

**ТРЕНДЫ И СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ (В АСПЕКТЕ ПОИСКА ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ)***Копылова Г.Н., Сизова Е.Г.**Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru***Введение**

Уровнемерные наблюдений в скважинах является одним из методов слежения за изменениями напряженно-деформированного состояния геологической среды (НДС ГС) и поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений. В основе метода лежит представление о реакции уровня воды на изменения пластового (порового) давления при активизации современных геодинамических процессов (крип, подвижки по разломам) и развитии сейсмоструктурной деформации на стадиях подготовки землетрясений. Указанные процессы относятся к геодинамической группе факторов формирования режима подземных вод и сопровождаются, в основном, изменениями упругого состояния водоносного горизонта или его упругого режима [3].

Гидродинамические режимобразующие факторы, связанные с изменением количества подземных вод при их питании и расходовании [3], могут исказить или полностью подавлять реакцию уровня на изменения НДС ГС. В изменениях уровня воды в большинстве пьезометрических скважин, используемых для мониторинга НДС ГС, проявляются сезонные вариации, реакция уровня на выпадение атмосферных осадков и другие эффекты, указывающие на важную роль гидрогеодинамических факторов в формировании их уровенного режима. Исключениями являются скважины, вскрывающие изолированные водоносные горизонты с замедленным водообменом. Для таких скважин геодинамическая группа факторов может быть определяющей в формировании их уровенного режима. Многолетние наблюдения КФ ГС РАН на двух скважинах Камчатки показывают, что наиболее амплитудные изменения уровня воды обусловлены проявлениями сезонных вариаций (скв. ЮЗ-5) и многолетнего тренда (скв. Е1) [4, 5].

При выделении сигналов изменения НДС ГС в изменениях уровня воды в скважинах, в режиме которых проявляется годовая сезонность, необходимо учитывать гидрогеодинамические факторы. Это особенно необходимо при выделении относительно длиннопериодных сигналов, время проявления которых составляет сутки – десятки суток. Сезонные вариации уровня в скв. ЮЗ-5 обусловлены, в основном, внутригодовыми изменениями гидростатического напора вследствие гидравлической связи контролируемого резервуара подземных вод в метаморфизованных отложениях поздне мелового возраста с областью его питания, приуроченной к грунтовому водоносному комплексу в вулканогенно-осадочных отложениях четвертичного возраста (рис. 1). В этом случае сезонные вариации уровня воды являются одним из проявлений гидрогеодинамических факторов формирования режима напорных подземных вод.

Сезонное формирование напора в районе скв. ЮЗ-5 определяется изменением высоты столба воды в области питания в течение года ( $\Delta h$ ) за счет инфильтрации метеорных вод в грунтовый водоносный комплекс и подземного стока, а также преимущественно упругой передачей изменяющегося давления в области питания в район скважины (рис. 1а). В результате формируются ежегодно повторяющиеся фазы сезонных изменений уровня воды (рис. 1б), характерные для типа режима сезонного преимущественно весеннего и осеннего питания грунтовых вод с четко выраженными предвесенним минимумом и летним максимумом и менее выраженными осенне-зимним максимумом и осенним минимумом [3]. Следует отметить, что питание напорных подземных вод в поздне меловых отложениях за счет перетекания из вышележащего водоносного комплекса и их разгрузка в него также могут влиять на формирование гидростатического напора в скв. ЮЗ-5. Однако роль этого процесса представляется несущественной из-за большого различия в величинах коэффициентов фильтрации ( $k$ ) соответствующих гидрогеологических подразделений (рис. 1а) и может проявляться только в многолетнем разрезе.

