюидной фазы, по сравнению с величиной сжимаемости обычной пресной воды. Повышенная сжимаемость подземной воды может быть одной из наиболее важных причин отсутствия приливных вариаций и ослабления ба-

рометрического отклика в изменениях уровня воды в скв. E-1 [Копылова, 2009].

В табл. 2 приводятся оценки величин барометрической эффективности и приливной чувствительности уровня воды в наблюдательных скважинах по результатам барометрического и приливного анализа среднечасовых вариаций уровня воды и атмосферного давления. Для скв. E-1 величина барометрической эффективности в диапазоне суточных периодов весьма мала ($E_b = -0.01$ см/гПа) и достигает величины $E_b = -0.1$ см/гПа на периодах десятки–сотни суток [Копылова, 2009]. Для сравнения, величины барометрической эффективности уровня в скв. ЮЗ-5 и 1303 составляют -0.40 и -0.43 см/гПа на периодах от первых часов до де-

Таблица 2. Величины упругих параметров резервуаров подземных вод, вскрытых наблюдательными скважинами

Скважина	Барометрическая эффективность E_b , см/гПа	Приливная чувствительность A_S/A_V , м/10 ⁻⁷	Дренированная сжимаемость скелета β , Па ⁻¹ × 10 ⁻¹¹	Модуль сдвига G , Па × 10 ¹⁰	Коэффициент Скемптона B	Пористость ϕ	Упругая водоотдача S
Е-1	0.01/0.1 ¹	0.010/0.015	7.59	0.79	0.044–0.17	0.01–0.06	5.8×10^{-5}
1303	0.43	0.143/0.215	7.37	0.81	0.64	0.06	19.6×10^{-5}
ЮЗ-5	0.40	0.107/0.161	12.5	1.34	0.67	0.11	16.9×10^{-5}

Примечание. ¹ первое число – оценка барометрической эффективности для суточного диапазона периодов, второе число – для диапазона периодов десятки–сотни суток [Копылова, 2009].

сятков–сотен суток. Существенным отличием этих скважин от скв. Е-1 является то, что они расположены в пределах положительных гидрогеологических структур, контролируют подземные воды в зоне активного водообмена и во вскрытых ими водовмещающих породах отсутствуют признаки газогенерации.

Уникальной особенностью гидродинамического режима скв. Е-1 также является проявление гидрогеодинамического предвестника в форме увеличения скорости понижения уровня воды в течение недель–первых месяцев перед землетрясениями с $M \geq 5$ на расстояниях до 350 км [Копылова, 2001, 2008]. По данным наблюдений 1997–2007 гг. предвестник проявлялся перед 70% таких землетрясений [Копылова, 2008]. Ретроспективная прогнозная эффективность предвестника по методике [Гусев, 1974] 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. в скв. Е-1 развивался тренд повышения уровня воды с аномально высокой средней скоростью, достигающей 0.15–0.20 см/сут (рис. 4). Такое повышение уровня показывало рост порового давления вследствие воздействия источника деформации объемного сжатия, который мог быть связан с подготовкой и развитием роя землетрясений и извержения вулкана Корякский. Ниже рассматриваются вопросы оценки величины деформации объемного сжатия в районе скважины, природы и местоположения источника деформации, а также влияния такого источника на проявление гидрогеодинамического предвестника сильных тектонических землетрясений.

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ В РАЙОНЕ СКВАЖИНЫ Е-1

Для оценки величины объемного сжатия использовалась формула связи изменений порового

давления Δp и объемной деформации $\Delta \epsilon$ для статически изолированных условий, т.е. для таких условий, когда течением воды в водовмещающих породах и водообменом между водовмещающей породой и стволом скважины можно пренебречь [Roeloffs, 1988]:

$$\Delta p = -(2GB/3)[(1 + \nu_u)/(1 - 2\nu_u)]\Delta \epsilon. \quad (1)$$

Такая связь определяется упругими параметрами резервуара: коэффициентом Пуассона для условий отсутствия оттока воды (недренированные условия) ν_u , модулем сдвига G и коэффициентом Скемптона B , показывающим долю суммарного напряжения в скелете водовмещающей породы, передающуюся на поровый флюид: $B = -3p/\sigma$, где p – давление порового флюида, σ – суммарное напряжение в скелете породы.

Амплитуда повышения уровня воды в скв. Е-1 с мая 2006 по декабрь 2009 гг. составила $\Delta h = 122$ см (см. рис. 3). Полагая, что амплитуда повышения уровня Δh полностью определяется приращением порового давления, можно записать:

$$\Delta \epsilon = -(p g \Delta h) / (2/3 G B [(1 + \nu_u) / (1 - 2\nu_u)]), \quad (2)$$

где ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения. Величина ν_u принималась равной 0.3, что является традиционным допущением для водоносных горизонтов в верхней части земной коры.

