

УДК 550.832.9:556.34.042

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ КАМЧАТКИ В ПЕРИОД ОЛЮТОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 20.04.2006 г., $M_w = 7.6$

© 2010 г. Г. Н. Копылова¹, Н. Н. Смолина²

¹Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

²ОАО “Камчатгеология”, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 20.08.2008 г.

В результате воздействия сейсмических волн Олюторского землетрясения, $M_w = 7.6$, произошедшего 20.04.2006 г. в Корякском нагорье, зарегистрированы изменения уровня воды в пяти скважинах, расположенных в континентальных районах Камчатки на гипоцентральных расстояниях 750–1150 км. Приводится описание эффектов воздействия сейсмических волн, а также выявленных аномалий в изменениях уровня воды в феврале–апреле 2006 г. в период, предшествующий Олюторскому землетрясению. С использованием оригинальной методики обработки данных уровнемерных наблюдений, основанной на изучении барометрического и приливного откликов уровня воды, оценена объемная деформация водовмещающих пород во время развития синхронных вариаций уровня в двух скважинах. Обсуждаются возможные механизмы формирования аномальных изменений уровня воды вследствие упругого деформирования контролируемых резервуаров подземных вод и развития трещинной дилатансии в водовмещающих породах.

ВВЕДЕНИЕ

Уровнемерные наблюдения в пьезометрических скважинах включают синхронную регистрацию вариаций уровня воды и атмосферного давления и традиционно рассматриваются в качестве эффективного способа контроля напряженно-деформированного состояния верхних горизонтов земной коры [2, 4, 12]. Особый интерес к такому виду геофизических наблюдений в сейсмоактивных регионах вызван тем, что в изменениях уровней воды обнаруживаются разнообразные вариации при прохождении сейсмических волн, а также гидрогеодинамические предвестники перед сильными землетрясениями [2–5, 12]. Вместе с тем, вопрос о возможности количественной оценки деформации водовмещающих пород по данным уровнемерных наблюдений до настоящего времени остается дискуссионным.

20 апреля 2006 г., 23 ч 25 мин UT в Корякском нагорье произошло коровое землетрясение с магнитудой $M_w = 7.6$ (рис. 1а). Координаты эпицентра составляют 60.98° с.ш., 167.37° в.д., глубина 1 км. Землетрясение вызвало сотрясения интенсивностью до 8–9 баллов (по шкале MSK-64) в населенных пунктах Корякского автономного округа и сопровождалось многочисленными афтершоками, четыре из которых имели магнитуду ≥ 6 [8].

В эпицентральной зоне Олюторского землетрясения специализированные наблюдения на скважинах не проводились из-за отсутствия наблюдательной сети севернее 56° с.ш. По данным Т.К. Пинегиной и Т.Г. Константиновой, выпол-

нивших обследование эпицентральной зоны [11], и по сообщениям местных жителей землетрясение сопровождалось массовыми сейсмогеологическими явлениями в форме разжижения (тиксотропии) и извержения водонасыщенных пород с образованием специфических форм типа “грязевые вулканы”. На поверхности образовывались трещины и провалы, из которых происходили выбросы и выдавливание рыхлых водонасыщенных пород. Площади отдельных грязевых выбросов достигали нескольких км². По сообщениям жителей пос. Таловка, расположенного на расстоянии 120 км от эпицентра, после землетрясения в водопроводную систему из водозаборных скважин длительное время поступала мутная вода. Эти данные указывают на значительное воздействие Олюторского землетрясения на состояние верхних горизонтов подземной гидросферы в эпицентральной области.

Рассматриваются вариации уровня воды в скважинах Камчатки (рис. 1, табл. 1) в период Олюторского землетрясения с целью оценки эффектов его влияния на режим подземных вод и поиска возможных гидрогеодинамических предвестников. Определенное внимание уделяется выявленным аномальным изменениям уровня воды и возможности количественной оценки деформации водовмещающих пород во время их развития. Для этого используется оригинальная методика, основанная на изучении барометрического и приливного отклика уровня воды в скважинах [6].

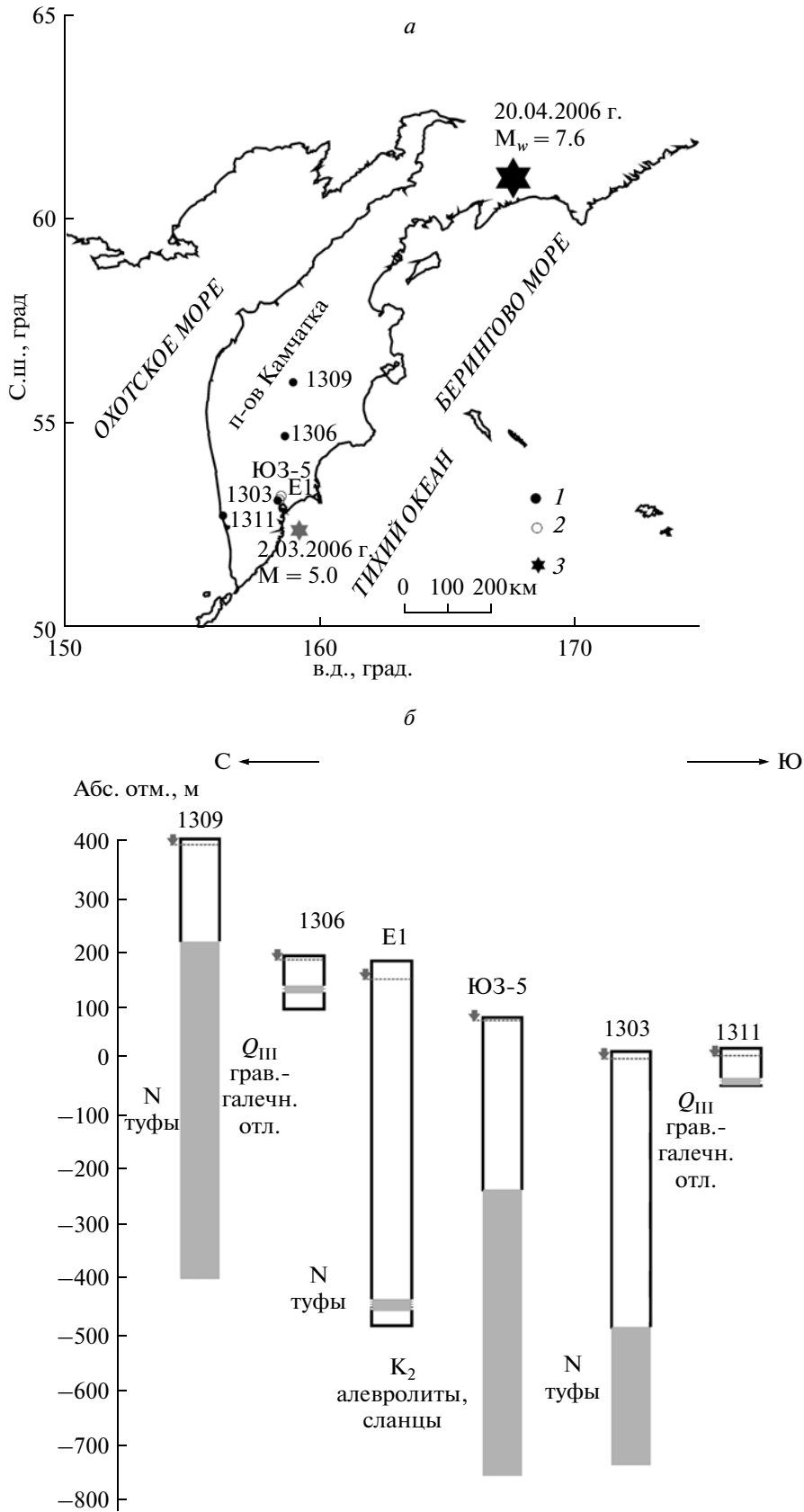


Рис. 1. Схемы расположения наблюдательных скважин (а) и их строения (б): 1 – скважины ОАО “Камчатгеология”; 2 – скважины КФ ГС РАН; 3 – эпицентры землетрясений.

