

<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0321>

EFFECTS OF THE JANUARY 30, 2016, $M_w=7.2$ ZHUPANOVSKY EARTHQUAKE ON THE WATER LEVEL VARIATIONS IN WELLS YUZ-5 AND E-1 IN KAMCHATKA

S. V. Boldina, G. N. Kopylova

*Kamchatka Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS',
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Abstract: This paper describes the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka during the Zhupanovsky earthquake that occurred on January 30, 2016 ($M_w=7.2$, $H=180$ km). The distances from the Zhupanovsky earthquake epicenter to wells E-1 and YuZ-5 were 70 and 80 km, respectively. In well YuZ-5, the water level raised by 9.4 cm during 45 minutes after the seismic wave arrival. This effect was caused by a combination of a co-seismic rise in the water level due to the volumetric compression of the water-bearing rocks during fracturing in the earthquake source and an impulse increase in the fluid pressure near the wellbore during the seismic shocks. We estimated the amplitude of the coseismic water level increase ($\Delta h=7.3$ cm) and the strain value resulting from the volumetric compression of the water-bearing rocks, which is consistent with the estimated value of the coseismic volumetric deformation in the area of the well at the depth of 500m: $D_1 = -4.5 \cdot 10^{-8}$. This estimation was based on the model of the dislocation source in the homogeneous isotropic elastic half-space with the parameters of the Zhupanovsky earthquake focal mechanism. After the earthquake, the water level dropped for three months at an amplitude of about ~ 40 cm. In order to estimate the radius of the well sensitivity to the pressure drop source, we used the model of water level lowering that followed the pressure drop in the aquifer at a distance to the well as a result of the improved filtration properties of the water-bearing rocks after the seismic shocks. The estimated radius of the well sensitivity, R is 450 m. For 3.5 months before the Zhupanovsky earthquake, ~ 20 cm increase in the water level was observed, which is anomalous in comparison with the average seasonal variations of the water level, as shown by the long-term observations. In our opinion, such a rise in the water level occurred in the process of the earthquake preparation, and can thus be viewed as its precursor. In well E-1, a sequence of water level changes manifested a hydrogeodynamic precursor: the water level dropped at an increased rate for 21 days before the earthquake, and raised at an amplitude of 3.7 cm during one month after the earthquake. The hydrogeodynamic precursor detected in real time gave grounds for forecasting a highly probable strong earthquake at a distance of up to 350 km from wells E-1 within a month. This forecast was reported to the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council (KB REC) on January 21, 2016. The Zhupanovsky earthquake occurred on January 30, 2016, and its magnitude, time and location correlated with the prediction. The case of this earthquake shows that the Kamchatka Branch of the Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS' has the system of water level observations and data processing, which is capable of diagnosing (close to real time and retrospectively) different types of hydrogeoseismic variations in the water level in wells in case of strong seismic events, and detecting the hydrogeodynamic precursors of strong earthquakes.

Key words: well; water level; earthquake; precursor; coseismic deformation; post-seismic water level change; Kamchatka

RESEARCH ARTICLE

Recommended by V.V. Ruzhich

Received: May 23, 2017

Revised: October 26, 2017

Accepted: November 13, 2017

For citation: Boldina S.V., Kopylova G.N., 2017. Effects of the January 30, 2016, $M_w=7.2$ Zhupanovsky earthquake on the water level variations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 863–880. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0321.

Для цитирования: Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w=7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 863–880. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0321.

Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w=7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка

С. В. Болдина, Г. Н. Копылова

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая Геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия

Аннотация: В статье приводится описание изменений уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка, во время 5-балльного Жупановского землетрясения 30 января 2016 г. $M_w=7.2$, $H=180$ км. Эпицентральные расстояния от Жупановского землетрясения до скважин составляли 70 км (Е-1) и 80 км (ЮЗ-5). В скважине ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн уровень воды повышался в течение 45 минут с амплитудой 9.4 см. Такой эффект был вызван наложением косейсмического скачка повышения уровня вследствие объемного сжатия водовмещающих пород во время образования разрыва в очаге землетрясения и импульсного увеличения флюидного давления вблизи ствола скважины при сейсмических сотрясениях. Оценена амплитуда косейсмического повышения уровня ($\Delta h=7.3$ см) и величина деформации объемного сжатия водовмещающих пород $D_1 = -4.5 \cdot 10^{-8}$, что согласуется с оценкой объемной косейсмической деформации в районе скважины на глубине 500 м $D_2 = -4.6 \cdot 10^{-8}$ по модели дислокационного источника в однородном упругом изотропном полупространстве с параметрами механизма очага Жупановского землетрясения. После землетрясения уровень понижался в течение трех месяцев с амплитудой ~ 40 см. С использованием модели понижения уровня воды, вызванного падением напора в водоносном горизонте на некотором удалении от скважины за счет улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях, определен радиус чувствительности скважины к источнику падения напора ($R=450$ м). Перед Жупановским землетрясением в течение 3.5 месяца отмечалось повышение уровня воды с амплитудой ~ 20 см, которое является аномальным по отношению к среднесезонному поведению уровня воды за многолетний период. Предполагается, что такое повышение уровня воды вызвано процессом подготовки землетрясения и является его предвестником. В скважине Е-1 в изменениях уровня воды последовательно проявился гидрогеодинамический предвестник в форме понижения уровня с повышенной скоростью в течение 21 суток перед землетрясением и повышение уровня с амплитудой 3.7 см в течение месяца после землетрясения. С использованием гидрогеодинамического предвестника, выявленного в реальном времени, был составлен и передан в Камчатский филиал Российского экспертного совета 21 января 2016 г. прогноз о повышенной вероятности сильного землетрясения на расстоянии до 350 км от скв. Е-1 в течение месяца. Жупановское землетрясение соответствовало этому прогнозу по величине магнитуды, по времени и по местоположению. Пример Жупановского землетрясения показывает, что используемая в КФ ФИЦ ЕГС РАН система равномерных наблюдений и обработки данных позволяет диагностировать в режиме, близком к реальному времени, и ретроспективно различные типы гидрогеосейсмических вариаций уровня воды при сильных землетрясениях, в том числе их гидрогеодинамические предвестники.

Ключевые слова: скважина; уровень воды; землетрясение; предвестник; косейсмическая деформация; постсейсмическое изменение уровня воды; Камчатка

1. ВВЕДЕНИЕ

Сильные землетрясения сопровождаются разнообразными вариациями уровней воды в скважинах. Их описание приводится в многочисленных работах, например в [Kopylova, 2001, 2006; Kopylova, Boldina, 2007, 2015; Kopylova et al., 2012; Chia et al., 2008; Kitagawa et al., 2006; Shi et al., 2015; Wang, Manga, 2010; Wang et al., 2001; и др.].

В работе [Kopylova, 2006] изменения уровней воды в скважинах при землетрясениях отнесены к гидрогеосейсмическим вариациям физико-химиче-

ских параметров подземных вод. Кроме того, показано, что особенности их проявления определяются различными видами сейсмического воздействия на состояние системы «скважина – водовмещающая порода».

Образование разрывов в очагах землетрясений сопровождается изменениями статического поля напряжений и соответствующими вариациями напряженно-деформированного состояния водовмещающих пород, которые могут проявляться в косейсмических скачках уровня воды в течение короткого периода времени после землетрясения

(первые минуты) [Kopylova et al., 2010]. При этом направление изменения уровня воды, его повышение или понижение, определяется характером квазиупругой деформации водовмещающих пород в соответствии с механизмом очага землетрясения.

Распространение сейсмических волн от сильных землетрясений сопровождается динамической деформацией водовмещающих пород и сотрясениями ствола скважины, которые также могут вызывать разнообразные ко- и постсейсмические изменения уровня воды в скважинах – колебания, повышения и понижения различной интенсивности и продолжительности.

В скважинах, расположенных в ближних зонах будущих очагов сильных землетрясений, могут проявляться гидрогеодинамические предвестники в изменениях уровня воды вследствие квазиупругого деформирования водовмещающих пород, развития в них дилатансии, а также других процессов, приводящих к изменениям фильтрационных свойств геосреды и характера фильтрации подземных вод в районах скважин на стадиях подготовки землетрясений.

При изучении вариаций уровня воды при сильных землетрясениях основное внимание обычно уделяется их описанию с учетом гидрогеодинамических процессов их формирования в системе «скважина – водовмещающая порода» и общей оценке воздействия землетрясений на состояние флюидонасыщенной геологической среды. В работах последних лет [Besedina et al., 2016; Chia et al., 2008; Kitagawa et al., 2006; Shi et al., 2015; Wang, Manga, 2010; и др.] рассмотрены результаты прецизионных измерений уровней воды с применением технических средств с высоким разрешением по частоте и показано многообразие проявлений гидрогеосейсмических вариаций уровней в скважинах, расположенных в основном на расстояниях более одной длины очага, т.е. в «дальней зоне» очагов сильных землетрясений. Такие эффекты связаны главным образом с динамическим воздействием сейсмических волн на состояние системы «скважина – водовмещающая порода». Как показано в работах [Wang, Manga, 2010; Kopylova et al., 2012; и др.], особенности их проявления в отдельных скважинах определяются параметрами землетрясений – соотношением величин магнитуды и гипоцентрального расстояния, а также локальными гидрогеологическими условиями – составом и свойствами водовмещающих пород, составом подземных вод и наличием в них свободного газа.

Значительно меньше достоверных данных имеется о гидрогеосейсмических вариациях уровня воды в ближних зонах очагов землетрясений, в частности о косейсмических скачках уровня воды, вызванных изменением статического напряженно-

го состояния водовмещающих пород при образовании разрывов в очагах. Также имеются лишь единичные примеры проявления гидрогеодинамических предвестников в изменениях уровней воды на стадиях подготовки сильных землетрясений. Вместе с тем именно гидрогеодинамические эффекты, проявляющиеся перед землетрясениями в скважинах, расположенных в ближней зоне, представляют особый научный и практический интерес в связи с возможностью их использования для уточнения времени сильных сейсмических событий.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) проводит многолетние уровнемерные наблюдения в скважинах ЮЗ-5 (53.17° с. ш., 158.41° в. д., глубина 800 м, уровень на глубине 1 м ниже оголовка) и Е-1 (координаты 53.26° с. ш., 158.48° в. д., глубина 665 м, уровень на глубине 27 м) (рис. 1) с целью поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений с использованием измерительных комплексов Кедр ДМ-У (ООО Полином, г. Хабаровск), обеспечивающих синхронную регистрацию уровня воды и атмосферного давления с периодичностью опроса 5 мин. Действующая система сбора и обработки данных позволяет проводить наблюдения в режиме, близком к реальному времени, с точностью измерений вариаций уровня воды ± 0.1 см и атмосферного давления ± 0.1 гПа [Kopylova et al., 2017].