В условиях отсутствия оттока воды (недренированные условия) расчет упругих параметров G и B может проводиться по формулам теории пороупругости с использованием величин приливной чувствительности уровня воды по отношению к площадной деформации A_S и объемной деформации A_V (см. табл. 2), полученным по результатам приливного анализа часовых вариаций уровня воды. Соответствующие выражения приводятся в [Копылова, Болдина, 2006; Igarashi, Wakita, 1991; Roeloffs, 1998; Rojstaczer, Agnew, 1989; Van der Kamp, Gale, 1983].

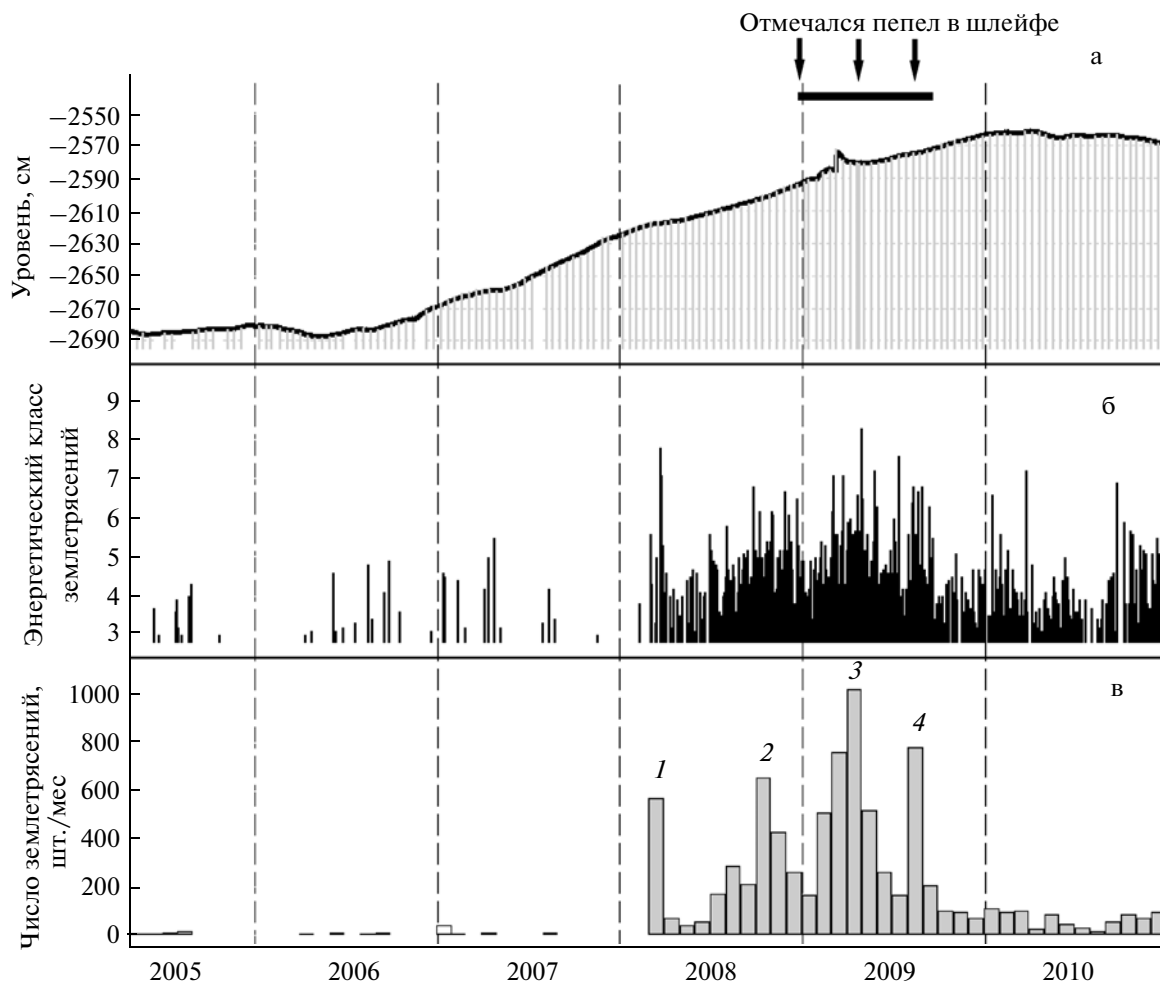


Рис. 4. Изменение уровня воды в скв. Е-1 в 2005–2010 гг. в сопоставлении с развитием сейсмичности и парогозовой активности вулкана Корякский: а – изменения уровня воды по данным цифровых и ручных измерений (приводятся в глубинах уровня ниже оголовка скважины); горизонтальной линией показан интервал времени фреатического извержения; б – землетрясения с величинами энергетических классов $K_S = 3.1–8.3$ в районе вулкана 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.).

В изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1303 (см. рис. 1, табл. 1), вскрывающих водо-вмещающие породы с пресными подземными водами без признаков газогенерации, приливные и барометрические вариации проявляются достаточно отчетливо. Для этих скважин оценены величины E_b , A_S , A_V и величины упругих параметров и пористости водовмещающих пород для статически изолированных условий в системе “скважина–резервуар” (см. табл. 2).

При расчете величины коэффициента Скемптона B , входящего в выражение (2), используются величины сжимаемостей скелета породы β , твердой фазы скелета β_u и флюида β_f . Ниже приводятся формулы для определения коэффициента Скемптона:

$$B = (\rho g A_S \beta) / [1 + \rho g A_S (\beta - \beta_u)], \quad (3)$$

$$B = (\beta - \beta_u) / [(\beta - \beta_u) + \phi(\beta_f + \beta_u)], \quad (4)$$

$$B = \rho g \beta_u A_V, \quad (5)$$

где ϕ – пористость, ν – коэффициент Пуассона для условий оттока воды (дренированные условия, $\nu = 0.25$), $\beta_u = 0.3 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ (кварц) [Roeloffs, 1988]. (3) приводится по [Igarashi, Wakita, 1991], (4)–(5) – по [Rojstaczer, Agnew, 1989]. В случае скв. Е-1 в (3)–(5) входят неизвестные величины параметров A_S , A_V , B и ϕ .

Как отмечалось выше, уровень воды в скв. Е-1 не реагирует на земные приливы. Поэтому деформометрическая чувствительность уровня, необходимая для определения упругих параметров резервуара, оценивалась не по приливной чувствительности уровня, как в случае скв. ЮЗ-5 и 1303, а по данным о проявлении гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясе-

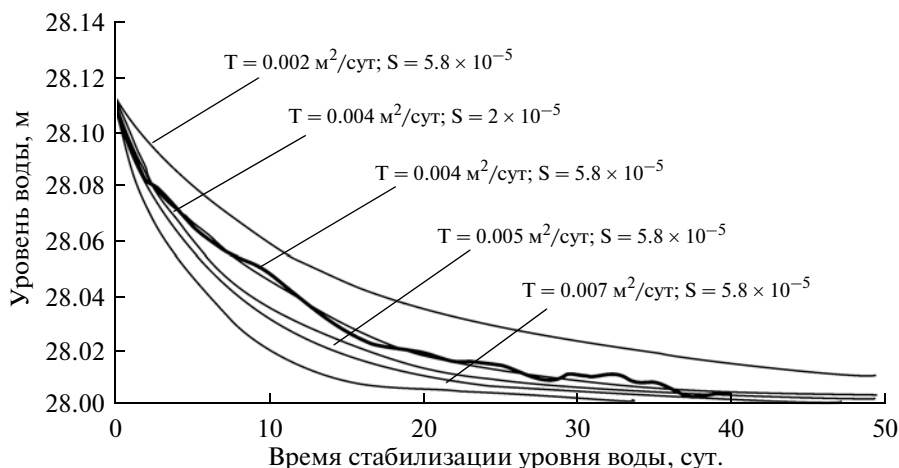


Рис. 5. Стабилизация уровня воды в скв. Е-1 после спуска датчика акустической эмиссии в ее ствол: жирной линией показано изменение уровня воды по данным 10-минутных измерений, тонкими линиями показаны расчетные понижения уровня воды при различных величинах водопроницаемости T и упругой емкости S .

ния 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$ (КЗ) в изменениях уровня в скв. Е-1 и ЮЗ-5. Перед КЗ наблюдалось бухтообразное понижение уровней воды в обеих скважинах продолжительностью около трех недель, синхронное с предсейсмическими перемещениями GPS-станций Камчатской сети [Копылова, 2006]. Амплитуды понижения уровней воды Δh в скв. Е-1 и ЮЗ-5 составили -1 см и -11 см соответственно. В [Копылова, 2006] полагалось, что такие понижения уровней были вызваны квазиупругой деформацией расширения водовмещающих пород при развитии преимущественно асейсмических движений, предшествующих КЗ. Кроме этого, принималось, что величины предсейсмической деформации расширения были примерно одинаковыми в районах обеих скважин, расположенных на расстоянии 11 км (см. рис. 1).