Таблица 1. Характеристика наблюдательных скважин

№ скважины	Координаты, град.		Абс, отм, м; глубина, м; уровень, м	Открытый интервал, м	Водовмещающие породы; водопроницаемость, м ² /сут	Характеристика флюида			
	с.ш.	в.д.				М, г/л	Хим, состав	Газ	T, град., С
1303	53.15	158.35	31; 717; 25	517–717	N ₂ –N ₁ ² туфопесчаники; 0.32	0.67	(HCO ₃ –SO ₄)/Na	нет	4.7
1306	54.73	158.63	200; 100; 11	28–41	Q _{IV} гравийно-галечные отложения; 1451	1.5	HCO ₃ / (Ca + Mg)	есть? CO ₂	2.0
1309	56.05	158.95	406; 750; 4	223–750	N _{al} туфы; 75	1.5	SO ₄ / (Na + Ca)	нет	6.6
1311	52.79	156.20	20; 80; 12	67–69; 70–73	Q _{IV} щебнисто-гравийные отложения; 165	0.18	(HCO ₃ –Cl)/ (Mg–Ca, Na)	нет	4.0
ЮЗ-5	53.17	158.41	70; 800; 1.5	310–800	K ₂ алевролиты; 7.8	0.4	(HCO ₃ –SO ₄)/ (Na–Ca)	нет	14.0
E1	53.26	158.48	180; 665; 29	625–645	N ₂ , туфы; 0.005	1.5	(Cl–HCO ₃)/Na	своб. N ₂ –CH ₄	10.0

ХАРАКТЕРИСТИКА СКВАЖИН, МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ УРОВНЕМЕРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдательные скважины расположены в континентальных районах п-ова Камчатка на расстояниях $R = 748–1150$ км от инструментального гипоцентра Олюторского землетрясения. Глубины вскрытия скважинами водовмещающих пород составляют от 28–40 (скв. 1306) до 310–800 м (скв. ЮЗ-5) (рис. 1б). Водовмещающие породы по литологическому составу представлены туфогенно-осадочными отложениями неогенового возраста (скв. 1303, 1309, E1), терригенными метаморфизованными отложениями позднемелового возраста (скв. ЮЗ-5), четвертичными образованиями (скв. 1306, 1311). Величины водопроницаемости вскрытых резервуаров подземных вод, определенные по данным откачек и наливов в скважины, изменяются в широких пределах (0.005–1451 м²/сут) (табл. 1). Связь скважин 1309, 1303 и ЮЗ-5 с водовмещающими породами осуществляется через открытые части стволов, в скважинах 1306, 1311 и E1 – через щелевые фильтры.

Уровнемерные наблюдения на скважинах проводятся ОАО “Камчатгеология” и Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) с использованием автономных цифровых регистраторов Кедр А2 (ООО “Полином”, г. Хабаровск), оборудованных ультразвуковыми датчиками уровня и датчиками атмосферного давления. Такая система наблюдений обеспечивает чувствительность регистрации вариаций уровня воды 0.1 см, атмосферного давления – 0.2 гПа. Дискретность измерений на скважинах КФ ГС РАН составляла 10 мин, на скважинах ОАО “Камчатгеология” – 1 ч (скв. 1306) и 10 мин (скв. 1303, 1311, 1309). В работе использовались записи вариаций уровня воды и атмосферного давления, полученные в январе–апреле 2006 г.

Методика обработки данных уровнемерных наблюдений разработана в КФ ГС РАН и включает [4, 6]:

– кросс-спектральный анализ временных рядов уровня воды и атмосферного давления с оценкой параметров статически изолированного барометрического отклика уровня воды (величины квадрата модуля спектра когерентности, барометрической эффективности, разности фаз между вариациями

уровня воды и атмосферного давления Δp) и диапозона периодов его проявления;

– приливной анализ часовых временных рядов уровня воды по программе ETERNA 3.0 [14] с оценкой приливной чувствительности уровня воды A_v по отношению к теоретической объемной деформации;

– компенсацию баровариаций в изменениях уровня воды на основе оценки комплексной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды [9]; выделение гидрогеосейсмических вариаций в поведении тренда и высокочастотной составляющей изменений уровня воды с использованием цифровой фильтрации данных.

В [1, 4, 6, 12, 13] в качестве важного показателя информативности уровнемерных наблюдений для обнаружения сигналов изменения напряженно-деформированного состояния среды рассматривается наличие статически-изолированного отклика уровня воды на барометрическое и приливное воздействие. Проявление такого отклика показывает, что скважина вскрывает изолированный резервуар напорных подземных вод, в котором гидравлическая связь с подземными водами со свободной поверхностью и с другими водоносными горизонтами является не существенной по сравнению с изменениями порового давления при деформировании резервуара. Определение диапазона периодов проявления такого отклика проводится по прямолинейному участку частотно-зависимых функций когерентности и амплитудной передаточной функции от вариаций атмосферного давления к изменениям уровня воды [5, 7]. В этом диапазоне периодов можно пренебречь течением воды и инерционностью водообмена между скважиной и резервуаром подземных вод, т.е. отклик уровня воды в скважине на изменения порового давления в этом диапазоне не искажается процессами водообмена. Статически изолированный отклик уровня воды линейно связан с деформацией водовмещающих пород и управляется упругими параметрами резервуара [1, 12, 13]. В районах скважин с проявлением статически изолированного отклика уровня воды имеется возможность количественной оценки сейсмотектонической деформации по амплитудам гидродинамических предвестников, косейсмических скачков уровня во время землетрясений и других геодинамических эффектов, вызванных квазиупругой деформацией резервуаров подземных вод.

В изменениях уровня воды в скважинах 1303, ЮЗ-5, 1306 и 1309 отчетливо проявляются барометрические отклики на периодах от часов до первых десятков суток (табл. 2). Для этих скважин принимается гипотеза о статически изолированных условиях во вскрытых резервуарах подземных вод в диапазоне

периодов часы–сутки–первые десятки суток. Для скважин Е1 и 1311 такие отклики сильно искажены, в первом случае, за счет присутствия свободного газа в составе порового флюида [4]; во втором – за счет сильного влияния морской приливо-отливной нагрузки на изменения уровня воды (скв. 1311 расположена в 1.5 км от побережья Охотского моря).