Описание гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, зарегистрированных в скважинах ЮЗ-5 и Е-1 при сильных местных и удаленных землетрясениях, приводится в работах [Kopylova, 2001, 2006; Kopylova et al., 2012; и др.].

30 января 2016 г. на Камчатке произошло землетрясение с магнитудой $M_w=7.2$, $H=180$ км (рис. 1, а, таблица) на эпицентральных расстояниях от скважин ЮЗ-5 и Е-1 $d_e=70-80$ км (гипоцентральные расстояния $d_g=195-200$ км). Вступление сейсмических волн от этого землетрясения было зарегистрировано на ближайшей сейсмостанции Петропавловск (РЕТ) (рис. 1, а) в 03 ч 25 мин. Интенсивность сотрясений в районах скважин составила 5 баллов по шкале MSK-64 [Medvedev et al., 1965]. В статье [Chebrov et al., 2016], посвященной описанию этого землетрясения, оно было названо Жупановским.

В работе представлено описание изменений уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, которые предшествовали Жупановскому землетрясению, а также развивались в момент его реализации и после. Приводится информация о прогнозе землетрясения с заблаговременностью девять суток с использованием гидрогеодинамического предвестника, выделенного в изменениях уровня воды в скв. Е-1.

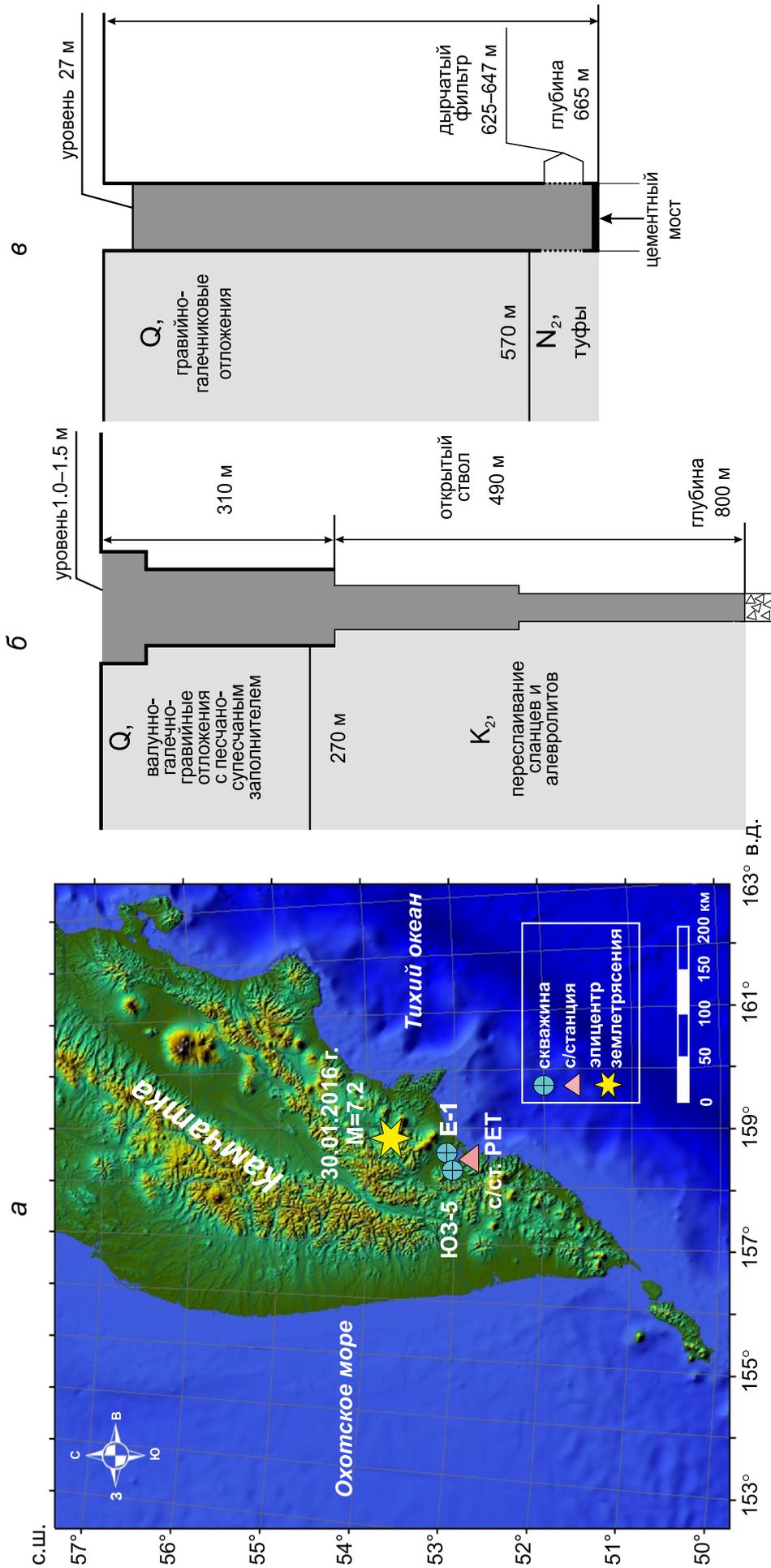


Рис. 1. Расположение скважин и эпицентра землетрясения 30 января 2016 г. (а) (таблица); схемы строения скважины ЮЗ-5 (б) и скважины E-1 (в).

Fig. 1. Locations of the wells and the 30 January 2016 Zhupanovsky earthquake epicenter (а) (Table); б, в – schemes of wells YuZ-5 and E-1, respectively.

Параметры Жупановского землетрясения 30 января 2016 г. [Chebrov et al., 2016; The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017; National Earthquake Information Center, 2017]

Parameters of the Zhupanovsky earthquake of January 30, 2016 [Chebrov et al., 2016; The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017; National Earthquake Information Center, 2017]

Дата дд.мм.гг	Время чч:мм	Координаты гипоцентра			Энергетический класс/магнитуда					
		с.ш	в.д.	Н, км	КФ ФИЦ ЕГС РАН			Global CMT	NEIC	
					K _s	M _L	M _c	M _w	m _b	M _w
30.01.16	03:25	53.85	159.04	180	15.7	7.1	7.1	7.2	6.7	7.2

2. ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ ЮЗ-5

Скважина ЮЗ-5 (рис. 1, б) вскрывает подземные воды в трещиноватых алевролитах поздне мелового возраста, образующих гидравлически связанный напорный водоносный комплекс (НВК), перекрытый толщей рыхлых пирокластических отложений четвертичного возраста, содержащих преимущественно безнапорные подземные воды (грунтовый водоносный комплекс – ГВК). Схема гидрогеологических условий и формирования гидростатического напора в районе скважины представлена на рис. 2, а. Изменения напора в районе скважины определяются изменением высоты столба воды в области питания в течение года (Δh) за счет инфильтрации метеорных вод в водоносный комплекс четвертичных отложений и подземного стока, а также преимущественно упругой передачей изменяющегося давления в области питания в район скважины.

На рис. 2, б, приводится среднесезонная функция изменений уровня воды в скв. ЮЗ-5 с дискретизацией в одни сутки, полученная осреднением многолетних данных наблюдений после компенсации в них барометрических вариаций и линейного тренда. Ежегодно повторяющиеся фазы сезонных изменений уровня воды характерны для режима сезонного, преимущественно весеннего и осеннего, питания подземных вод с четко выраженным предвесенним минимумом и летним максимумом и менее выраженными осенне-зимним максимумом и осенним минимумом [Kovalevsky, 1973]. Такие особенности режима скважины, а также низкая минерализация воды показывают, что подземные воды в НВК находятся в зоне активного водообмена. В связи с этим при выделении относительно долговременных гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в этой скважине, составляющих сутки – месяцы, необходимо учитывать сезонные закономерности влияния на изменения уровня гидродинамических факторов формирования напора, питания и разгрузки подземных вод (рис. 2, б) [Kopylova, Sizova, 2010].

Процессы перетекания подземных вод между безнапорным ГВК и НВК также могут влиять на формирование гидростатического напора в скв. ЮЗ-5. Однако роль этого процесса представляется менее значимой, по сравнению с влиянием внутригодовых изменений высоты водного столба в области питания, из-за различия в величинах коэффициентов фильтрации соответствующих гидрогеологических подразделений (рис. 2, а).

Основными компонентами вариаций уровня воды в скв. ЮЗ-5 являются слабо выраженные тренды понижения и повышения в течение 2–4 лет, регулярные годовые сезонные вариации с амплитудами до 50–40 см (рис. 2, б), повышения уровня после выпадения обильных (десятки мм/сут) жидких осадков, а также барометрические и приливные вариации. Тренды и сезонные вариации уровня воды связаны с закономерностями формирования гидростатического напора в районе скважины в течение года и за многолетний период (рис. 2), а также с особенностями питания и разгрузки НВК. Кратковременные повышения уровня с амплитудами до 2 см после выпадения осадков интенсивностью ≥ 10 –20 мм/сут вызываются увеличением поверхностной нагрузки на кровлю напорного водоносного горизонта. В относительно высокочастотном диапазоне периодов вариаций присутствуют суточные и полусуточные приливные колебания уровня воды с амплитудами до 8 см [Kopylova, 2006].