Приблизительная 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 $A_V^{ЮЗ-5} = 0.161$ м/10⁻⁷, и составила $A_V^{Е-1} = 0.015$ м/10⁻⁷. При величине коэффициента Пуассона $\nu = 0.25$ величина $A_S^{Е-1}$ составляет 0.010 м/10⁻⁷.

Величины упругой водоотдачи водовмещающих пород S и сжимаемости флюида β_f оценивались по результатам моделирования восстановления уровня воды после спуска датчика акустической эмиссии в ствол скважины 11 марта 2009 г. (см. резкое повышение уровня на рис. 4а). Спуск датчика сопровождался повышением уровня на 13 см с последующей его стабилизацией в течение 40–45 сут.

Данные 10-минутных замеров во время стабилизации уровня воды сравнивались с эталонными кривыми понижения уровня при заданных величинах водопроницаемости T и упругой водо-

отдачи S (рис. 5), полученными из решения уравнения нестационарной фильтрации для совершенной скважины по степени и характеру вскрытия напорного однородного, изотропного и неограниченного по протяженности резервуара [Синдаловский, 2006].

По результатам моделирования наиболее приемлемой величиной сжимаемости подземной воды при водопроницаемости $T = 0.004$ м²/сут и упругой водоотдаче $S = 5.8 \times 10^{-5}$ (см. рис. 5) является $\beta_f = 4.4 \times 10^{-9}$ Па⁻¹. Такая величина β_f на порядок больше, чем сжимаемость обычной воды, и указывает на небольшое содержание свободного газа в порово-трещинном пространстве водовмещающей породы.

Величина сжимаемости скелета породы β (см. табл. 2) получена из формулы $S = d[\rho g(\beta + \phi\beta_f)]$, где d — мощность резервуара, равная 22 м. При этом величина сжимаемости скелета породы $\beta = 7.37 \times 10^{-11}$ Па⁻¹, полученная для скважины 1303 (см. табл. 2), использовалась в качестве начального приближения при оценке величины упругой водоотдачи водовмещающих пород, вскрытых скв. Е-1. Величина пористости ϕ принималась равной не более 0.06 также по аналогии с величиной пористости туфогенно-осадочных неогеновых отложений, вскрытых скв. 1303 в диапазоне глубин 517–717 м (средняя глубина 617 м).

Следует отметить, что величина водопроницаемости $T = 0.004$ м²/сут хорошо согласуется с полученной ранее, в 1991 г., величиной водопроницаемости по результатам обработки восстановления уровня воды после экспресс-налива.

С использованием (3) величина $B = 0.07$; по (4) $B = 0.17$; по (5) $B = 0.044$. Таким образом, по (3)–(5) получена оценка величины B в диапазоне значений 0.04–0.17, в среднем, 0.09.

Модуль сдвига G в (2) определялся по формуле $G = 3/2[(1 - 2\nu)/\beta(1 + \nu)]$ [Van der Kamp, Gale, 1983].

С использованием (2) и оцененных упругих параметров резервуара (см. табл. 2) приближительная величина деформации объемного сжатия в течение времени аномального повышения уровня воды составила в районе скв. Е-1 $\Delta\epsilon = -(4.1 \times 10^{-6} - 1.5 \times 10^{-5})$.

О природе источника деформации сжатия водовмещающих пород

Повышение уровня воды в скв. Е-1 и развитие сейсмичности в районе вулкана Корякский рассматриваются нами как явления, имеющие парагенетическую связь. В [Селиверстов, 2009; Сеников, Нуждина, 2010] показано, что рой землетрясений начался в марте 2008 г. в северном секторе субмеридиональной зоны (см. рис. 1). После относительного затишья в апреле—июне 2008 г. эпицентры сместились в ее юго-западный сектор, включающий постройку вулкана. В период активной фазы фумарольной деятельности с конца декабря 2008 до августа 2009 гг. (см. рис. 2а—2в) землетрясения происходили в пределах всей субмеридиональной зоны, в т.ч. в постройке вулкана. Землетрясение с максимальной величиной $K_S = 8.3$ произошло 30 апреля 2009 г. на глубине 5 км.

Суммарная сейсмическая энергия, выделившаяся в течение роя землетрясений с марта 2008 по декабрь 2009 гг., составила 5.4×10^8 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 “условного очага” такого землетрясения по [Ризниченко, 1976] составляют: длина — 2 км, ширина — 1 км, площадь — 2 км^2 . Такие размеры “очага” на порядок меньше реальной области сейсмической активизации в районе вулкана Корякский (примерно 40 км^2). Это показывает, что субмеридиональная зона концентрации эпицентров землетрясений (см. рис. 1) оконтуривает на поверхности активизированную область развития современных тектонических движений в верхних горизонтах коры Авачинской вулканотектонической депрессии, включающую постройку вулкана Корякский.