**Вариации уровня воды в скв. ЮЗ-5 в периоды, предшествующие Кроноцкому землетрясению 05.12.1997 г.,  $M = 7.8$  и Олюторскому землетрясению 20.04.2006 г.,  $M = 7.6$**

Для выделения аномальных изменений продолжительностью сутки - первые десятки суток из сезонных вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 применялись два способа: 1 – построение

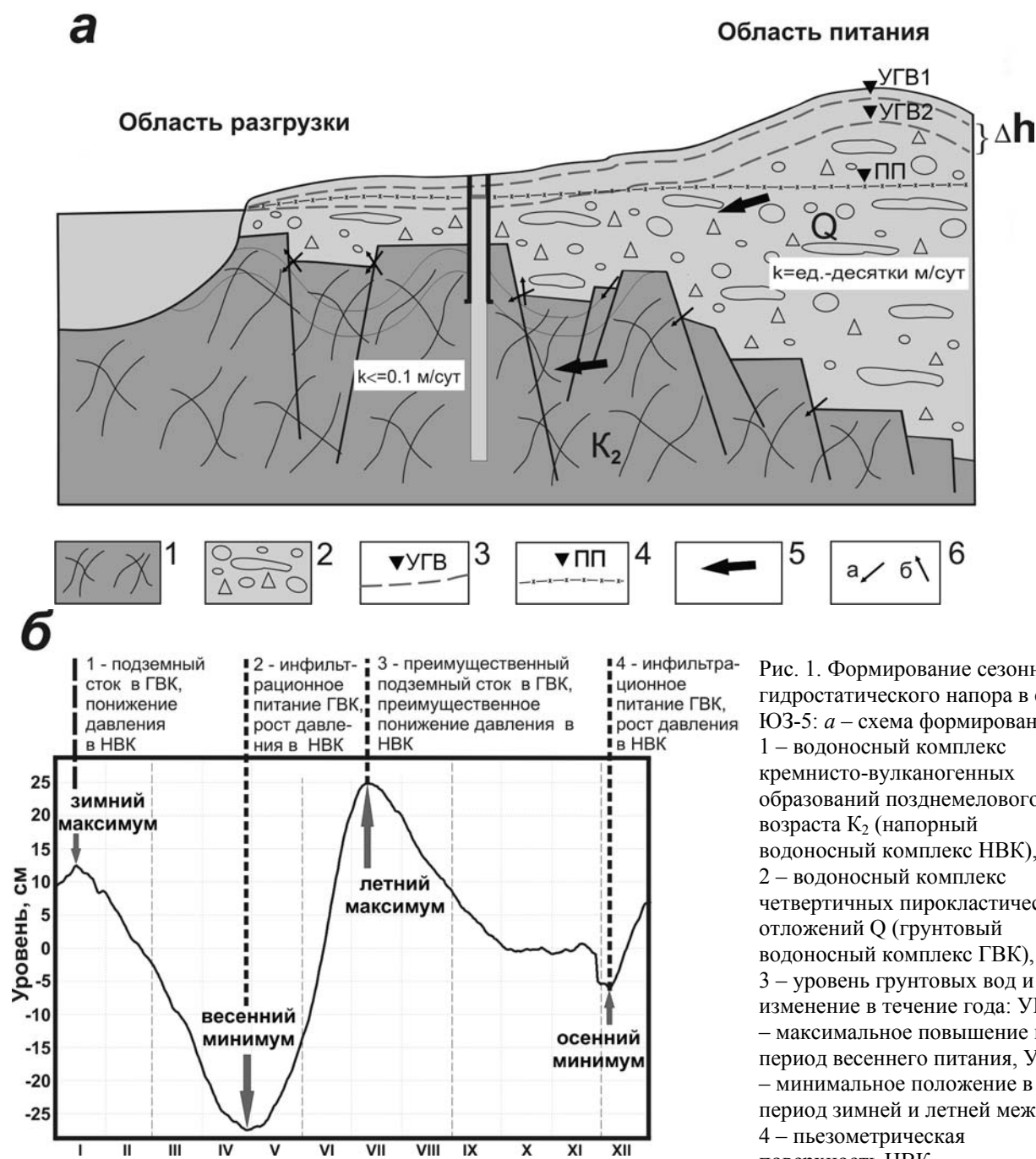


Рис. 1. Формирование сезонного гидростатического напора в скв. ЮЗ-5: *a* – схема формирования: 1 – водоносный комплекс кремнисто-вулканогенных образований позднемелового возраста  $K_2$  (напорный водоносный комплекс НВК), 2 – водоносный комплекс четвертичных пирокластических отложений  $Q$  (грунтовый водоносный комплекс ГВК), 3 – уровень грунтовых вод и его изменение в течение года: УГВ1 – максимальное повышение в период весеннего питания, УГВ2 – минимальное положение в период зимней и летней межени; 4 – пьезометрическая поверхность НВК,

5 – направление регионального потока подземных вод, 6 – направления локальных потоков подземных вод на границе ГВК и НВК.  $\Delta h$  – изменение высоты столба воды в ГВК в течение года,  $k$  – величина коэффициента фильтрации в соответствующих гидрогеологических подразделениях;  $b$  – среднесезонная функция изменения уровня воды по данным наблюдений в 2004-2008 гг.: цифрами обозначены фазы гидродинамического режима с пояснениями.