2.1. ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ВОДЫ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В СВЯЗИ С ЖУПАНОВСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ

Непосредственно после вступления сейсмических волн от Жупановского землетрясения (03:25) в течение 45 минут уровень повышался с амплитудой 9.4 см (рис. 3, б) из-за наложения косейсмического скачка повышения уровня вследствие объемного сжатия водовмещающих пород при образовании разрыва в очаге землетрясения и импульсного увеличения флюидного давления при

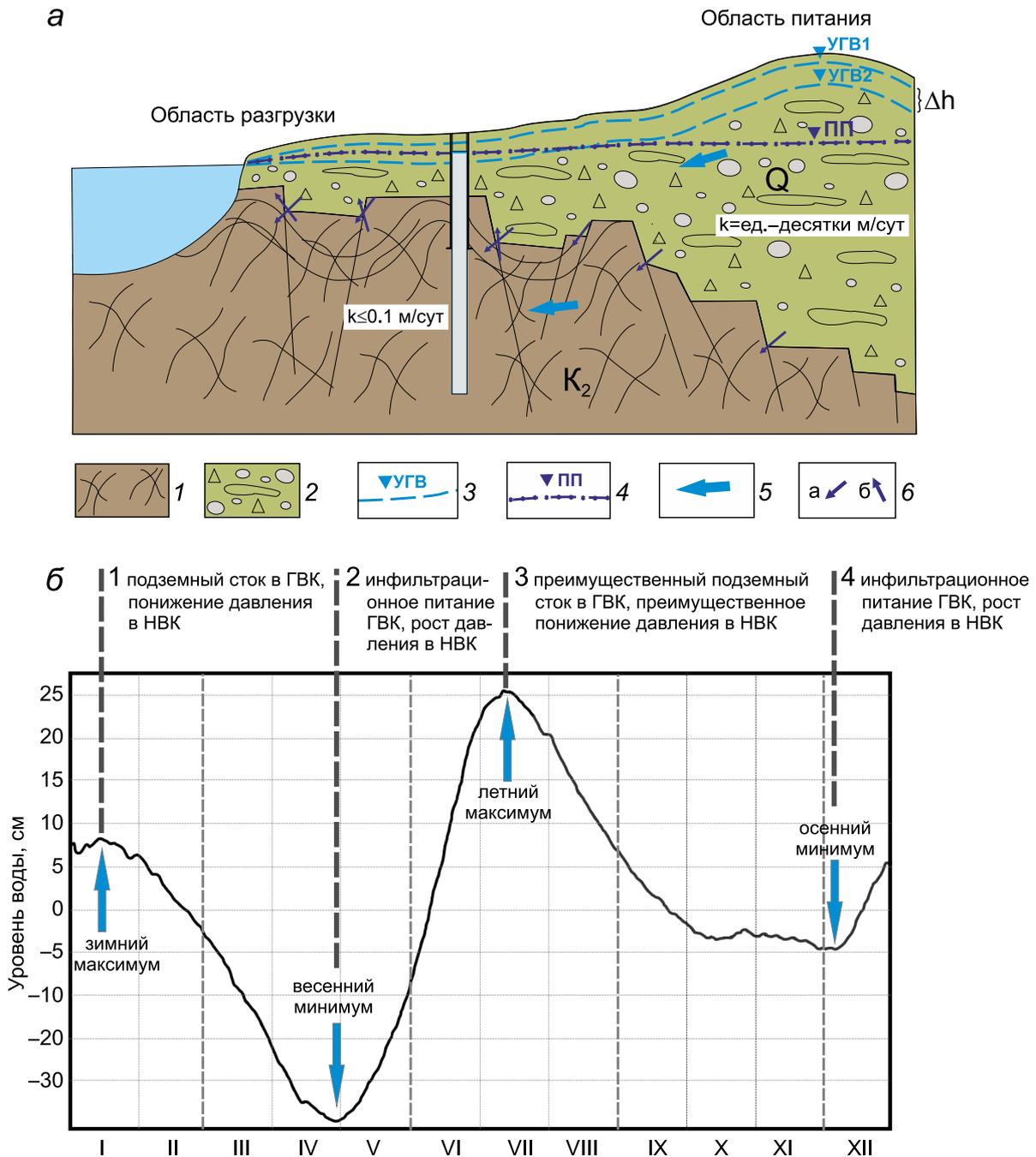


Рис. 2. Схема гидрогеологических условий и формирования сезонного гидростатического напора в скважине ЮЗ-5.

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 безнапорный водоносный комплекс – ГВК); 3 – уровень грунтовых вод и его изменение в течение года: УГВ1 – максимальное повышение в период весеннего снеготаяния и питания подземных вод, 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. Δh – изменение высоты столба воды в ГВК в течение года, k – величина коэффициента фильтрации в соответствующих гидрогеологических подразделениях; *b* – среднесезонная функция изменения уровня воды: цифры обозначают фазы гидродинамического режима с пояснениями.

Fig. 2. Hydrogeological conditions and formation of a seasonal hydrostatic head in well YuZ-5.

a – general scheme: 1 – aquifer complex of Late Cretaceous siliceous-volcanogenic formations, K_2 (pressure aquifer НВК); 2 – aquifer complex of Quaternary pyroclastic deposits, Q (non-pressure aquifer ГВК); 3 – groundwater level and its change during the year: УГВ1 – maximum increase in the period of spring snowmelt and groundwater supply, УГВ2 – the lowest position during the low-water period in winter and summer; 4 – piezometric surface of pressure aquifer НВК; 5 – direction of the regional groundwater flow; 6 – directions of local groundwater flows at the boundary between non-pressure aquifer ГВК and pressure aquifer НВК. Δh – change in the water column height in non-pressure aquifer ГВК during the year, k – hydraulic conductivity coefficient in the corresponding hydrogeological subdivisions; *b* – average seasonal function of water level variations (the phases of the hydrodynamic regime are numbered and explained).

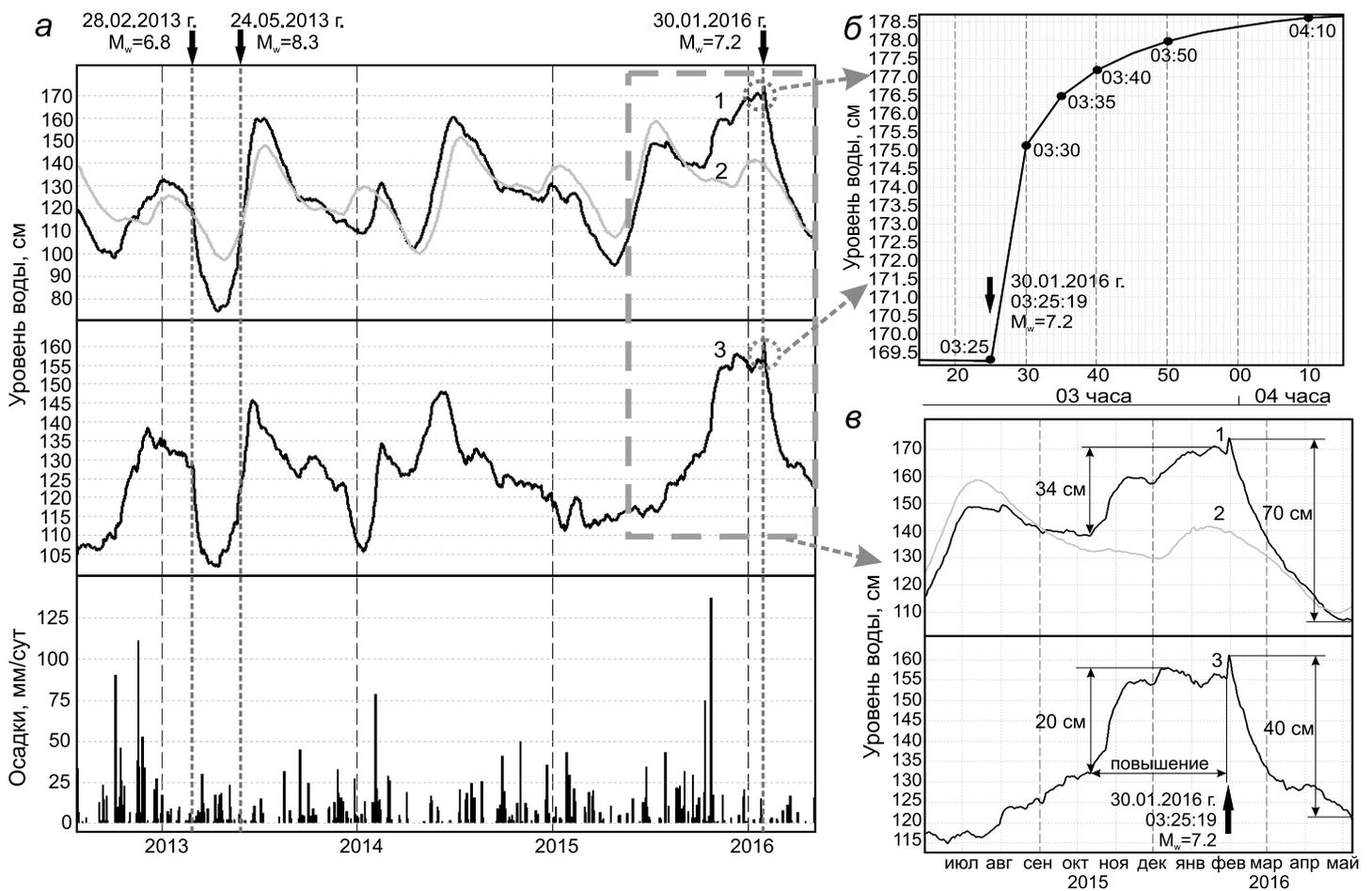


Рис. 3. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважине ЮЗ-5. *а* – изменения уровня воды в июле 2012 г. – мае 2016 г. в сопоставлении с осадками и землетрясениями с $M_w \geq 6.5$ (показаны стрелками). 1 – среднечасовые данные наблюдений с компенсированными баровариациями; 2 – сезонные вариации уровня воды совместно с линейным трендом; 3 – остатки в изменениях уровня воды после компенсации годовой сезонности и тренда (жирным пунктиром обозначен фрагмент графиков в период подготовки и реализации Жупановского землетрясения, см. рис. *в*); *б* – косейсмическое повышение уровня воды после вступления сейсмических волн (03:25); *в* – предположительно предвестниковые и постсейсмические изменения уровня воды в период подготовки и реализации Жупановского землетрясения.

Fig. 3. Hydrogeoseismic variations in the water level in well YuZ-5. *a* – water level changes in July 2012 – May 2016 in comparison with the precipitation values and earthquakes with $M_w \geq 6.5$ (shown by arrows). 1 – average hourly observed values with compensated barometric variations; 2 – seasonal variations in the water level and the linear trend; 3 – residuals in the water level changes after the compensation for the annual seasonal values and the trend (the bold dotted line indicates a fragment of the graphs during the period of preparation and occurrence of the Zhupanovsky earthquake, see Fig. *в*); *б* – co-seismic rise of the water level after the arrival of the seismic waves (03:25); *в* – assumed precursor-type and post-seismic changes in the water level during the period of preparation and occurrence of the Zhupanovsky earthquake.

прохождении сейсмических волн. Такой механизм формирования повышений (понижений) уровня воды продолжительностью до первых десятков минут после сильных землетрясений ранее рассматривался для скв. ЮЗ-5 в [Boldina, Kopylova, 2016; Kopylova et al., 2010].

После землетрясения в течение трех месяцев уровень понижался (рис. 3, *в*). С учетом характера его сезонного изменения в феврале – апреле (см. рис. 2, *б*), амплитуда постсейсмического понижения уровня оценивается в ≈ 40 см (рис. 3, *в*).