Относительно причин фумарольной активизации вулкана Корякский имеются две гипотезы. Первая гипотеза объясняет наблюдаемые сейсмические и вулканические явления внедрением магматического вещества в предполагаемый паро-газовый коллектор под вулканом [Гордеев и др., 2009]. При этом полагалось, что область сейсмической активизации соответствует расположению коллектора. Если принять эту гипотезу, то источником деформации сжатия в районе сква-

жины является рост флюидного давления в коллекторе и его упругая передача в район скважины. Минимальную величину энергии этого процесса можно оценить по парогазовой разгрузке (3×10^9 Дж по [Дрознин, Дубровская, 2010]).

В работе [Гордеев, Дрознин, 2010] приводится сопоставление предполагаемого объема магматического вещества ($1.2 \times 10^7 \text{ м}^3$), обеспечивающего тепловую разгрузку вулкана за время извержения, и объема среды, в котором проходили землетрясения ($4.5 \times 10^9 \text{ м}^3$). Эти объемы различаются на два порядка. Из такого сопоставления авторы [Гордеев, Дрознин, 2010] приходят к выводу о том, что внедрение магматического вещества не позволяет объяснить развитие роя землетрясений.

Вторая гипотеза связывает возникновение роя землетрясений в районе вулкана Корякский с геодинамической обстановкой формирования раздвиговой зоны субмеридионального простирания [Селиверстов, 2009]. Деструктивные процессы раздвигания в пределах этой зоны на некотором этапе затронули магмоподводящие пути под вулканом и сопровождалась усилением фумарольной деятельности. В этом случае, главной причиной повышения уровня воды являются тектонические процессы раздвигания, которые сопровождалась сжатием водовмещающих пород в районе скважины.

Мы отдаем предпочтение второй гипотезе, т.е. источником деформации были тектонические напряжения растяжения в пределах субмеридиональной зоны, которые развивались как до, так и во время сейсмической активизации в районе вулкана и усиления его фумарольной деятельности. Выделившаяся сейсмическая энергия в пределах субмеридиональной зоны (0.5×10^9 Дж) примерно сопоставима с энергией парогазовой разгрузки (3×10^9 Дж). Полагая, что выделившаяся сейсмическая энергия составляет не более первых процентов от общей энергии тектонических движений, становится очевидным, что именно такие движения являются главным источником деформации сжатия водовмещающих пород в районе скв. Е-1. Аналогичный вывод о преимущественной связи сейсмичности в пределах субмеридиональной зоны с тектоническими процессами также приводится в работах [Гордеев, Дрознин, 2010; Селиверстов, 2009; Сеников, Нуждина, 2010].

О ПРОЯВЛЕНИИ ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕДВЕСТНИКА ВО ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ ИСТОЧНИКА ДЕФОРМАЦИИ ОБЪЕМНОГО СЖАТИЯ В РАЙОНЕ СКВАЖИНЫ Е-1

На рис. 6 представлен график суточной скорости изменения уровня в скв. Е-1 в сопоставлении