Отклик уровня воды на земные приливы с выделением 4–6 отдельных волн установлен для скважин 1303, 1309 и ЮЗ-5 (табл. 2). Это указывает на способность уровня воды в этих скважинах реагировать на упругую деформацию резервуаров подземных вод с амплитудами ед. $\times 10^{-9}$ – ед. $\times 10^{-8}$ на суточных и полусуточных периодах. Величины приливной чувствительности уровня воды A_v для этих скважин оценивались по графикам зависимости амплитуд выделенных приливных волн суточной и полусуточной групп в изменениях уровня от соответствующих величин теоретической объемной деформации и составляют 0.099–0.214 см/ 10^{-9} .

Отсутствие приливного отклика уровня воды в скважине Е1 обусловлено повышенной сжимаемостью порового флюида за счет присутствия в нем свободного газа метаново-азотного состава [3]. Для скв. 1306 также предполагается наличие газовой фазы в составе порового флюида. Сильное искажение земноприливных вариаций уровня воды в скв. 1311 вызвано влиянием морского приливо-отливного воздействия на формирование гидродинамического режима. В составе океанического прилива присутствуют волны, аналогичные волнам земного прилива по периодам, но отличающиеся от них по фазам [10]. Влиянием фактора переменной нагрузки от морского прилива объясняется сильно завышенная величина приливной чувствительности для скв. 1311 ($A_v = 0.300$ см/ 10^{-9}), полученная по результатам приливного анализа по программе ETERNA 3.0.

Сейсмический режим Восточной Камчатки в январе–апреле 2006 г. Анализ распределения землетрясений с энергетическими классами $K_s \geq 12.0$ ($M \geq 4.0$) в Камчатской сейсмофокальной зоне в полосе широт 51° – 60° с.ш. за период январь–апрель 2006 г. показал, что наиболее близким к наблюдательным скважинам было землетрясение 02.03.2006 г., $K_s = 12.4$, $M = 5.0$, координаты эпицентра 52.42° с.ш., 159.19° в.д., глубина 37 км (рис. 1а). Оно произошло на расстояниях $R = 105, 106$ и 111 км до скважин ЮЗ-5, 1303 и Е1 соответственно и сопровождалось 2–4-балльными сотрясениями в г. Петропавловске-Камчатском. Другие землетрясения ($K_s = 12.1$ – 13.2 , $M = 4.2$ – 6.0) произошли на значительно больших расстояниях от наблюдательных скважин (318–815 км) и не сопровождались ощутимыми сотрясениями.

Таблица 2. Результаты барометрического и приливного анализа вариаций уровня воды по данным наблюдений на скважинах Камчатки в январе–апреле 2006 г.

Скважина	Результаты кросс-спектрального анализа вариаций уровня воды и атмосферного давления			Результаты приливного анализа вариаций уровня воды	
	Квадрат модуля спектра когерентности	Барометрическая эффективность, см/гПа	Разность фаз, Δφ, град	Выделенные волны по [10]	Приливная чувствительность уровня воды A_v , см/ 10^{-9}
1303	0.85	0.43	–178	O_1, N_2, M_2, S_2K_2	0.214
1306	0.80	0.20	–162	–	–
1309	0.79	0.45	–166	O_1, N_2, M_2, S_2K_2	0.099
1311	0.14	0.18	–170	O_1, N_2, M_2, S_2K_2	0.300
ЮЗ-5	0.92	0.39	–179	$Q_1, O_1, 2N_2, N_2, M_2, S_2K_2$	0.158
E1	0.50	0.01	–106	–	–

ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ В ПЕРИОД ОЛЮТОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

На рис. 2 представлены результаты обработки данных наблюдений на ближайшей к эпицентру скв. 1309 ($R = 748$ км). Рассматривается интервал времени 11–30 апреля, включающий Олюторское землетрясение. В изменениях уровня воды присутствуют барометрические, приливные вариации и фрагменты сезонного тренда. На рис. 2 также показан ряд уровня воды с компенсированными баровариациями по алгоритму [9] и низкочастотный тренд. Тренд выделялся путем фильтрации временного ряда “уровень компенсированный” с удалением спектральных составляющих с периодами 7–13 и 23–30 ч с использованием идеального фильтра. Ниже представлены временные ряды осадков и температуры воздуха по данным наблюдений на метеостанции Пионерская Камчатского управления по гидрометеорологии и контролю состояния окружающей среды.

В изменениях временных рядов “уровень компенсированный” и “тренд” четко выделяется понижение уровня воды в течение четырех суток с амплитудой 10 см после землетрясения. Такое понижение было вызвано прохождением сейсмических волн от Олюторского землетрясения и указывает на временное снижение флюидного давления в контролируемом резервуаре подземных вод. Механизм понижения уровня мог быть связан с влиянием депрессии флюидного давления вследствие локального увели-

чения проницаемости водовмещающих пород вблизи скважины при сейсмических сотрясениях [1]. С 25 апреля началось восстановление уровня воды, на которое наложился восходящий сезонный тренд, вызванный началом весеннего питания подземных вод. Перед землетрясением аномальные изменения уровня воды не проявлялись.

На рис. 3 представлены выделенные тренды в часовых вариациях уровня воды во всех шести наблюдательных скважинах. На рис. 4 показаны вызванные Олюторским землетрясением вариации уровня воды с дискретностью 10 мин в четырех скважинах, которые дают более ясное представление об их характере.

Воздействие сейсмических волн Олюторского землетрясения четко проявилось в изменениях уровня воды в скважинах 1309, 1306 и ЮЗ-5 (рис. 3). В скв. 1306 наблюдалось понижение уровня воды с амплитудой 3 см в течение двух суток. Резкий характер понижения уровня воды в течение первых четырех часов после землетрясения объясняется более интенсивным падением порового давления вблизи скважины и меньшим его падением на некотором удалении от скважины. Можно предположить, что прохождение сейсмических волн способствовало очищению короткого дырчатого фильтра скважины 1306 от мелкодисперсных фракций и улучшению гидравлической связи скважины и резервуара подземных вод. Перед землетрясением аномальные изменения уровня воды не обнаружены.

В скважине ЮЗ-5 после землетрясения наблюдалось повышение уровня воды в течение двух су-