Анализ изменений уровня воды перед землетрясением с учетом внутригодовой среднесезонной функции и характера линейного тренда показывает наличие аномального повышения уровня по отношению к его сезонному поведению в течение сентября 2015 г. – января 2016 г. (рис. 3, *в*, верхняя диаграмма). Амплитуда повышения уровня в течение октября – декабря 2015 г. составила примерно 20 см (рис. 3, *в*, нижняя диаграмма).

Таким образом, в период подготовки и реализации Жупановского землетрясения в скв. ЮЗ-5 про-

являлись следующие типы гидрогеосейсмических вариаций уровня воды: 1 – предшествующее землетрясению повышение уровня в течение не менее четырех месяцев с амплитудой 20–30 см (предполагаемый гидрогеодинамический предвестник); 2 – повышение уровня воды в течение 45 мин с амплитудой 9.4 см вследствие косейсмического квазиупругого сжатия водовмещающих пород и импульсного увеличения флюидного давления при прохождении сейсмических волн; 3 – постсейсмическое понижение уровня в течение трех месяцев (февраль – апрель) с амплитудой ≈ 40 см вследствие существенного изменения фильтрационных свойств водовмещающих пород и процесса фильтрации подземных вод при воздействии сейсмических волн от Жупановского землетрясения.

2.2. О ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИХ ВАРИАЦИЙ УРОВНЯ ВОДЫ

Рассмотрим возможные механизмы образования выделенных ко- и постсейсмических эффектов в изменениях уровня воды при Жупановском землетрясении.

Механизм повышения уровня воды после вступления сейсмических волн (рис. 3, б) отражает суперпозицию косейсмического сжатия водовмещающих пород и соответствующего притока воды в ствол скважины и импульсного роста флюидного давления вследствие нелинейной фильтрации вблизи ствола скважины, которая также сопровождалась притоком воды в ствол скважины. Как показано в публикациях [Kocharyan et al., 2011; Brodsky et al., 2003], эффекты нелинейной фильтрации могут возникать за счет локальных неоднородностей фильтрационных свойств водовмещающих пород, примыкающих к стволу скважины.

Для описания повышения уровня (рис. 3, б) вследствие импульсного роста давления использовалась затухающая экспоненциальная функция, характеризующая процесс течения подземной воды без конкретизации пространственного изменения поля давления, вызывающего приток воды в скважину:

$$u(t) = u_0(1 - \exp(-t/t_r)), \quad (1)$$

где u_0 – максимальная амплитуда повышения уровня воды; t – время; t_r – параметр времени релаксации импульса давления в системе «скважина – водовмещающая порода» [Roeloffs, 1998].

Для оценки величины амплитуды косейсмического повышения уровня вследствие сжатия водовмещающих пород при образовании сейсмического разрыва полагалось, что такой скачок произошел в период времени с 03:25 до 03:35 (рис. 3,

б). Его амплитуда Δh определялась путем подбора модели суммарного повышения уровня воды с максимальной амплитудой 9.4 см, складывающейся из u_0 , определяемой по (1), и косейсмического скачка повышения уровня Δh , т.е. с учетом условия $u_0 + \Delta h = 9.4$ см.

Расчетное повышение уровня воды в течение 45 мин хорошо согласуется с наблюдаемыми данными при амплитуде косейсмического скачка $\Delta h = 7.3$ см, $u_0 = 2.1$ см и при величине $t_r = 12$ мин (рис. 4). Параметр времени релаксации давления t_r определялся путем сравнения теоретической функции с данными наблюдений.

С использованием установленной ранее связи между изменениями уровня воды в скв. ЮЗ-5 и объемной косейсмической деформацией водовмещающих пород в виде:

$$D_1 = -\Delta h/A_v, \quad (2)$$

где D_1 – объемная косейсмическая деформация в единицах 10^{-9} : положительное значение соответствует расширению водовмещающих пород, отрицательное значение соответствует их сжатию;

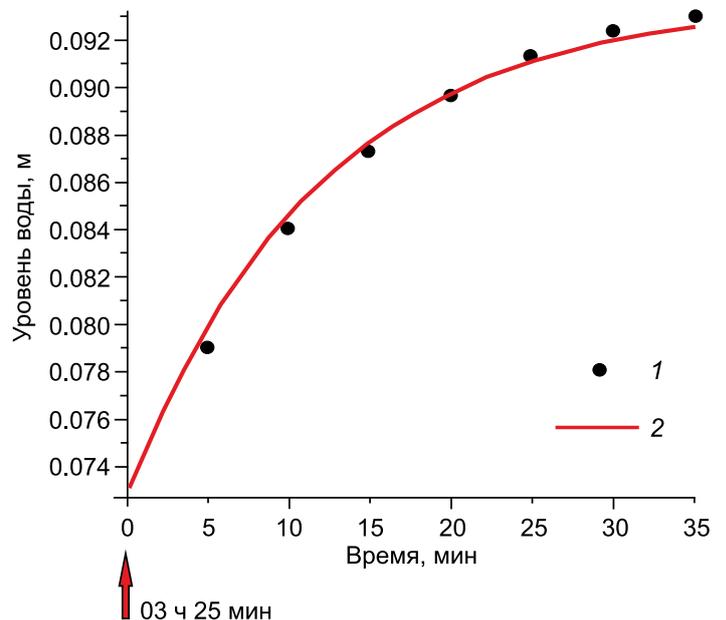


Рис. 4. Сопоставление данных по повышению уровня воды в скважине ЮЗ-5 после вступления сейсмических волн с результатами расчета по (1). 1 – 5-минутные данные наблюдений; 2 – расчетное повышение уровня воды по формуле (1).

Fig. 4. Comparison between the water level increase in well YuZ-5 after the arrival of the seismic waves and the increase estimated from equation (1). 1 – 5-minute observation data; 2 – water level increase estimated from equation (1).

Δh – амплитуда косейсмического скачка уровня воды в сантиметрах: положительное значение соответствует повышению уровня воды, отрицательное значение соответствует понижению уровня воды; $A_v=0.161 \text{ см}/10^{-9}$ – приливная чувствительность уровня воды в $\text{см}/10^{-9}$ [Kopylova, 2006; Kopylova, Boldina, 2006; Kopylova et al., 2010], получена величина объемной косейсмической деформации сжатия водовмещающих пород $D_1 = -4.5 \cdot 10^{-8}$.

С использованием модели дислокационного источника в однородном упругом изотропном пространстве [Okada, 1985] и данных по параметрам и механизму очага Жупановского землетрясения (таблица) [The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017; National Earthquake Information Center, 2017] рассчитано площадное распределение объемной косейсмической деформации и ее величина D_2 в районе скв. ЮЗ-5 на глубине 500 м, соответствующей средней глубине открытой части ствола скважины: $D_2 = -4.6 \cdot 10^{-8}$ (рис. 5). Полученная величина согласуется с величиной объемной деформации водовмещающих пород по данным равномерных наблюдений $D_1 = -4.5 \cdot 10^{-8}$.

В работах [Boldina, Kopylova, 2016; Kopylova et al., 2010] приводится зависимость $M_w \geq 0.004d_e + 5.6$, описывающая соотношение между величинами магнитуд M_w и эпицентрными расстояниями d_e землетрясений, которые сопровождались косейсмическими скачками уровня воды в скв. ЮЗ-5 с амплитудами от 0.2 до 12 см (рис. 6). По соотношению величин M_w и d_e Жупановское землетрясение находится в области параметров землетрясений, которые сопровождаются косейсмическими скачками уровня воды. Отметим, что амплитуда косейсмического повышения уровня воды при Жупановском землетрясении была достаточно велика – $\Delta h = 7.3$ см. Только в случае Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., $M_w = 7.8$, $d_e = 200$ км, $H = 30$ км, был зарегистрирован скачок понижения уровня воды с большей амплитудой – $\Delta h = -12.2$ см [Kopylova, 2006; Kopylova et al., 2010].

После землетрясения наблюдалось понижение уровня воды в течение трех месяцев (см. рис. 3, а, в). С мая 2016 г. поведение уровня соответствовало его фоновым сезонным вариациям. Визуально амплитуда понижения уровня воды с 30 января по 1 мая составила примерно 70 см (см. рис. 3, в). Если учесть характер сезонных изменений уровня воды за многолетний период (см. рис. 3, а, в, график 2), то амплитуда постсейсмического понижения уровня в результате землетрясения оценивается приблизительно в 40 см (см. рис. 3, а, в, график 3).

Ранее эффекты длительного понижения уровня наблюдались в этой скважине дважды: 1 – после Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., $M_w = 7.8$, $d_e = 200$ км, уровень понижался в течение трех меся-

цев с амплитудой 1 м [Boldina, Kopylova, 2010; Kopylova, 2006] и 2 – после землетрясения 28.02.2013 г., $M_w = 6.8$, $d_e = 260$ км уровень понижался с амплитудой 28 см в течение 1.5 мес. [Boldina, Kopylova, 2013]. Оба этих землетрясения, так же как и в случае Жупановского землетрясения, сопровождались сотрясениями с интенсивностью 5–6 баллов по шкале MSK-64 в районе скважины.

Мы полагаем, что понижение уровня воды с 30 января по 1 мая 2016 г. вызвано снижением напора в НБК (см. рис. 2) вследствие локального улучшения фильтрационных свойств водовмещающих пород при сейсмических сотрясениях и может описываться математической моделью удаленного точечного источника падения напора [Boldina, Kopylova, 2010, 2013; Brodsky et al., 2003]:

$$x = x_0 - \Delta h \cdot \operatorname{erfc}(R/\sqrt{4at}), \quad (3)$$

где x – уровень воды в скважине, x_0 – начальный уровень воды в скважине, $\Delta h = \Delta p / \rho g$ – амплитуда падения напора при уменьшении флюидного давления Δp , ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, R – расстояние от источника падения напора в НБК до скважины, a – пьезопроводность, t – время, $\operatorname{erfc}(x)$ – дополнение функции ошибки $\operatorname{erf}(x)$ до 1, т.е.

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du.$$

Результаты расчета по (3) показывают удовлетворительное соответствие расчетной зависимости наблюдаемым постсейсмическим понижениям уровня воды при следующих параметрах: амплитуда понижения уровня воды в скважине $\Delta h = 0.40$ м, пьезопроводность $a = 0.25 \text{ м}^2/\text{с}$, расстояние от источника падения напора в водоносном горизонте до скважины $R = 450$ м (рис. 7).