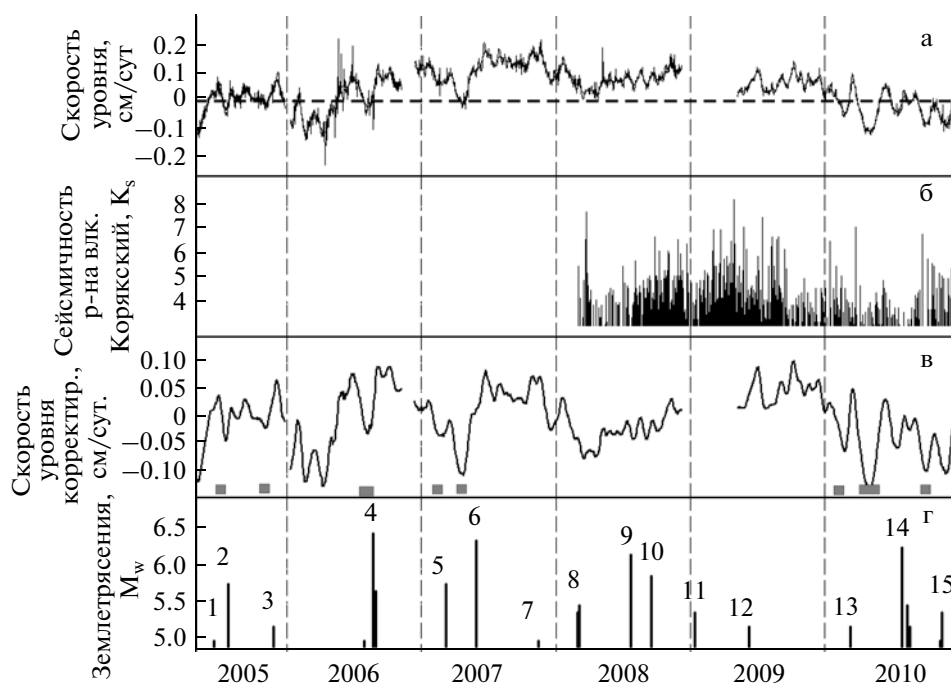


Рис. 6. Вариации уровня воды скв. Е-1 в 2005–2010 гг. в сопоставлении с развитием сейсмичности в районе вулкана Корякский и сильными землетрясениями: а – суточная скорость изменения уровня воды с компенсированными баровариациями (жирной линией показано среднее среднесуточных данных в окне 15 сут); б – землетрясения в районе вулкана Корякский с $K_S \geq 4.0$; в – среднесуточная скорость изменения уровня воды, скорректированная за счет средней скорости тренда в течение соответствующего фрагмента (горизонтальными линиями обозначены времена проявления гидрогеодинамического предвестника); г – землетрясения с $M \geq 5.0$ на расстоянии $R \leq 350$ км от скважины: цифрами обозначенным номером сейсмических событий в соответствии с табл. 3.

с развитием сейсмичности в районе вулкана Корякский и сильными тектоническими землетрясениями (табл. 3) за период с мая 2005 по декабрь 2010 гг.

График суточных скоростей изменения уровня состоит из четырех фрагментов, для каждого из которых можно было корректно выполнить компенсацию баровариаций в изменениях уровня воды. Пунктирной линией на рис. 6а показано значение скорости, равное 0 см/сут. Соответственно, величины скорости, расположенные выше пунктирной линии, показывают повышение уровня, ниже линии – понижение уровня.

Устойчивое повышение уровня началось с 20 мая 2006 г. Эту дату можно рассматривать как начало эффективного проявления источника деформации объемного сжатия в районе скважины. Максимальные скорости повышения уровня (до 0.15–0.20 см/сут) наблюдались в течение июня–декабря 2007 г. и предшествовали началу роя землетрясений в марте 2008 г. (см. рис. 6б). В течение сейсмической активизации и извержения вулкана Корякский скорости повышения уровня были меньше (0.05–0.12 см/сут) и менялись незначительно.

В табл. 3 представлены все землетрясения с $M \geq 5.0$, произошедшие с мая 2005 по декабрь

2010 гг. на расстоянии до 350 км от скважины. Землетрясения, интервал времени между которыми составлял менее одного месяца, объединялись в одно сейсмическое событие. При сравнении вариаций скорости изменения уровня с моментами сейсмических событий (см. табл. 3) гидрогеодинамический предвестник проявлялся перед землетрясениями с $M = 5.0 - 6.5$ в 2005–2006 и в первой половине 2007 г. Со второй половины 2007 г. и в течение последующих 2.5 лет гидрогеодинамический предвестник перед такими событиями не проявлялся. Это указывает на снижение чувствительности скважины к процессам подготовки сильных тектонических землетрясений во время действия источника деформации объемного сжатия.

С января 2010 г. наблюдалось закономерное уменьшение суточной скорости повышения уровня воды. В феврале 2010 г. длительное повышение уровня воды сменилось на его понижение. Это указывало на окончание действия источника объемного сжатия в районе скважины, которое сопровождалось стабилизацией гидрогеодинамического режима. В 2010 г. гидрогеодинамический предвестник был зафиксирован перед всеми тремя сейсмическими событиями (13–15 в табл. 3, см. рис. 6в).

Таблица 3. Землетрясения с $M \geq 5.0$ на расстоянии $R \leq 350$ км от скважины Е-1, май 2005–2010 гг.