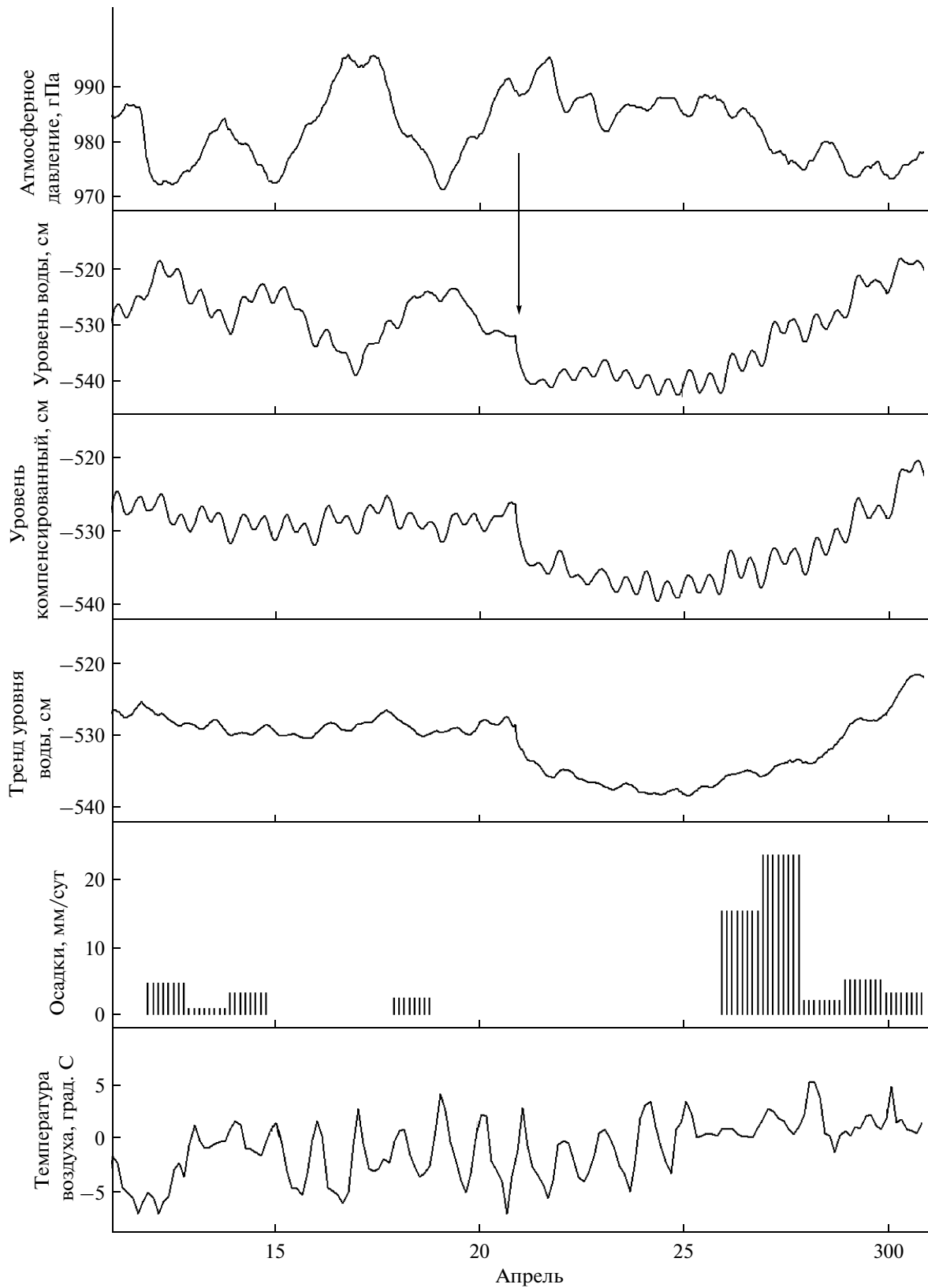


Рис. 2. Изменения уровня воды в скважине 1309 11–30 апреля 2006 г. в сопоставлении с данными метеонаблюдений. Стрелкой показан момент Олюторского землетрясения.

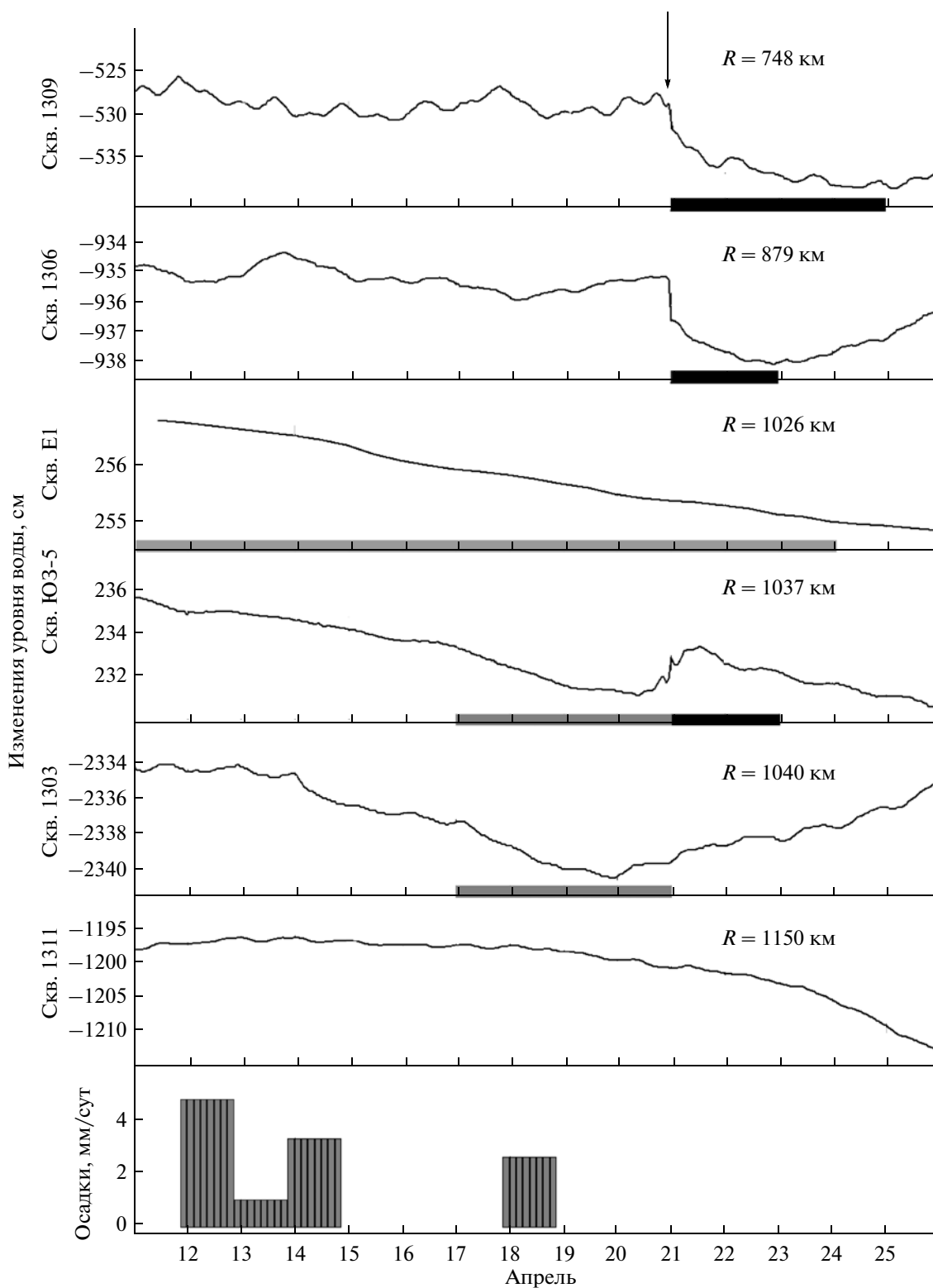


Рис. 3. Изменение трендов уровня воды в наблюдательных скважинах в период Олюторского землетрясения 20.04.2006 г., $M_w = 7.6$ (показано стрелкой). Черными горизонтальными линиями отмечены интервалы времени проявления постсейсмических изменений уровня воды; серыми горизонтальными линиями – вариации уровня воды перед Олюторским землетрясением. R – гипоцентрального расстояния до скважины.