Отметим, что результаты моделирования понижений уровня воды после Кроноцкого землетрясения и землетрясения 28.02.2013 г. с использованием (3) согласуются с представленными выше результатами в части определения расстояния до источника падения напора. Во всех случаях эти величины оказались одинаковыми ($R = 450$ м) [Boldina, Kopylova, 2010, 2013]. Это может указывать на то, что на расстоянии порядка 450 м от скважины расположен геологический объект, например разломная зона или другой вид гидрогеологического «окна», водопроницаемость которого может резко увеличиваться при сейсмических сотрясениях, достигающих 5 баллов и более по шкале MSK-64. Для более обоснованных предположений о природе этого объекта следует провести полевое обследование территории, примыкающей к скв. ЮЗ-5.

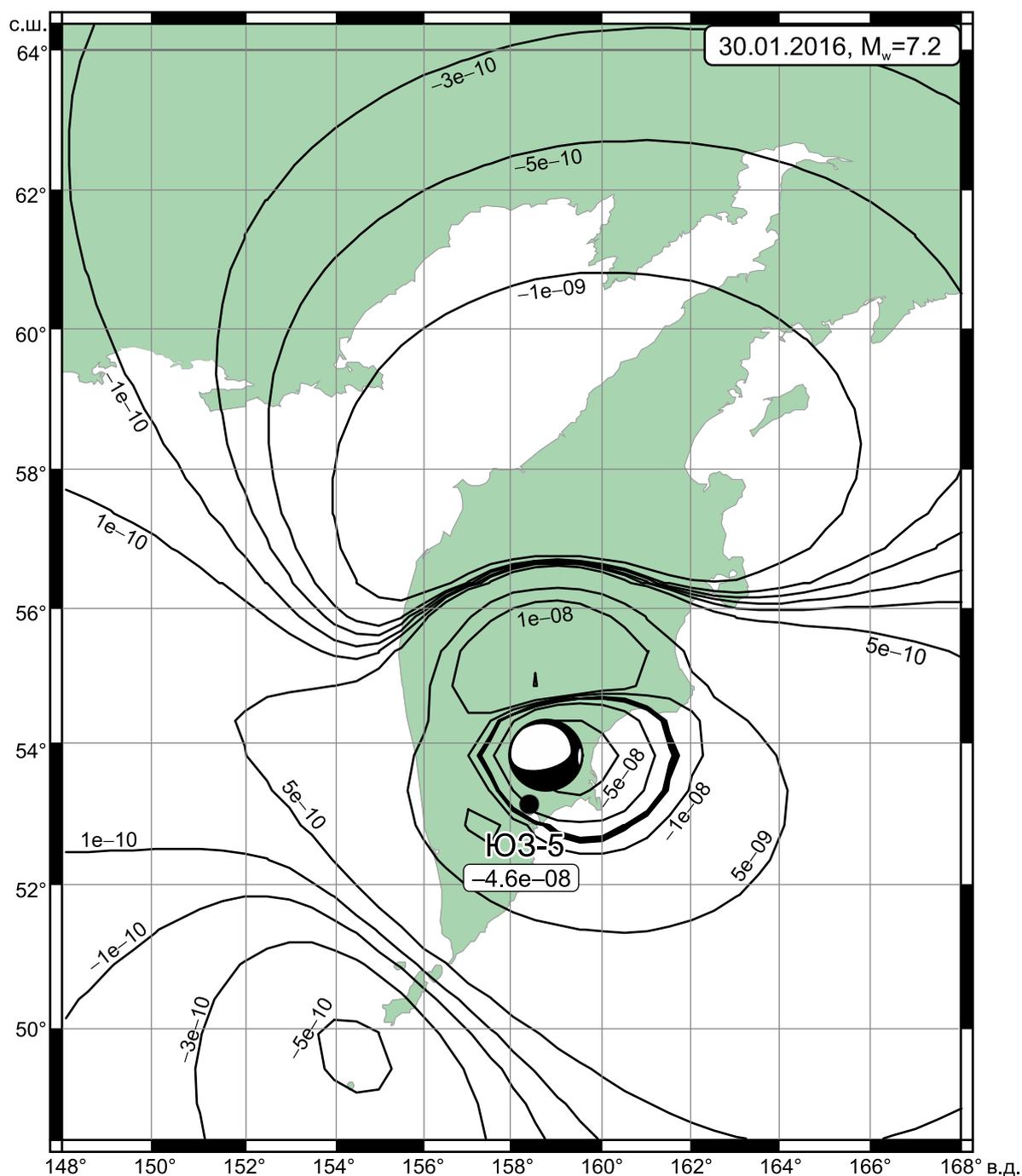


Рис. 5. Распределение косейсмической объемной деформации на глубине 500 м по модели дислокационного источника для Жупановского землетрясения 30 января 2016 г. (таблица) с указанием величины деформации в районе скв. ЮЗ-5 (показана черным кружком).

Fig. 5. Distribution of the coseismic volumetric strain at a depth of 500 m according to the dislocation source model of the Zhupanovsky earthquake (January 30, 2016; Table), indicating the strain values in the area of well YuZ-5 (the well is shown by the black circle).

Наибольшую неопределенность имеет механизм повышения уровня воды с визуальной амплитудой 34 см в течение 3.5 месяца перед Жупановским землетрясением (см. рис. 3, а, в). Подъем уровня воды начался в сентябре и наиболее интенсивно проявлялся с середины октября до середины де-

кабря 2015 г. (см. рис. 3, а, в). С учетом сезонного поведения уровня за многолетний период, амплитуда аномального повышения уровня перед землетрясением оценивается приблизительно в 20 см (см. рис. 3, а, в). Мы полагаем, что таким образом проявлялся гидрогеодинамический предвестник

Жупановского землетрясения. Ранее в этой скважине предвестник наблюдался перед Кроноцким землетрясением в виде бухтообразного понижения уровня в течение трех недель с амплитудой 11 см. Как предполагалось в статье [Kopylova, Boldina, 2012a], он был обусловлен понижением уровня воды в скважине при оттоке воды из ее ствола при развитии квазиупругой деформации расширения водовмещающих пород. Если предположить, что при подготовке Жупановского землетрясения также проявлялся квазиупругий механизм повышения уровня воды, то по (2) объемное сжатие водовмещающих пород могло достигать величины $-1.2 \cdot 10^{-7}$ или быть несколько меньше с учетом нагрузочного эффекта от обильных осадков в октябре 2015 г. (см. рис. 3, а) и упругой передачи давления из области питания НВК при возрастании высоты водяного столба в ГВК (см. рис. 2).

3. ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ Е-1

Скважина Е-1 вскрывает солоноватые подземные воды в туфах неогенового возраста в диапазоне глубин 625–648 м (см. рис. 1, в) в гидродинамической зоне затрудненного водообмена. На это указывают особенности режима скважины, в частности отсутствие годовой сезонности в изменениях уровня, а также повышенная минерализация воды и присутствие в ней газа метаново-азотного состава. Характерной особенностью режима скв. Е-1 являются тренды повышения и понижения уровня воды продолжительностью 3–6 лет с амплитудами от первых десятков см до 1.5 м со средней скоростью ≤ 0.1 см/сут. На фоне таких трендов проявляются слабые барометрические вариации уровня и его изменения, связанные с сильными землетрясениями [Kopylova, 2001; Kopylova et al., 2012].

По данным наблюдений 1987–2017 гг., в изменениях уровня воды в скв. Е-1 были выделены два типа сигналов – гидрогеодинамических предвестников (ГП), различающихся по продолжительности и заблаговременности проявления в связи с сильными местными землетрясениями, а также по степени обоснованности их существования:

1 – предвестник ГП_I со временем упреждения от суток до десятков суток [Kopylova, 2013; Kopylova, Boldina, 2012b];

2 – предполагаемый предвестник ГП_II со временем упреждения до нескольких лет [Kopylova, 2001; Firstov et al., 2016].

Гидрогеодинамический предвестник ГП_I проявляется в понижениях уровня воды с повышенной скоростью в течение суток–недель перед землетрясениями с $M_w \geq 5.0$ на эпицентральных расстояниях до 350 км. В работе [Kopylova, 2013] приводит-

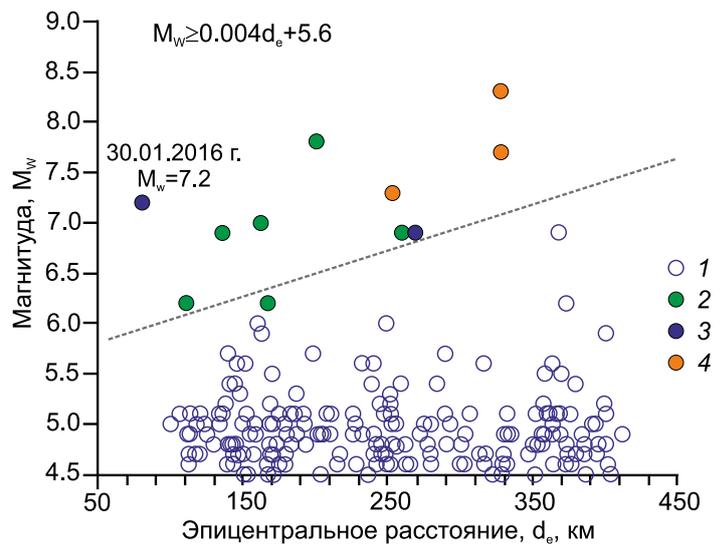


Рис. 6. Распределение землетрясений с $M_w \geq 4.5$, произошедших за время наблюдений на скв. ЮЗ-5 в 1997–2016 гг., в зависимости от величин их магнитуды M_w и эпицентрального расстояния d_e , км 1 – землетрясения, не сопровождавшиеся косейсмическими скачками уровня воды; 2–4 – землетрясения с различной глубиной гипоцентра H , сопровождавшиеся косейсмическими скачками уровня воды (2 – $H=1-70$ км, 3 – $H=70-300$ км, 4 – $H=500-600$ км).

Fig. 6. Distribution of $M_w \geq 4.5$ earthquakes, that occurred in 1997–2016, by magnitudes, M_w and distances to the epicenters, d_e (km). 1 – earthquakes not accompanied by coseismic water level changes in well YuZ-5; 2–4 – earthquakes with different depths of hypocenter H , which were accompanied by coseismic water level changes in well YuZ-5 (2 – $H=1-70$ km, 3 – $H=70-300$ km, 4 – $H=500-600$ km).

ся параметрическое описание ГП_I. Относительно регулярная повторяемость ГП_I перед землетрясениями с $M_w \geq 5.0$ на эпицентральных расстояниях $d_e \leq 350$ км (более 70 % случаев), а также улучшение статистической связи его проявлений с последующими землетрясениями с ростом величин их магнитуды позволяют использовать ГП_I для среднесрочной (сутки – недели) оценки времени возникновения местных землетрясений с величинами магнитуд порядка $M_w=6.0$ и более [Kopylova, 2001; Kopylova, Boldina, 2012b; Kopylova, Sizova, 2012; Kopylova et al., 2012]. С начала 2000-х гг. ГП_I используется для составления и передачи в экспертные советы по прогнозу землетрясений регулярных заключений о возможности сильных землетрясений в Камчатском регионе с упреждением до одного месяца [Chebrov, 2014; Chebrov et al., 2013, 2016].