среднесезонных функций изменения уровня воды и режима выпадения осадков по данным многолетних наблюдений (использовались среднесуточные значения уровня с компенсированными баровариациями за 2004-2007 гг.); сопоставление полученных временных рядов с вариациями уровня и выпадением осадков для отдельного года или его фрагмента; 2 – выделение сезонного тренда путем фильтрации часового временного ряда уровня воды с компенсированными баровариациями с удалением спектральных составляющих с периодами 7-13 и 23-30 ч; полосовая фильтрация полученного ряда для выделения компонент вариаций уровня с периодами 2-45 сут, очищенных от сезонного тренда.

Способ 1 может применяться только при наличии многолетних временных рядов данных по регистрации уровня воды, атмосферного давления и осадков. Способ 2 не имеет такого ограничения на длину используемых временных рядов. Его можно применять для временных рядов уровня и атмосферного давления длиной от первых месяцев и более. Но при его реализации также необходимы данные по режиму выпадения осадков.

Применение способа 1 показало аномальное бухтообразное понижение уровня воды с 11 ноября по 4 декабря 1997 г. в период подготовки Кроноцкого землетрясения (рис. 2). Это подтверждает наличие выявленного ранее гидрогеодинамического предвестника в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 [3], синхронно проявлявшегося с изменениями уровня в скв. Е1 и перемещениями GPS-станций сети KAMNET [9].

Следует отметить, что сезонное поведение уровня воды в рассматриваемый интервал времени (9 сентября - 4 декабря 1997 г.) также нарушалось с 6 по 22 октября из-за выпадения обильных осадков, суточные суммы которых достигали 75 мм/сут по данным метеостанции Пионерская. Эффективные осадки этого периода сопровождалось повышением уровня в скв. ЮЗ-5, которое также значительно отличается от среднесезонного поведения тренда для этого интервала времени.