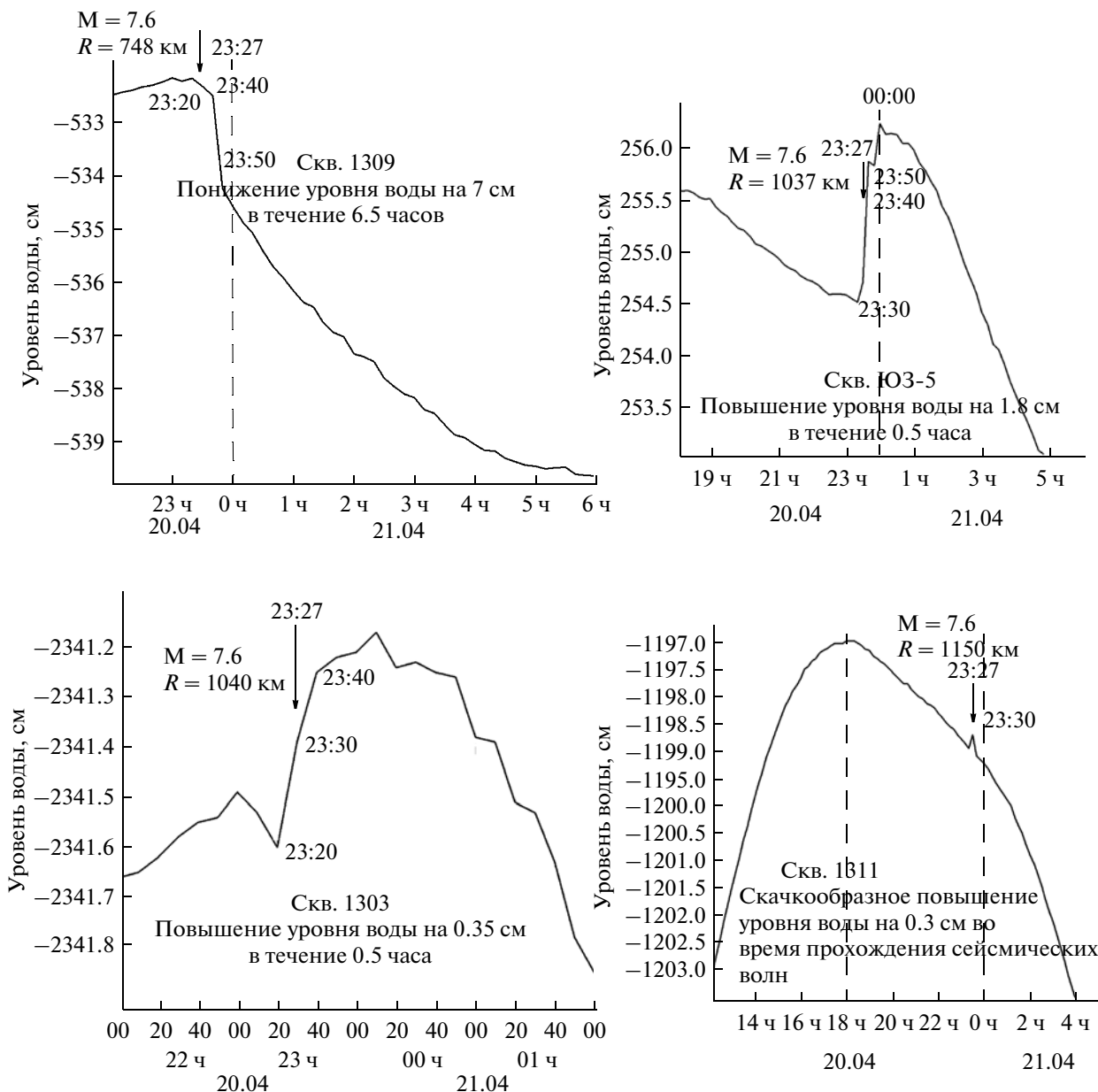


Рис. 4. Вариации уровня воды в скважинах 1309, ЮЗ-5, 1303 и 1311, вызванные прохождением сейсмических волн Олюторского землетрясения по данным регистрации с дискретностью 10 мин. R – гипоцентрального расстояния до скважины.

ток с амплитудой 1.3 см (рис. 3), которое объясняется кратковременным увеличением порового давления во вскрытом резервуаре подземных вод. По данным регистрации с дискретностью 10 мин установлено, что максимальная скорость повышения уровня наблюдалась в течение первых 30 минут после землетрясения (рис. 4). В изменениях тренда уровня воды с 17 по 20 апреля, т. е. в течение четырех суток перед Олюторским землетрясением, проявилось бухтообразное понижение с амплитудой 1 см (выделено серой горизонтальной линией на рис. 3), которое могло быть вызвано деформацией расширения водовмещающих пород.

Влияние Олюторского землетрясения на изменение уровня воды в скважинах 1303 и 1311 по среднечасовым данным не обнаруживается. Но по данным регистрации с дискретностью 10 мин выделяются слабые эффекты изменения уровня воды, вызванные прохождением сейсмических волн (рис. 4). Следует отметить, что в поведении тренда уровня воды в скв. 1303 выделяется его понижение с 17 по 20 апреля с амплитудой 2 см (рис. 3), которое могло быть вызвано деформацией расширения водовмещающих пород (так же, как и для района скважины ЮЗ-5).

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ЯНВАРЕ–АПРЕЛЕ 2006 г. И ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИИ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

По данным многолетних наблюдений на скважине Е1 выявлен “тревожный признак”, проявляющийся перед сильными землетрясениями в увеличении скорости понижения уровня воды [3, 7]. Предполагается, что механизм таких понижений уровня на стадиях подготовки землетрясений связан с развитием трещинной дилатансии в водовмещающих породах, увеличением их емкости и снижением порового давления [5].

С 16 февраля по 2 марта 2006 г. понижение уровня воды с повышенной скоростью (≤ -0.1 см/сут) наблюдалось в течение 15 суток. В конце этого периода 02.03.2006 г. произошло землетрясение с $M = 5.0$ на гипоцентральной расстоянии 111 км до скважины Е1 (рис. 1а, 5).

С 1 февраля по 2 марта также выявлены синхронные изменения уровня воды в близко расположенных скважинах 1303 и ЮЗ-5 (рис. 1а). На рис. 6 представлены среднечасовые изменения уровня воды с компенсированным влиянием атмосферного давления, а также спектральные компоненты вариаций уровня в обеих скважинах с периодами 2–45 сут (48–1080 ч). Использование полосовой фильтрации в окне $1/48-1/1080$ ч⁻¹ позволяет очистить временные ряды уровня воды от приливных вариаций и частично от сезонного тренда.

С 1 февраля по 2 марта наблюдалось 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 (рис. 6, табл. 3). Такое изменение уровней можно объяснить развитием деформации расширения водовмещающих пород, сменившейся деформацией их сжатия. Величины деформации водовмещающих пород D_v , оцененные по амплитудам изменения уровня воды H_1 и H_2 (рис. 6), нормированным на приливную чувствительность A_v по формуле $D_v = -H/A_v$, составили в районе скважины ЮЗ-5: 3.2×10^{-8} и -5.7×10^{-8} ; в районе скважины 1303: 2.2×10^{-8} и -4.1×10^{-8} (табл. 3).