Описание проявления ГП_II в изменениях уровня воды в скв. Е-1 впервые приведено в [Kopylova, 2001]. В этой работе показано, что в период време-

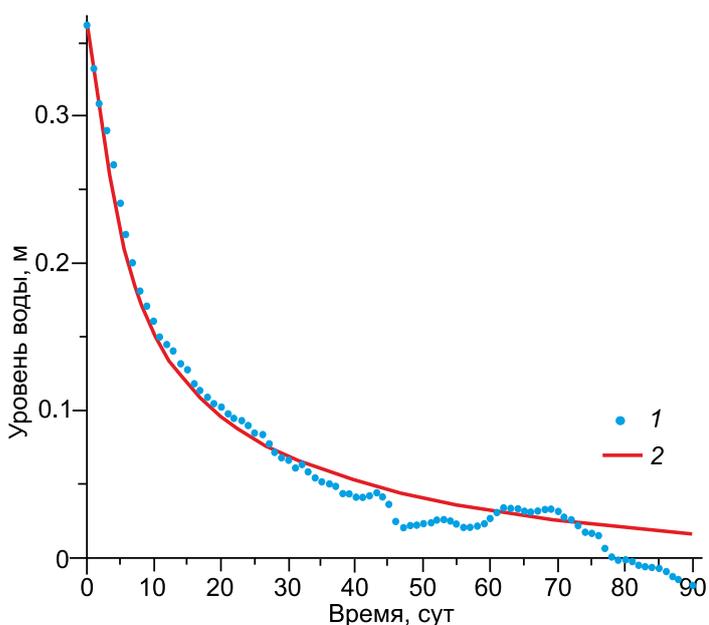


Рис. 7. Результаты моделирования понижения уровня воды в скв. ЮЗ-5 после Жупановского землетрясения 30.01.2016 г. 1 – среднесуточные данные наблюдений с компенсированными барометрическими и сезонными вариациями; 2 – расчетное понижение уровня воды по (3).

Fig. 7. Modeling of water level lowering in well YuZ-5 after the Zhupanovsky earthquake of January 30, 2016. 1 – average daily observed values with compensated barometric and seasonal variations; 2 – water level drop estimated from equation (3).

ни с 1991 по 1997 г., когда произошли шесть землетрясений с $M_w=6.9-7.8$, $d_e=90-300$ км, наблюдалось интенсивное понижение уровня с амплитудой около 1.5 м. Предполагалось, что такое поведение уровня воды отражало геодинамический процесс подготовки и реализации сейсмической активизации, включающей серию сильных землетрясений с $M_{\max}=7.8$ в пределах прилегающего фрагмента Камчатской сейсмоактивной зоны на расстояниях до первых сотен км от скважины.

В течение последних пяти лет в скв. Е-1 развивается интенсивный тренд понижения уровня воды (рис. 8), аналогичный по параметрам проявлению ГП_II в 1991–1997 гг. С начала его проявления (10 декабря 2011 г.) до апреля 2017 г. амплитуда понижения уровня воды составила 158 см при средней скорости -0.08 см/сут. Такие параметры близки к тем, которые наблюдались в 1991–1997 гг.

С учетом того, что с конца 2011 г. в изменениях уровня воды развивается ГП_II, а также с учетом высокой опасности сильного землетрясения вблизи г. Петропавловска-Камчатского, 6 апреля 2012 г.

в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС) было передано прогностическое заключение о возможном усилении сейсмической активности в течение месяцев – первых лет в радиусе до первых сотен километров от скважины в виде одного или нескольких землетрясений с $M_w \geq 6.0$. В 2013–2017 гг. в Камчатском регионе произошло более 20 землетрясений с $M_w \geq 6.0$ на эпицентральных расстояниях $d_e \leq 350$ км, в том числе пять событий с $M_w=6.4-8.3$, включая Жупановское землетрясение. Такое развитие сейсмичности показывает, что поданное в апреле 2012 г. прогностическое заключение можно считать успешно оправдавшимся в отношении произошедших сейсмических событий, включая Жупановское землетрясение (рис. 8) [Firstov et al., 2016]. На фоне развития ГП_II в 2013 и в 2016 гг. также были выделены в режиме реального времени вариации уровня перед землетрясением 28.02.2013 г. и перед Жупановским землетрясением, соответствующие гидродинамическому предвестнику ГП_I (описание ГП_I перед Жупановским землетрясением приводится ниже). Эти относительно краткосрочные прогнозы признаны КФ РЭС как оправдавшиеся [Chebrov, 2014; Chebrov et al., 2016].

3.1. ГИДРОГЕОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНЕ Е-1 В СВЯЗИ С ЖУПАНОВСКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ

На рис. 9, б, представлено последовательное проявление гидрогеодинамического предвестника ГП_I в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью и постсейсмического повышения уровня с амплитудой 3.7 см в течение месяца после Жупановского землетрясения. Гидрогеодинамический предвестник ГП_I развивался в течение 21 сут перед землетрясением. Амплитуда понижения уровня за это время составила 2.2 см при среднесуточной скорости $-0.06 \dots -0.12$ см/сут (рис. 9, а, б II).

По текущим данным уровневых наблюдений с использованием этого предвестника, выявленного в реальном времени, 21 января 2016 г. Г.Н. Копыловой было подготовлено прогностическое заключение о повышенной вероятности возникновения сильного землетрясения на Камчатке, которое было передано в КФ РЭС (рис. 9, б II). В нем отмечалось, что «...по уровневным данным обнаружены признаки, указывающие на возможность усиления сейсмической активности в течение месяца (возникновение землетрясений с $M_w \geq 5.5$ на расстоянии до 350 км от скважины Е-1)». Произошедшее Жупановское землетрясение соответствовало прогнозу от 21 января 2016 г. по величине магнитуды, по времени и по местоположению, и прогноз, поданный 21 января 2016 г. в КФ РЭС, является успеш-

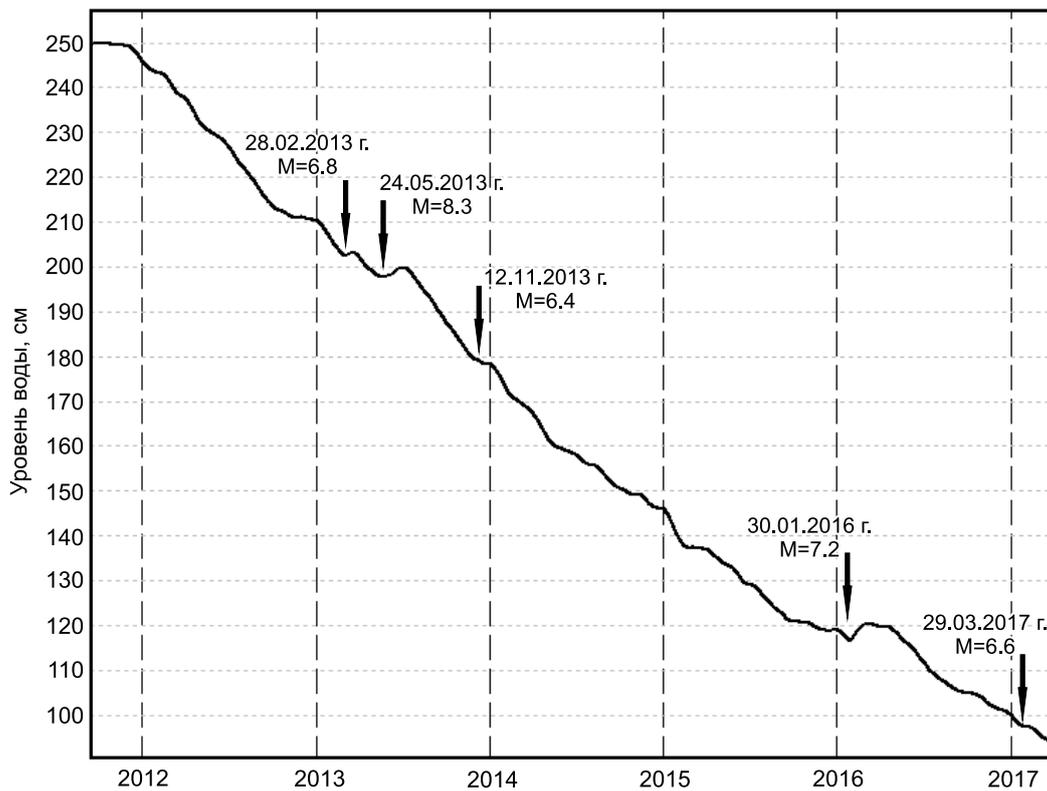


Рис. 8. Изменения уровня воды в скважине Е-1 с сентября 2011 г. по апрель 2017 г. Стрелками показаны сильные ($M_w \geq 6.4$) землетрясения, произошедшие на эпицентральных расстояниях $d_e = 70$ –490 км.

Fig. 8. Water level changes in well E-1 from September 2011 to April 2017. The arrows show the recorded strong earthquakes ($M_w \geq 6.4$) with the distances to the epicenters, d_e from 70 to 490 km.

ным как по авторским оценкам, так и по заключению КФ РЭС.

После землетрясения в скв. Е-1 в течение месяца развивалось постсейсмическое повышение уровня с амплитудой 3.7 см (рис. 9). Наблюдаемые изменения уровня воды в скв. Е-1 в связи с землетрясением являются типичными для периодов возникновения сильных местных землетрясений ($M_w \geq 6.6$) на расстояниях до первых сотен километров. Как предполагалось ранее в [Kopylova, 2001] и в других публикациях этого автора, повышение уровня после землетрясений с интенсивностью сотрясений ≥ 5 –6 баллов может быть связано с относительным увеличением доли свободного газа в составе подземной воды и уменьшением плотности воды в стволе скважины при сейсмических сотрясениях. Регулярное проявление предвестника ГП_I может быть также связано с развитием дилатансии в водовмещающих породах и увеличением их трещинно-порового пространства на стадиях подготовки сильных землетрясений на прилегающем участке Камчатской сейсмоактивной зоны, а также с фазовыми переходами в системе вода – газ.