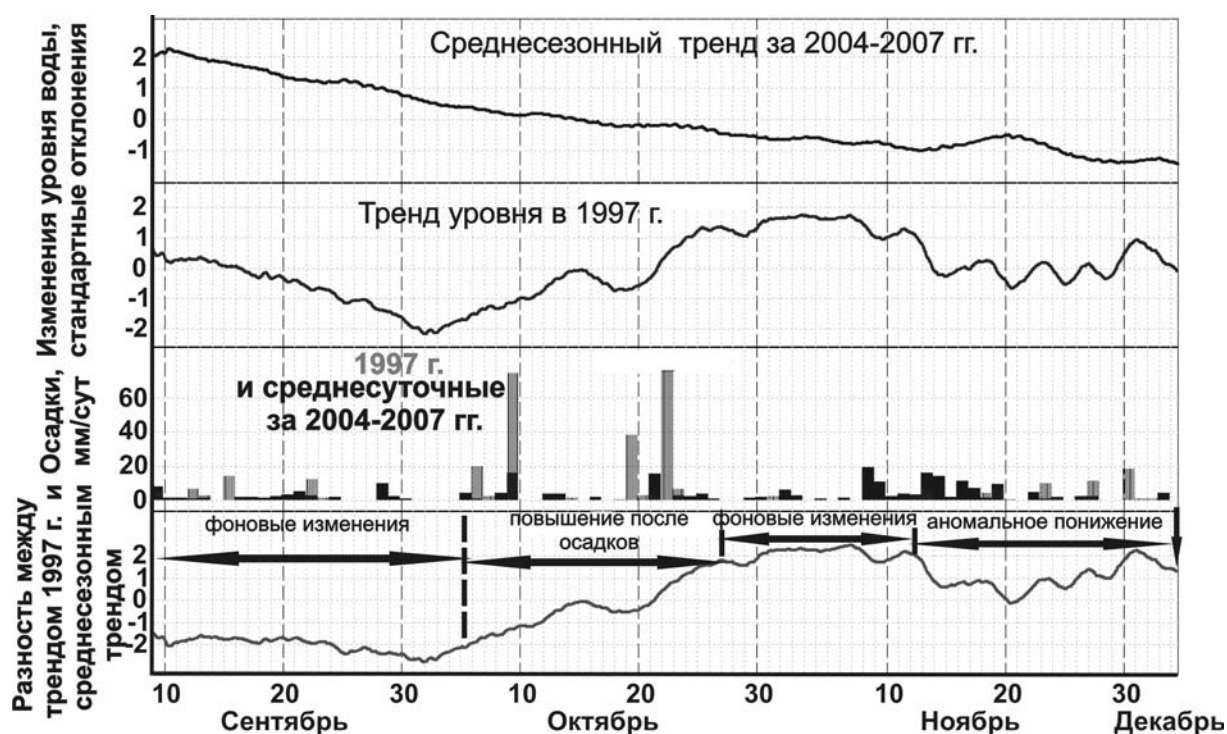


Рис. 2. Анализ сезонных изменений уровня воды в скв. ЮЗ-5 с 9 сентября по 4 декабря по данным наблюдений 2004-2007 гг. и 1997 г. Вертикальной стрелкой показан момент Кроноцкого землетрясения.

С использованием способа 2 выделены аномальные изменения уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1303 (ОАО «Камчатгеология») с 1 февраля по 2 марта 2006 г. в период подготовки Олюторского землетрясения [7]. В течение этого времени происходило синхронное изменение уровня воды в обеих скважинах: понижение с 1 по 12 февраля с амплитудами  $H_1 = -5$  см и  $-4.8$  см и повышение с 13 февраля по 2 марта с амплитудами  $H_2 = 9$  см и  $8.8$  см. Такое изменение уровней можно объяснить развитием деформации расширения водовмещающих пород, сменившейся деформацией их сжатия. Величины объемной деформации резервуаров  $D_v$ , оцененные по амплитудам изменения уровня воды  $H_1$  и  $H_2$ , нормированным на приливные чувствительности уровня в обеих скважинах ( $A_v$ ) по формуле  $D_v = -H/A_v$ , составили в районе скв. ЮЗ-5:  $3.2 \times 10^{-8}$  и  $-5.7 \times 10^{-8}$ ; в районе скважины 1303:  $2.2 \times 10^{-8}$  и  $-4.1 \times 10^{-8}$ .

Однозначное утверждение о связи выявленных аномалий в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1303 с процессом подготовки Олюторского землетрясения представляется преждевременным, в первую очередь, из-за большой удаленности области его очага ( $R = 1040$  км). Но их проявление могло быть связано с развитием асейсмических движений на прилегающем участке Камчатской сейсмофокальной зоны. В конце аномального периода произошло землетрясение 2 марта

2006 г.,  $M = 5$ . В этом случае, выявленные вариации уровня воды в двух скважинах формально можно рассматривать в качестве гидрогеодинамического предвестника этого относительно слабого сейсмического события. При этом необходимо отметить, что землетрясения такого энергетического класса в данном районе происходят достаточно часто и ранее не сопровождались предшествующими аномальными вариациями уровня воды в скв. ЮЗ-5. Это может свидетельствовать о том, что изменения уровня в скважинах ЮЗ-5 и 1303, а также, возможно, и само землетрясение 2 марта 2006 г., представляют проявления активизации геодинамических процессов на прилегающем участке Камчатской сейсмофокальной зоны. Связь во времени между такой активизацией и подготовкой Олюторского землетрясения в Корякском нагорье может быть обусловлена планетарным процессом и требует проверки на большем фактическом материале.