В скважинах 1303 и ЮЗ-5 с 17 по 20 апреля, т. е. непосредственно перед Олюторским землетрясением, произошло синхронное понижение уровня воды на фоне нисходящего тренда с амплитудами $H = -2$ см и -1 см соответственно. На рис. 3 они выделены серыми горизонтальными линиями. Оценки объемной деформации расширения водовмещающих пород D_v составляют 0.9×10^{-8} для района скв. 1303 и 0.6×10^{-8} для района скв. ЮЗ-5 (табл. 3). В скв. Е1 с 4 по 24 апреля (21 сут) проявлялся “тревожный признак” в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью (рис. 3, 5).

Большое расстояние от эпицентра Олюторского землетрясения до скважин ($R = 1026-1040$ км) делает маловероятным предположение о связи проявлений “тревожного признака” в изменениях уровня воды в скважине Е1 и бухтообразных понижений уровня в скважинах 1303 и ЮЗ-5 с процессом его подготовки в форме асейсмических движений в области очага. Но вполне вероятно, что такие изменения уровня воды в трех скважинах в апреле 2006 г. могли быть вызваны локальными изменениями напряженно-деформированного состояния контролируемых резервуаров подземных вод.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате Олюторского землетрясения в скважинах 1309, 1306, ЮЗ-5, 1309 и 1311 зарегистрированы изменения уровня воды, вызванные прохождением сейсмических волн (рис. 3, 4). На рис. 3 соответствующие интервалы времени показаны черными горизонтальными линиями. В скважинах 1309, 1306 и ЮЗ-5 такие изменения зарегистрированы как в среднечасовых вариациях, так и по данным с дискретизацией 10 мин; в скважинах 1303 и 1311 — только по данным с дискретизацией 10 мин. В наиболее близких к эпицентру скважинах (1309 и 1306) происходило понижение уровня воды, в более удаленных скважинах (ЮЗ-5 и 1303) — кратковременное повышение.

Такие изменения уровня воды объясняются временным изменением порового давления при деформации водовмещающих пород, вызванной прохождением сейсмических волн. При этом наиболее вероятным механизмом изменения порового давления является локальное изменение проницаемости водовмещающих пород и, возможно, фильтрационных связей в системе скважина-резервуар или в пределах контролируемых резервуаров подземных вод. Характер изменения уровня воды — его повышение или понижение, могло быть связано с особенностями сейсмических сигналов в районах скважин, их амплитудно-частотным составом. Продолжительность изменений гидродинамического режима скважин составляла от 2–4 суток до часов–минут. Амплитуды изменения уровня воды не превышали 10 см.

В целом воздействие Олюторского землетрясения на режим камчатских скважин можно оценить как незначительное. Вместе с тем, наличие таких вариаций уровня воды, вызванных прохождением сейсмических волн от сильного удаленного землетрясения, указывает на необходимость их учета при интерпретации данных уровнемерных наблюдений с целью поиска предвестников камчатских землетрясений.

На рис. 3 горизонтальными серыми линиями показаны вариации в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и Е1 перед Олюторским землетрясением. В скважине Е1 происходило понижение

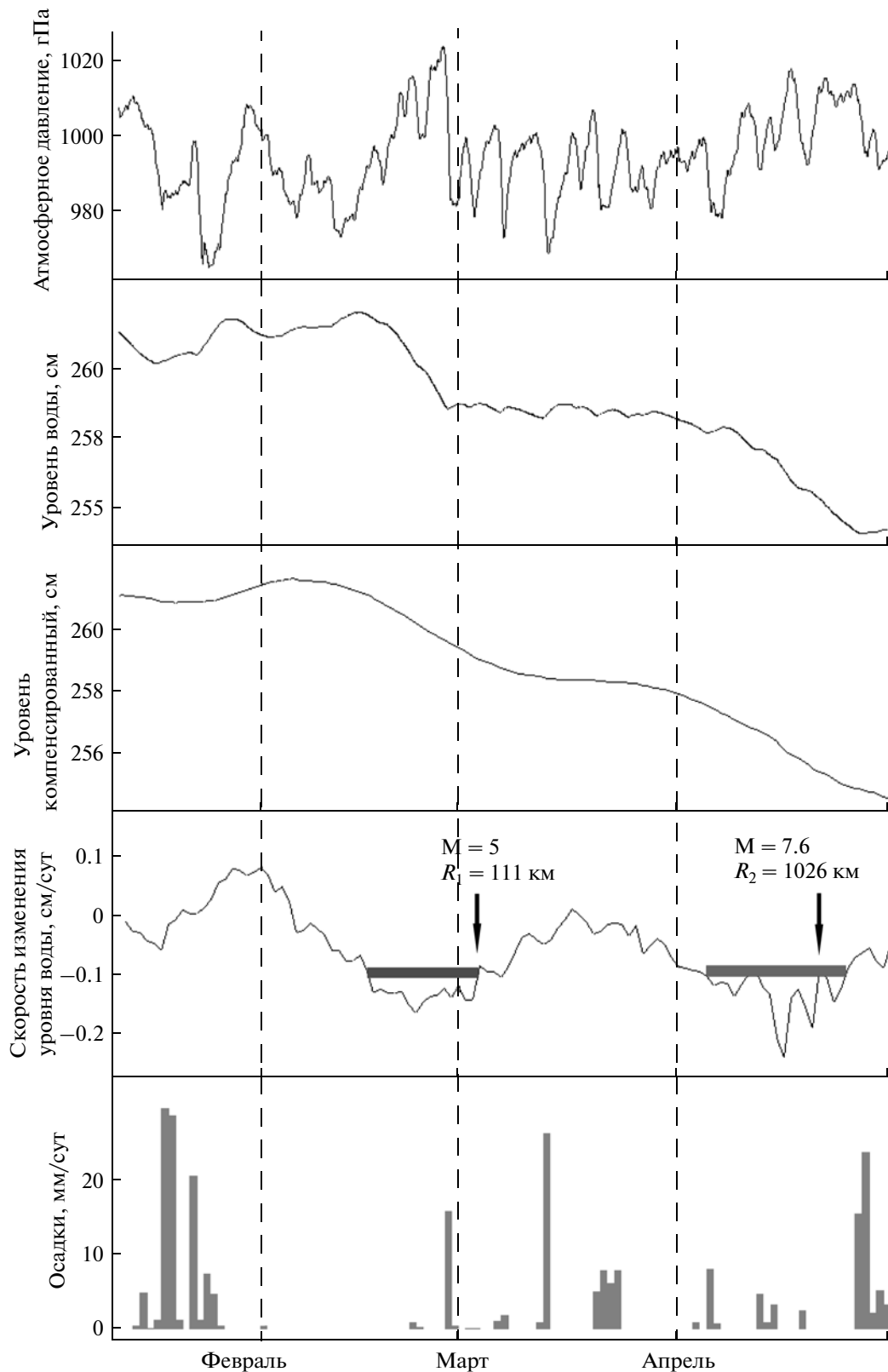


Рис. 5. Изменения уровня воды в скважине E1 в январе–апреле 2006 г. Интервалы времени проявления “тревожного признака” показаны темными горизонтальными линиями. R_1 – гипоцентральное расстояние до очага землетрясения 02.03.2006 г., R_2 – гипоцентральное расстояние до Олюторского землетрясения.