Общее время постсейсмического повышения уровня воды в скв. Е-1 после Жупановского земле-

трясения и последующей его стабилизации составило около трех месяцев. Затем вновь возобновился тренд понижения уровня воды со средней скоростью -0.08 см/сут (см. рис. 8). Это дало основание для продления времени опасного периода возникновения землетрясений с магнитудой ≈ 7 и более на расстояниях до первых сотен километров от скважины в ближайшее время [Firstov et al., 2016].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные примеры изменений уровня воды в двух скважинах в связи с 5-балльным Жупановским землетрясением демонстрируют, что система сбора и обработки данных равномерных наблюдений в КФ ФИЦ ЕГС РАН позволяет выделять гидрогеосейсмические вариации уровня воды различного типа в ближней зоне сильного землетрясения, в том числе гидрогеодинамические предвестники.

В скв. ЮЗ-5 перед Жупановским землетрясением проявлялось аномальное повышение уровня воды с амплитудой ≈ 20 см в течение не менее 3.5 месяца, которое можно рассматривать в качестве гидрогео-

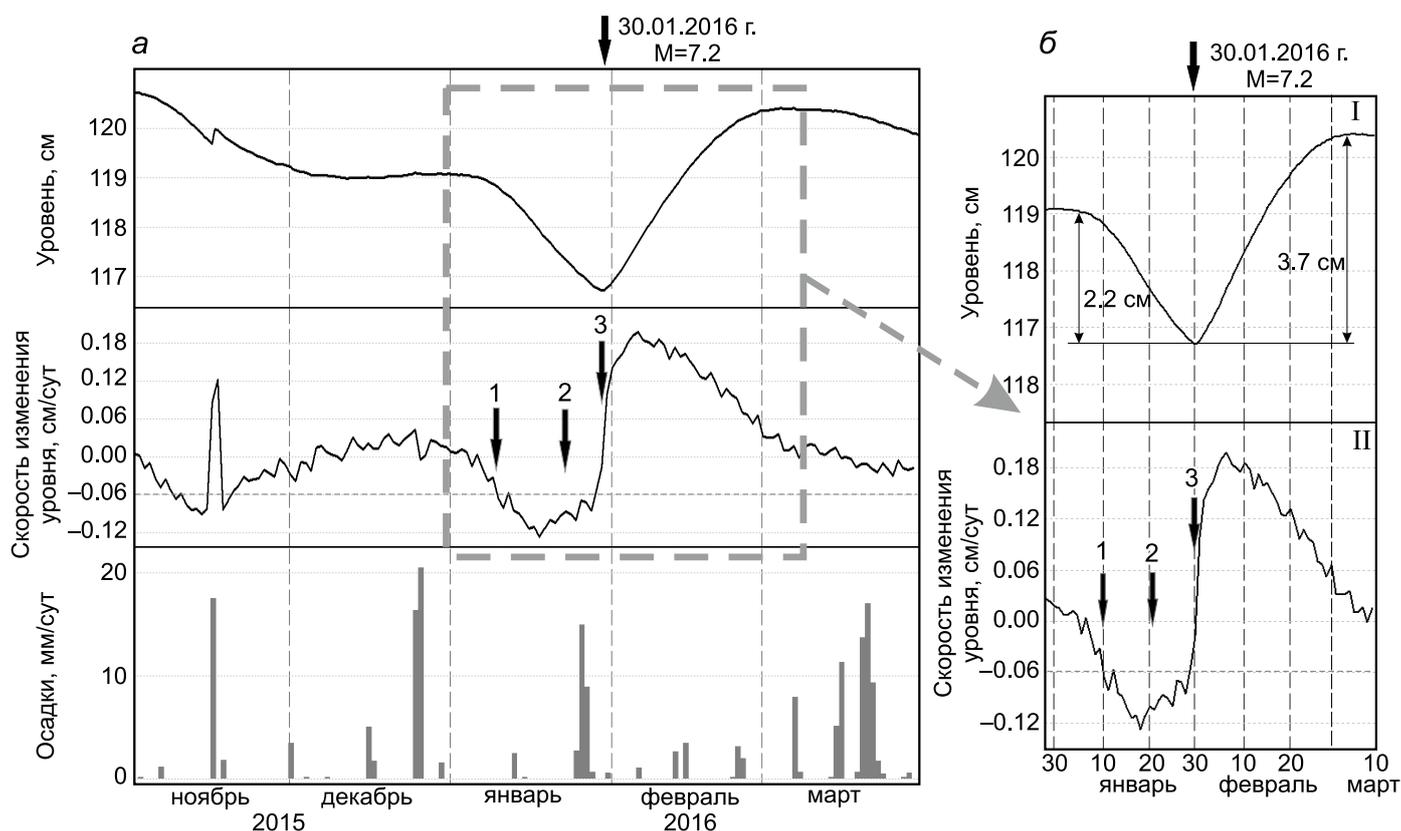


Рис. 9. Изменения уровня воды в скв. Е-1 в период Жупановского землетрясения. *а* – изменения уровня воды и его среднесуточной скорости с ноября 2015 г. по март 2016 г. в сопоставлении с атмосферными осадками; Жупановское землетрясение 30.01.2016 г., $M_w=7.2$, показано стрелкой. На графике среднесуточной скорости изменения уровня воды цифрами показаны: 1 – начало проявления гидрогеодинамического предвестника ГП_I (10 января); 2 – дата подачи прогнозного заключения в КФ РЭС о возможности сильного землетрясения (21 января); 3 – Жупановское землетрясение (30 января); пунктирной линией показано пороговое значение скорости понижения уровня воды -0.06 см/сут; жирной пунктирной линией выделен фрагмент изменений уровня воды, представленный на рис. б: I – изменения уровня воды с 30 декабря 2015 г. по 10 марта 2016 г., включающие гидрогеодинамический предвестник и постсейсмическое повышение; II – изменение среднесуточной скорости вариаций уровня воды в сопоставлении с ее пороговой величиной -0.06 см/сут.

Fig. 9. Changes in the water level in well E-1 in the period of the Zhupanovsky earthquake. *a* – water level changes and the average daily rates of the water level variations in November 2015 – March 2016 in comparison with the precipitation values. The Zhupanovsky earthquake (January 30, 2016; $M_w=7.20$) is shown by the arrow. Numbers on the curve showing the average daily rates of the water level variations: 1 – start of the hydrogeodynamic precursor (ГП_I) (January 10, 2016), 2 – date when the forecast of a possible strong earthquake was reported to KB REC (January 21, 2016), 3 – date when the Zhupanovsky earthquake occurred (January 30, 2016). The dashed line shows the threshold value of the water level lowering rate (-0.06 cm/day). The thick dashed line indicates a fragment of water level changes shown in Fig. б: I – water level changes from December 30, 2015 to March 10, 2016, including the hydrogeodynamic precursor and the post-seismic rise of the water level; II – change in the average daily rate of the water level variation as compared to its threshold value (-0.06 cm/day).

динамического предвестника этого сейсмического события.

Образование разрыва в очаге Жупановского землетрясения сопровождалось косейсмическим скачком повышения уровня воды с амплитудой 7.3 см, что соответствует объемной деформации сжатия водовмещающих пород $-4.5 \cdot 10^{-8}$. Полученная по равномерным данным оценка согласуется с величиной объемной косейсмической деформации по модели протяженного дислокационного источ-

ника с параметрами подвижки по механизму СМТ ($-4.6 \cdot 10^{-8}$). Соответствие полученных величин подтверждает высокие деформометрические свойства скважины ЮЗ-5 при ее использовании в системе геофизического мониторинга современных геодинамических процессов и прогнозирования сильных землетрясений в Камчатском регионе.

В изменениях уровня воды в скв. Е-1 выделены два типа гидрогеодинамических предвестников, различающихся по продолжительности. Непосред-

ственно перед Жупановским землетрясением в течение 21 суток проявлялся гидрогеодинамический предвестник в форме понижения уровня воды с повышенной скоростью (ГП_I). После землетрясения проявление ГП_I сменилось постсейсмическим повышением уровня воды, что согласуется с установленной ранее закономерностью поведения уровня воды в этой скважине при близких ($d_e \leq 300$ км) сильных ($M_w = 6.6-7.8$) землетрясениях.

С использованием ГП_I осуществлен успешный прогноз Жупановского землетрясения в реальном времени со временем упреждения 9 суток.

В течение 2012–2017 гг. в скв. Е-1 развивается тренд понижения уровня воды, аналогичный понижению уровня в 1991–1997 гг., которое предшествовало серии из шести сильных землетрясений с магнитудой $M_w = 6.6-7.8$ на расстояниях до первых сотен километров от скважины (предполагаемый гидрогеодинамический предвестник ГП_II) и сопровождало ее. Понижение уровня воды в скв. Е-1, начавшееся в декабре 2011 г., также предшествовало сейсмической активизации на Камчатке, включающей серию сильных землетрясений с максимальными магнитудами 6.4–8.3, в том числе Жупановское землетрясение. Этот факт подтверждает реальность существования ГП_II в изменениях уровня воды в скв. Е-1 и дает возможность его использования в системе прогнозирования сильных землетрясений в Камчатском регионе, включая сильнейшие сейсмические события с магнитудой ≈ 8 (Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г., $M_w = 7.8$; Охотоморское мантийное землетрясение 24 мая 2013 г., $M_w = 8.3$).

В результате Жупановского землетрясения проявились различные постсейсмические эффекты в изменениях уровня воды в двух наблюдательных скважинах. В скв. ЮЗ-5 вступление сейсмических волн сопровождалось повышением уровня с ам-

плитудой 2.1 см в течение 35 мин в результате импульсного роста давления вблизи ствола скважины, которое сменилось длительным понижением уровня с амплитудой около 40 см вследствие изменения режима фильтрации подземных вод на расстояниях до первых сотен метров от скважины. В скв. Е-1 после Жупановского землетрясения наблюдалось повышение уровня в течение одного месяца с амплитудой 3.7 см.

Анализ таких постсейсмических эффектов с использованием моделирования показывает, что при прохождении сейсмических волн от сильного ощутимого землетрясения в системах скважина – водовмещающая порода возникают специфические флюидодинамические процессы, сопровождающиеся вариациями напора, эпизодами нелинейной фильтрации, локальными и площадными изменениями фильтрационных свойств водовмещающих пород, а также, возможно, изменениями состава подземной воды и соотношения вода/растворенный/свободный газ.