### Гидрогеодинамический предвестник в изменениях тренда уровня воды в скважине Е1

Скв. Е1 расположена в юго-западной части Корякско-Авачинской вулканотектонической депрессии и вскрывает в диапазоне глубин 625-645 м водоносный горизонт в слабообводненных туфогенно-осадочных отложениях неогенового возраста. По данным экспресс-налива в скважину величина водопроницаемости  $T = 0.005 \text{ м}^2/\text{сут}$ . В изменениях уровня воды годовые сезонные вариации не проявляются [4]. Это указывает на отсутствие гидравлической связи между контролируемым резервуаром подземных вод и областью его питания в годовом цикле. Отсутствие годовых сезонных вариаций уровня позволяет рассматривать контролируемый резервуар как гидравлически изолированный, режим которого формируется, в основном, под воздействием геодинамических факторов.

По данным наблюдений в 1987-2009 гг. в режиме скв. Е1 выделены: повышение уровня в 1987-1990 гг. (сейсмически спокойный период, подготовка извержения влк. Авачинский в январе 1991 г. (?)); понижение с 1991 по май 1997 гг. (сейсмическая активизация, включающая пять землетрясений с  $M = 6.9-7.5$ ); повышение уровня с мая 1997 по 1999 гг., вызванное, в основном, его постсейсмической реакцией на сильнейшее Кроноцкое землетрясение 05.12.1997 г.; слабое понижение уровня с 2002 по середину 2006 г. (сейсмически спокойный период); повышение уровня с середины 2006 г. по настоящее время (конец августа 2009 г.) с **аномально** высокой скоростью (сейсмически спокойное время; активизация влк. Корякский; возможная подготовка сильного землетрясения в районе Авачинского залива(?)) (рис. 3).

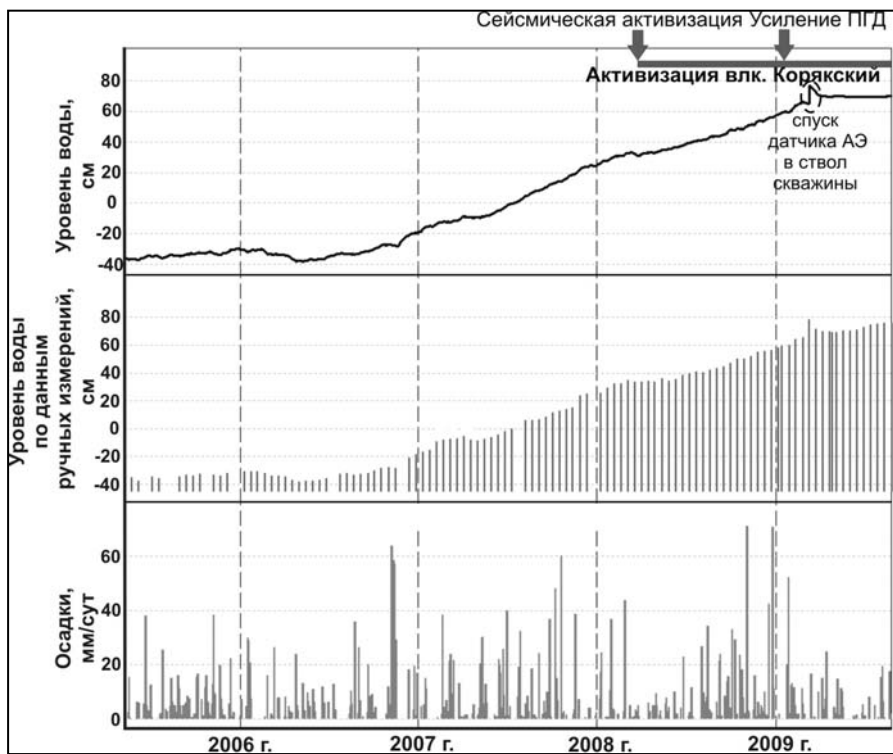


Рис. 3. Изменение уровня воды в скв. Е1 в 2005 – августе 2009 гг. по данным цифровых и ручных измерений в сопоставлении с осадками (по данным метеостанции Пионерская) и активностью вулкана Корякский (по данным лаборатории исследования сейсмической и вулканической активности КФ ГС РАН). ПГД – паро - газовая деятельность, АЭ – акустическая эмиссия.