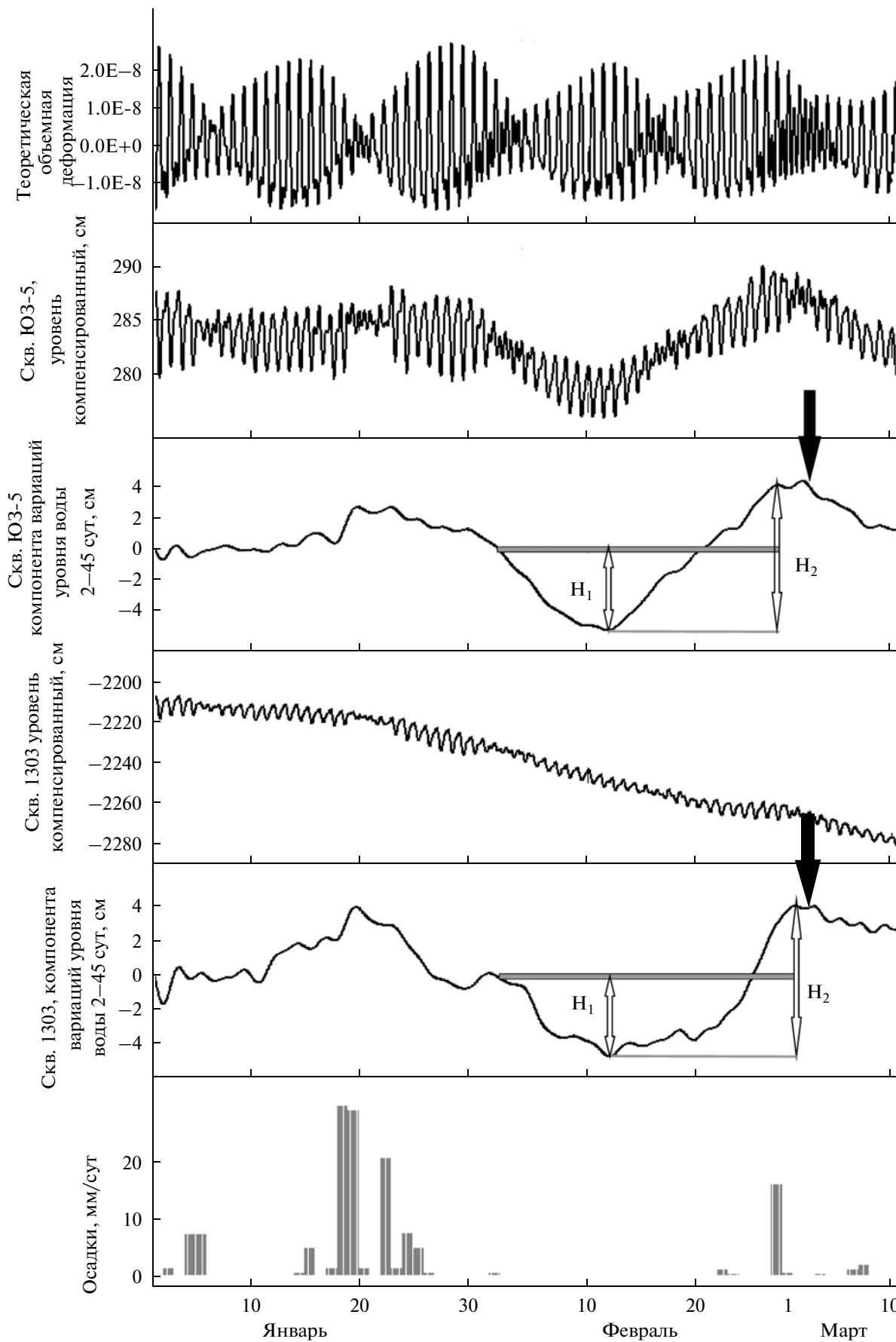


Рис. 6. Проявление синхронных изменений уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1303 с 1 февраля по 2 марта (показаны серыми горизонтальными линиями) в сопоставлении с изменением теоретической объемной деформации и осадками. H_1 , H_2 – амплитуды понижения и повышения уровня воды соответственно. Момент землетрясения 02.03.2006 г., $M = 5.0$, показан стрелкой.

уровня воды с повышенной скоростью в течение 4–24 апреля, в скважинах ЮЗ-5 и 1303 наблюдалось бухтообразное понижение уровня воды 17–20 апреля. Мы полагаем, что такие изменения уровня воды не связаны с развитием предсейсмических движений в области очага Олюторского землетрясения из-за его большой удаленности ($R = 1026–1040$ км), но они могли быть вызваны локальными изменениями напряженно-деформированного состояния контролируемых резервуаров подземных вод.

С 1 февраля по 2 марта в изменениях уровня воды в трех близко расположенных скважинах ЮЗ-5, 1303 и Е1 также проявлялись вариации, имеющие аномальный характер (рис. 5, 6). Их проявление могло быть связано с развитием асейсмических движений на прилегающем участке Камчатской сейсмофокальной зоны. В конце аномального периода (2 марта) произошло землетрясение с $M = 5$. В этом случае, выявленные вариации уровня воды в трех скважинах формально можно рассматривать в качестве гидрогеодинамического предвестника этого землетрясения.

По величинам выделенных амплитуд H_1 и H_2 (рис. 6) и величинам приливной чувствительности уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1303 (A_v) оценена объемная деформация водовмещающих пород D_v (табл. 3). В районе скважины ЮЗ-5 оцененные величины деформации расширения и сжатия систематически больше, по сравнению с соответствующей деформацией водовмещающих пород в районе скв. 1303. Это может быть связано с большей удаленностью скв. 1303 от области концентрации на-

пряжений, вызвавших последовательное развитие деформации расширения и сжатия. Отсюда следует, что концентратор напряжений располагался к востоку от скважин 1303 и ЮЗ-5, т. е. в области прилегающего участка сейсмофокальной зоны.

Однозначное утверждение о связи (или отсутствии такой связи) выявленных аномалий изменения уровня воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и Е1 в феврале–апреле 2006 г. с процессом подготовки Олюторского землетрясения представляется преждевременным, в первую очередь, из-за большой удаленности области очага. Вместе с тем, в ряде работ [3, 14] приводятся фактические данные о большом пространственном радиусе проявления гидрогеодинамических предвестников перед сильными землетрясениями. Дальнодействие гидрогеодинамических предвестников объясняется повышенной тензочувствительностью отдельных скважин к процессам подготовки землетрясений [2, 5, 12]. Обычно такие скважины расположены в зонах с относительно близким залеганием водоносных пластов, различающихся по величинам порового давления. Если перед землетрясениями развивается трещинная дилатансия в разделяющих слабопроницаемых слоях, то в этом случае фильтрационные связи между водоносными пластами улучшаются, и поровое давление выравнивается. Этот процесс может сопровождаться амплитудными вариациями уровня воды в скважинах.