Номер сейсмического события*	Дата землетрясения, дд.мм.гг	Магнитуда, М	Энергетический класс, K_S	Расстояние до скважины, R, км	Наличие предвестника в изменениях уровня воды
1	08.06.05	5.0	12.6	329	—
2	26.07.05	5.8	13.3	131	+
3	26.11.05	5.2	12.7	125	+
4	31.07.06	5.0	12.9	219	+
	24.08.06	6.5	14.3	276	
5	01.09.06	5.7	12.9	110	+
	10.03.07	5.8	14.3	326	
6	30.05.07	6.4	13.6	204	+
7	17.11.07	5.0	12.8	110	—
8	01.03.08	5.4	12.9	134	—
	06.03.08	5.5	13.1	270	
9	24.07.08	6.2	14.0	276	—
10	18.09.08	5.9	12.7	167	—
11	14.01.09	5.4	12.5	147	н.д.
12	11.06.09	5.2	12.5	134	н.д.
13	13.03.10	5.2	12.1	139	+
14	30.07.10	6.3	14.1	152	+
	30.07.10	5.4	12.6	153	
	15.08.10	5.5	12.9	145	
15	21.08.10	5.2	12.6	296	+
	12.11.10	5.0	12.4	259	
	16.11.10	5.4	13.3	185	

Примечание. * в сейсмические события объединены землетрясения, происходящие последовательно на интервале времени до одного месяца; — — предвестник в изменениях уровня воды не выявлен; + — предвестник в изменениях уровня воды выявлен; н.д. — данные по изменениям уровня воды отсутствуют по техническим причинам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Примечательными особенностями скв. Е-1, по сравнению с другими наблюдательными скважинами в районе Авачинской вулканотектонической депрессии (см. табл. 1, табл. 2), являются застойные условия водообмена в контролируемой толще водовмещающих пород и очень малая их водопроницаемость, повышенная сжимаемость подземной воды из-за присутствия газа в ее составе, низкая величина коэффициента Скемптона ($B = 0.04-0.17$).

С 20 мая 2006 по декабрь 2009 гг. в скв. Е-1 происходило постепенное повышение уровня воды вследствие развития деформации объемного сжатия водовмещающих пород и роста порового давления, предшествовавших и сопутствовавших сейсмической и фумарольной активизации вулкана Корякский. Наиболее вероятным источником деформации сжатия водовмещающих пород являются тектонические напряжения, связанные

с формированием субмеридиональной раздвиговой зоны в земной коре в районе вулкана Корякский в соответствии с [Селиверстов, 2009]. Рост тектонических напряжений с марта 2008 г. сопровождался активизацией слабой сейсмичности в пределах протяженной субмеридиональной зоны (см. рис. 1) и слабым фреатическим извержением (см. рис. 2а–2в).

Детальное изучение скорости восходящего тренда в изменениях уровня воды в скв. Е-1 показало, что фаза максимального роста давления в резервуаре наблюдалась с июня по декабрь 2007 г. и предшествовала началу роя землетрясений в пределах субмеридиональной зоны. Во время роя землетрясений и извержения вулкана рост давления продолжался с меньшей скоростью. В январе 2010 г. рост давления в резервуаре прекратился. Это указывает на прекращение или значительное ослабление современных тектоно-магматических процессов в верхних горизонтах коры Авачин-

ской вулканотектонической депрессии (район вулкана Корякский).

Вследствие действия источника объемного сжатия и роста порового давления наблюдалось понижение чувствительности гидродинамического режима скв. Е-1 к процессам подготовки сильных тектонических землетрясений с середины 2007 по 2009 гг., т.е. в течение 2.5 лет.

Для более определенных выводов о природе источника деформации было бы полезно иметь механизмы очагов наиболее сильных землетрясений, произошедших в районе вулкана Корякский, а также выполнить комплексное моделирование развития тектоно-магматического процесса с учетом данных уровневых наблюдений, схематизации гидрогеодинамических условий в недрах Авачинской вулканотектонической депрессии, динамики развития сейсмичности, тепловой и массовой разгрузки за счет фумарольной деятельности.

2. На примере скв. Е-1 впервые продемонстрирована возможность оценки объемной деформации водовмещающих пород по данным уровневых наблюдений в условиях отсутствия приливного отклика уровня воды.

По амплитуде повышения уровня воды с 20 мая 2006 по декабрь 2009 гг. рост порового давления в резервуаре составил $\Delta p = 12.2$ кПа или 0.12 бар. С учетом оцененных упругих параметров водовмещающих пород установлен примерный диапазон величин деформации объемного сжатия в районе скважины $\Delta \epsilon = -(4.1 \times 10^{-6} - 1.5 \times 10^{-5})$. Приведенные величины $\Delta \epsilon$ имеют оценочный характер, так как при их получении использовались ряд гипотетических предположений, в частности, о примерном равенстве величин объемной деформации в районах скважин ЮЗ-5 и Е-1 на стадии подготовки Кроноцкого землетрясения, о примерном соответствии величин пористости ϕ и сжимаемости скелета водовмещающей породы β в скважинах 1303 и Е-1 и другие. По мнению одного из рецензентов, применение модели нестационарной фильтрации для совершенной скважины [Синдаловский, 2006] в отношении скважины Е-1 при оценке упругой емкости водовмещающих пород и сжимаемости порового флюида является не вполне обоснованным в связи с тем, что в этой модели не учитывается возможное влияние на изменения уровня воды скин-эффекта скважины и расположения фильтровой зоны вблизи границы радела двух комплексов пород, различающихся по литологическому составу (см. рис. 3). Такие замечания правомерны и связаны, в первую очередь, с недостаточной разработкой теории и методики количественной интерпретации данных уровневых наблюдений в целях мониторинга современных сейсмо- и вулканотектонических процессов.