Такие особенности формирования режима скв. Е1 позволяют использовать среднесуточную скорость изменения уровня воды с учетом величины средней скорости тренда для выделения аномалий понижения порового

давления в течение суток – десятков суток в периоды, предшествующие камчатским землетрясениям с  $M \geq 5$  на расстояниях до 350 км [4, 6]. Ретроспективная сейсмопрогностическая эффективность гидрогеодинамического предвестника, проявляющегося в увеличении скорости понижения уровня воды, для периода наблюдений 1987 - 2007 гг. по [2] составляет 3 - 2 при вероятности связи

предвестника и землетрясений 0.7 - 0.6. Заблаговременность предвестника изменялась от 6 до 58 сут перед землетрясениями с  $M = 5.0 - 6.9$ .

### **Заключение**

Анализ многолетних данных уровневые наблюдения в глубоких скважинах показывает, что основное влияние на формирование уровня могут оказывать либо гидродинамические факторы (скв. ЮЗ-5), либо геодинамические факторы (скв. Е1). Наличие выраженных сезонных вариаций в изменениях уровня указывает на определяющее воздействие гидродинамических факторов в формировании уровня скважины. Рассмотрен механизм формирования сезонных вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5, в основе которого лежит представление о гидравлической связи резервуара напорных подземных вод в позднемиоценовых отложениях с сезонными изменениями высоты водяного столба в области его питания и преимущественно упругой передаче изменяющегося давления в зоне питания в область резервуара (рис. 1).

Представлены два способа выделения аномальных изменений уровня воды в скв. ЮЗ-5 продолжительностью сутки - первые десятки суток с использованием данных многолетних уровневых наблюдений совместно с данными о вариациях атмосферного давления и режиме выпадения осадков. Представленные способы выделения аномальных вариаций уровня из его сезонных изменений могут применяться также для скважин - аналогов, режим которых формируется под преимущественным воздействием гидродинамических факторов. Подтверждено наличие гидрогеодинамического предвестника перед Кроноцким землетрясением в изменениях уровня воды в скв. ЮЗ-5 [5] и выявлены аномальные синхронные изменения уровней в скважинах ЮЗ-5 и 1303 в феврале 2006 г. в период подготовки Олюторского землетрясения.

Скв. Е1 представляет относительно редкий пример скважин, уровневый режим которых формируется под преимущественным влиянием геодинамических факторов. Важными условиями их проявления в данном случае являются весьма низкие водопроницаемые свойства вскрытого резервуара и застойный режим водообмена. В изменениях уровня воды в этой скважине выявлен гидрогеодинамический предвестник, проявившийся в увеличении скорости понижения уровня в течение суток - десятков суток перед землетрясениями с  $M = 5.0 - 7.5$  на расстояниях до 350 км. Также выделены восходящие и нисходящие тренды продолжительностью от трех до 6.5 лет, которые могут быть связаны с различными геодинамическими обстановками деформирования резервуара подземных вод в недрах Корякско-Авачинской вулcano-тектонической депрессии.

Повышение уровня воды в скв. Е1 с аномально высокой скоростью в течение последних трех лет (рис. 3) указывает на развитие деформации сжатия в юго-западной части Корякско-Авачинской вулcano-тектонической депрессии. Источники такой деформации могут быть связаны с формированием субмеридиональной зоны тектонического нарушения раздвигового типа [8] и увеличением давления в парогазовом коллекторе под Корякским вулканом [1]. По оценкам, приведенным в [1], парогазовый коллектор, выделенный по сгущению эпицентров землетрясений 2008 – 2009 гг., расположен на глубинах от 0 до 10 км и имеет линейные размеры  $7 \times 5 \times 2.5$  км.

### **Список литературы**

1. Гордеев Е.И., Дроздин В.А., Дубровская И.К. и др. Корякский вулкан – современное состояние и активизация 2008-2009 гг. // Вулканизм и геодинамика. Матер. IV Всеросс. симпоз. по вулканологии и палеовулканологии. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. 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. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 152 с.
4. 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.
5. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 52-64.
6. 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. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 24-28.
7. Копылова Г.Н., Смолина Н.Н. Вариации уровня воды в скважинах Камчатки в период Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г.,  $M=7.6$  / Геофизика XXI столетия: 2007 год. Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2008. С. 89-99.
8. Селиверстов Н.И. Активизация вулкана Корякский на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. №13. С. 7-9.
9. 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.