Данные опробования скважин ЮЗ-5, 1303 и Е1, а также результаты многолетних режимных наблюдений, не дают оснований для их включения в чис-

Таблица 3. Аномальные изменения уровня воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и Е1 в январе–апреле 2006 г. и оценка объемной деформации водовмещающих пород

Скважина	Приливная чувствительность уровня воды по отношению к теоретической объемной деформации A_v , см/ 10^{-9}	Интервал времени аномального изменения уровня воды, дд.мм	Амплитуда изменения уровня воды, Н, см	Объемная деформация, D_v , 10^{-8}
ЮЗ-5	0.158	02.02–11.02	–5	3.2
		12.02–02.03	9	–5.7
		17.04–20.04	–1	0.6
1303	0.214	01.02–12.02	–4.8	2.2
		13.02–01.03	8.8	–4.1
		17.04–20.04	–2	0.9
Е1	–	16.02–02.03 04.04–24.04	Проявление “тревожного признака”: увеличение скорости понижения уровня воды ≤ -0.1 см/сут	

ло уникальных режимных объектов, обладающих повышенной тензочувствительностью. В скважине ЮЗ-5 гидрогеодинамический предвестник в форме бухтообразного понижения уровня воды с амплитудой 11 см был зарегистрирован лишь однажды, в течение трех недель перед Кроноцким землетрясением 5.12.1997 г., $M_w = 7.8$, $R = 320$ км [4]. Такой предвестник объясняется объемной деформацией расширения водовмещающих пород с амплитудой $\approx 0.75 \times 10^{-7}$ при развитии интенсивных пресейсмических движений в области очага Кроноцкого землетрясения. В изменении уровня воды в скважине Е1 “тревожный признак” проявлялся перед землетрясениями на гипоцентральных расстояниях, не превышающих 320 км [3, 7]. Эти данные показывают, что чувствительность скважин ЮЗ-5 и Е1 к процессам подготовки сильных землетрясений ($M \sim 7-8$) ограничивается первыми сотнями км.

Следует отметить, что проявление аномальных вариаций уровня воды в трех скважинах в феврале 2006 г. (рис. 5, 6; табл. 3) и их совпадение по времени с землетрясением 2 марта с $M = 5$ является уникальным событием. Землетрясения такого энергетического класса в данном районе происходят достаточно часто и ранее не сопровождалось аномальными вариациями уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и 1303. Это свидетельствует о том, что аномальные изменения уровня воды в трех скважинах, а возможно, и само землетрясение 02.03.2006 г. являются проявлениями 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Распространение сейсмических волн от Олюторского землетрясения 20.04.2006 г., $M_w = 7.6$ вызвало постсейсмические изменения уровня воды в пяти скважинах, расположенных в континентальных районах полуострова Камчатка на гипоцентральных расстояниях 748–1050 км. В ближайших к эпицентру скважинах 1309 и 1306 уровень воды понижался в течение четырех и двух суток с амплитудами 10 и 3 см. В более удаленных скважинах ЮЗ-5, 1303 и 1311 уровень воды повышался в течение первых десятков минут с амплитудами 0.3–1.8 см. В целом, воздействие Олюторского землетрясения на режим наблюдательных скважин ОАО “Камчатгеология” и КФ ГС РАН оказалось незначительным.

2. С использованием специальных методов обработки данных уровневых наблюдений, включающих компенсацию баровариаций в изменениях уровня воды и фильтрацию очищенного от баровариаций временного ряда, выделены аномальные изменения уровня воды в скважинах ЮЗ-5, 1303 и

Е1, проявившиеся в период, предшествующий Олюторскому землетрясению с 1 февраля по 2 марта и с 17 по 20 апреля 2006 г.

На основе результатов барометрического и приливного анализа вариаций уровня воды установлены статически изолированные условия для скважин ЮЗ-5 и 1303 в диапазоне периодов часы – первые десятки суток. Это позволяет использовать амплитуды выделенных вариаций уровня воды в указанном диапазоне периодов для оценки деформации водовмещающих пород. Выполнена количественная оценка величин деформации по выделенным амплитудам изменения уровня воды и его приливной чувствительности по отношению к теоретической объемной деформации (табл. 3). Характер деформации водовмещающих пород оценивался по направлению изменения уровня воды.

Для проверки точности использованного метода локальной оценки деформации водовмещающих пород по данным уровневых наблюдений необходимо провести одновременную регистрацию уровня воды и трех компонент деформации непосредственно в районах скважин. По литературным данным точность такого способа оценки деформации водовмещающих пород составляет порядка 50% [12, 13].

3. Возможная связь аномальных вариаций уровня воды в скважинах Е1, ЮЗ-5 и 1303 в феврале–апреле 2006 г. с подготовкой Олюторского землетрясения и землетрясения 02.03.2006 г., $M = 5$ может быть обусловлена активизацией преимущественно асейсмических геодинамических процессов в пределах Камчатской сейсмофокальной зоны. В качестве объяснения механизмов формирования аномальных вариаций уровня воды рассматриваются развитие трещинной дилатансии в водовмещающих породах (скважина Е1) и квазиупругая деформация их расширения и сжатия (скважины 1303 и ЮЗ-5).

Авторы выражают благодарность д. г.-м. н. А.В. Кирюхину и к. ф.-м. н. П.П. Фирстову за полезное обсуждение работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Механизмы отклика уровня воды в скважинах на сейсмические воздействия // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока, Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 50–54.
2. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58–69.
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. 53–63.
5. Копылова Г.Н. Сейсмичность как фактор формирования режима подземных вод // Вестник КРАУНЦ. Серия науки о Земле. 2006. № 1. Вып. № 7. С. 50–66.
6. 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.
7. Копылова Г.Н. Оценка сейсмопрогностической информативности данных уровнемерных 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.
8. Ландер А.В., Левина В.И., Иванова Е.И. Олюторское землетрясение 20 (21) апреля 2006 г. $M_w = 7.6$: сейсмическая история региона и предварительные результаты исследования серии афтершоков // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 14–33.
9. Любушин А.А. Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. № 3. С. 103–108.
10. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
11. Пинегина Т.К., Константинова Т.Г. Землетрясение в Корякии // Природа. 2006. № 9. С. 57–61.
12. Roeloffs E. Hydrologic precursors to earthquakes: A review // Pure Appl. Geophys. 1988. V. 126. P. 177–209.
13. 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.
14. Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM. 1994. № 118. P. 8719–8721.

Water Level Changes in the Wells of Kamchatka at the Time of the $M_w = 7.6$ April 20, 2006 Olyutorskii Earthquake

G. N. Kopylova¹, N. N. Smolina²

¹*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

²*Kamchatgeologiya OAO, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

The seismic waves excited by the $M_w = 7.6$ Olyutorskii earthquake which occurred April 20, 2006 in the Korjak Upland gave rise to water level changes in five wells situated in continental areas of Kamchatka at hypocentral distances of 750–1150 km. We describe the effects due to seismic waves, as well as the water level anomalies for February–April 2006 before the earthquake. We used an original technique for the processing of water level records based on the study of barometric and tidal responses of water level to estimate the volume strain in water-bearing rocks during synchronous level variations at two wells. We discuss possible mechanisms for producing anomalous water level changes due to elastic deformation of monitored underground water reservoirs and to crack dilatancy in the water-bearing rocks.