3. Многолетний мониторинг вариаций уровня воды показывает уникальную чувствительность гидродинамического режима скв. Е-1 по отношению к процессам подготовки сильных землетрясений, возникающих в результате поддвига Тихоокеанской океанической плиты под Охотоморскую плиту континентального типа, и к тектоническим процессам в недрах Авачинской вулканотектонической депрессии, сопровождающихся активизацией коровой сейсмичности и вулканической деятельности. На примере этой скважины показано, что два вида современных геодинамических процессов: 1 – подготовка и реализация сильных тектонических землетрясений и 2 – локальные движения в пределах континентальной коры, сопровождающиеся сейсмической и вулканической активизацией, могут “накладываться” друг на друга и вызывать перекрывающиеся друг друга отклики в изменениях уровня воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болдина С. В., Копылова Г.Н.* Оценка инерционного эффекта водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 112–119.
- Гордеев Е.И., Дрознин В.А., Дубровская И.К. и др.* Корякский вулкан – современное состояние и активизация 2008–2009 гг. // Материалы IV Всеросс. симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Вулканизм и геодинамика. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 588–590.
- Гордеев Е.И., Дрознин В.А.* Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 349–351.
- 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.
- Дрознин В.А., Дубровская И.К.* Тепловизионные исследования вулканов Камчатки в 2008–2009 гг. // Труды Второй региональной научно-техн. конференции. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 38–42.
- 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. 2006. № 6. С. 52–64.
- Копылова Г.Н.* Оценка сеймопрогностической информативности данных уровневых наблюдений на скважине Е1, Камчатка (по данным наблюдений 1996–2007 гг.) // Труды региональной научно-техн. конференции. Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 24–28.
- Копылова Г.Н.* Оценка информативности уровневых наблюдений в скважинах для поиска гидрогеоди-

- намических предвестников землетрясений (на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 56–68.
- 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.
- 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.
- Поздеев А.И. Угледородная газогенерация Авачинской депрессии Камчатки, ее перспективы и связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 44–54.
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С. 9–27.
- Селиверстов Н.И. Активизация вулкана Корякский на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 7–9.
- Сенюков С.Л., Нурждина И.Н. Сейсмичность вулкана Корякский в 1966–2009 гг. // Труды Второй региональной научно-техн. конференции. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 91–95.
- Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006. 769 с.
- Hsieh P., Bredehoeft J., Farr J. Determination of aquifer transmissivity from earth-tide analysis // Water Resour. Res. 1987. V. 23. P. 1824–1832.
- Igarashi G., Wakita H. Tidal responses and earthquake-related changes in the water level of deep wells // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № B3. P. 4269–4278.
- Roeloffs E.A. Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177–209.
- 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.
- 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.
- 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. 538–54.

On the Relationships of Water-Level Variations in the E-1 Well, Kamchatka to the 2008–2009 Resumption of Activity on Koryakskii Volcano and to Large ($M \geq 5$) Earthquakes

G. N. Kopylova and S. V. Boldina

*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences,
bul'var Piipa 9, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006 Russia
e-mail: gala@emsd.ru*

Abstract—We discuss the water-level variations in the E-1 well for the time period between May 2006 and 2010, inclusive. A trend towards an increasing level at an abnormally high rate occurred from mid-2006 to December 2009. This increase is regarded as the response of the aquifer of gas-saturated ground water that exists in the volcanogenic–sedimentary deposits of the Avacha volcano-tectonic depression to volumetric strain changes during the precursory period and the occurrence of a swarm of small earthquakes ($K_{S_{\max}} = 8.3$) in the area of Koryakskii Volcano and to its phreatic eruption. We estimated the volumetric compression as $\Delta\varepsilon = -(4.1 \times 10^{-6} - 1.5 \times 10^{-5})$ from the amplitude of water-level rise using the elastic parameters of the water-saturated rocks. While the strain source was active, we observed a decreasing sensitivity of the hydrologic regime in the well to the precursory processes before large ($M \geq 5.0$) tectonic earthquakes.