Полученные данные по проявлениям различных типов гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в ближней зоне сильного землетрясения в двух скважинах, различающихся строением и гидрогеологическими условиями, показывают определяющее значение этих факторов в особенностях проявления гидрогеосейсмических вариаций уровня воды, включая гидрогеодинамические предвестники.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

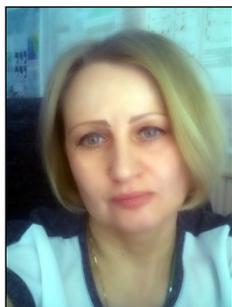
Работа выполнена в рамках плановых тем НИР КФ ФИЦ ЕГС РАН рег. № АААА-А16-116070550057-7, АААА-А16-116070550059-1.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Besedina A., Vinogradov E., Gorbunova E., Svintsov I., 2016. Chilean earthquakes: Aquifer responses at the Russian platform. *Pure and Applied Geophysics* 173 (4), 1039–1050. <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1256-5>.
- Boldina S.V., Kopylova G.N., 2010. Modeling of hydrogeoseismic variations of the water level in the well. In: Problems of complex geophysical monitoring in the Far East of Russia. Proceedings of the Second scientific-technical conference (October 11–17, 2009, Petropavlovsk-Kamchatsky). GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 166–170 (in Russian) [Болдина С.В., Копылова Г.Н. Моделирование гидрогеосейсмических вариаций уровня воды в скважине // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Второй региональной научно-технической конференции (11–17 октября 2009 г., г. Петропавловск-Камчатский). Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 166–170].
- Boldina S.V., Kopylova G.N., 2013. Modeling of water level variations in well YuZ-5 in Kamchatka due to the earthquake of February 28, 2013, $M=6.8$. In: Problems of complex geophysical monitoring in the Far East of Russia. Proceedings of the Fourth scientific-technical conference (September 29 – October 5, 2013, Petropavlovsk-Kamchatsky). GS RAS, Obninsk, p. 435–439 (in Russian) [Болдина С.В., Копылова Г.Н. Моделирование вариаций уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванных землетрясением 28.02.2013 г., $M=6.8$ // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Четвертой научно-технической конференции (29 сентября – 5 октября 2013 г., г. Петропавловск-Камчатский). Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 435–439].

- Boldina S.V., Kopylova G.N., 2016. Coseismic effects of the 2013 strong Kamchatka earthquakes in well YUZ-5. *Bulletin of Kamchatka Regional Association «Educational-Scientific» Center. Earth Sciences* (2), 66–76 (in Russian) [Болдина С.В., Копылова Г.Н. Косейсмические эффекты сильных камчатских землетрясений 2013 г. в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 // *Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле*. 2016. № 2. С. 66–76].
- Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M.A., 2003. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 108 (B8), 2390. <https://doi.org/10.1029/2002JB002321>.
- Chebrov V.N. (Ed.), 2014. Strong Kamchatka Earthquakes in 2013. Novaya Kniga, Petropavlovsk-Kamchatsky, 252 p. (in Russian) [Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Ред. В.Н. Чебров. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.].
- Chebrov V.N., Kugayenko Yu.A., Abubakirov I.R., Droznina S.Ya., Ivanova Ye.I., Matveyenko Ye.A., Mityushkina S.V., Ototyuk D.A., Pavlov V.M., Rayevskaya A.A., Saltykov V.A., Senyukov S.L., Serafimova Yu.K., Skorkina A.A., Titkov N.N., Chebrov D.V., 2016. The January 30th, 2016 earthquake with $K_s=15.7$, $M_w=7.2$, $I=6$ in the Zhupanovsky region (Kamchatka). *Bulletin of Kamchatka Regional Association Educational-Scientific Center. Earth Sciences* (1), 5–16 (in Russian) [Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р., Дрознина С.Я., Иванова Е.И., Матвеев Е.А., Митюшкина С.В., Отоотук Д.А., Павлов В.М., Раевская А.А., Салтыков В.А., Сенюков С.Л., Серафимова Ю.К., Скоркина А.А., Титков Н.Н., Чебров Д.В. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s=15.7$, $M_w=7.2$, $I=6$ (Камчатка) // *Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле*. 2016. № 1. С. 5–16].
- Chebrov V.N., Saltykov V.A., Serafimova Y.K., 2013. Identifying the precursors of large ($M \geq 6.0$) earthquakes in Kamchatka based on data from the Kamchatka Branch of the Russian Expert Council on earthquake prediction: 1998–2011. *Journal of Volcanology and Seismology* 7 (1), 76–85. <https://doi.org/10.1134/S074204631301003X>.
- Chia Y., Chiu J.J., Chiang Y.-H., Lee T.-P., Liu C.-W., 2008. Spatial and temporal changes of groundwater level induced by thrust faulting. *Pure and Applied Geophysics* 165 (1), 5–16. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0293-5>.
- Firstov P.P., Kopylova G.N., Solomatin A.V., Serafimova Yu.K., 2016. Strong earthquake forecast near the Kamchatka peninsula. *Bulletin of Kamchatka Regional Association Educational-Scientific Center. Earth Sciences* (4), 106–114 (in Russian) [Фирстов П.П., Копылова Г.Н., Соломатин А.В., Серафимова Ю.К. О прогнозировании сильного землетрясения в районе полуострова Камчатка // *Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле*. 2016. № 4. С. 106–114].
- Kitagawa Y., Koizumi N., Takahashi M., Matsumoto N., Sato T., 2006. Changes in groundwater levels or pressures associated with the 2004 earthquake off the west coast of northern Sumatra (M 9.0). *Earth, Planets and Space* 58 (2), 173–179. <https://doi.org/10.1186/BF03353375>.
- Kocharyan G.G., Vinogradov E.A., Gorbunova E.M., Markov V.K., Markov D.V., Pernik L.M., 2011. Hydrologic response of underground reservoirs to seismic vibrations. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 47 (12), 1071–1082. <https://doi.org/10.1134/S1069351311120068>.
- Kopylova G.N., 2001. Changes in the water level in well Elizovo-1 in Kamchatka due to strong earthquakes (according to observations in 1987–1998). *Vulkanologiya i Seismologiya (Journal of Volcanology and Seismology)* (2), 39–52 (in Russian) [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].
- Kopylova G.N., 2006. Changes in the water level in well YuZ-5 in Kamchatka due to earthquakes. *Vulkanologiya i Seismologiya (Journal of Volcanology and Seismology)* (6), 52–64 (in Russian) [Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине ЮЗ-5, Камчатка, вызванные землетрясениями // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 6. С. 52–64].
- Kopylova G.N., 2013. On the probabilistic medium-term forecasting of strong earthquakes in Kamchatka and parametrization of precursors. In: Problems of complex geophysical monitoring in the Far East of Russia. Proceedings of the Fourth scientific-technical conference (September 29 – October 5, 2013, Petropavlovsk-Kamchatsky). GS RAS, Obninsk, p. 382–386 (in Russian) [Копылова Г.Н. О вероятностном среднесрочном прогнозе сильных землетрясений Камчатки и параметризации предвестников // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Четвертой научно-технической конференции (29 сентября – 5 октября 2013 г., г. Петропавловск-Камчатский). Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 382–386].
- Kopylova G.N., Boldina S.V., 2006. Estimation of the poro-elastic parameters of groundwater reservoirs (water level observations in wells YuZ-5 and E-1 in Kamchatka). *Vulkanologiya i Seismologiya (Journal of Volcanology and Seismology)* (2), 17–28 (in Russian) [Копылова Г.Н., Болдина С.В. Оценка пороупругих параметров резервуаров подземных вод (по данным равномерных наблюдений на скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*. 2006. № 2. С. 17–28].
- Kopylova G.N., Boldina S.V., 2007. The response of water level in the YuZ-5 well, Kamchatka to the magnitude 9.3, Sumatra–Andaman Earthquake of December 26, 2004. *Journal of Volcanology and Seismology* 1 (5), 319–327. <https://doi.org/10.1134/S0742046307050041>.
- Kopylova G.N., Boldina S.V., 2012a. On the mechanism of a hydrogeodynamic precursor of the Kronotsky earthquake, December 5, 1997, $M_w=7.8$. *Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)* (5), 104–114 (in Russian)

- sian) [Копылова Г.Н., Болдина С.В. О механизме гидрогеодинамического предвестника Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., Mw=7.8 // *Тихоокеанская геология*. 2012. № 5. С. 104–114].
- Kopylova G.N., Boldina S.V., 2012b. 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. *Journal of Volcanology and Seismology* 6 (5), 316–328. <https://doi.org/10.1134/S074204631205003X>.
- Kopylova G.N., Boldina S.V., 2015. Triggering effects of earthquakes on groundwaters (according to the observations in Kamchatka). In: V.V. Adushkin, G.G. Kocharyan (Eds.), *Triggering effects in geosystems. Proceedings of the Third All-Russia seminar-meeting (June 16–19, 2015, Moscow)*. GEOS, Moscow, p. 70–78 (in Russian) [Копылова Г.Н., Болдина С.В. Триггерное воздействие землетрясений на подземные воды (по данным наблюдений на Камчатке) // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы третьего Всероссийского семинара-совещания (16–19 июня 2015 г., г. Москва) / Ред. В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян. М.: ГЕОС, 2015. С. 70–78].
- Kopylova G.N., Boldina S.V., Smirnov A.A., Chubarova E.G., 2017. Experience in registration of variations caused by strong earthquakes in the level and physicochemical parameters of ground waters in the piezometric wells: the case of Kamchatka. *Seismic Instruments* 53 (4), 286–295. <https://doi.org/10.3103/S0747923917040065>.
- Kopylova G.N., Boldina S.V., Smolina N.N., Sizova E.G., Kasimova V.A., 2012. Hydrogeoseismic variations in the water level in piezometric wells in Kamchatka (according to the observations in 1987–2011). In: *Seismological and geophysical studies in Kamchatka. To the 50th anniversary of detailed seismological observations*. Novaya Kniga, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 236–269 (in Russian) [Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смолина Н.Н., Сизова Е.Г., Касимова В.А. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в пьезометрических скважинах Камчатки (по данным наблюдений 1987–2011 гг.) // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. С. 236–269].
- Kopylova G.N., Sizova E.G., 2010. Trends and seasonal variations in water level in wells (in the aspect of search for hydrogeodynamic earthquake precursors) In: *Problems of complex geophysical monitoring in the Far East of Russia. Proceedings of the Second scientific-technical conference (October 11–17, 2009, Petropavlovsk-Kamchatsky)*. GS RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 206–210 (in Russian) [Копылова Г.Н., Сизова Е.Г. Тренды и сезонные вариации уровня воды в скважинах (в аспекте поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений) // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Труды Второй региональной научно-технической конференции (11–17 октября 2009 г., г. Петропавловск-Камчатский). Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. С. 206–210].
- Kopylova G.N., Sizova E.G., 2012. On a precursor of earthquakes, manifested in water level variations in well E-1 in Kamchatka. In: *Volcanism and related processes. Proceedings of the Conference dedicated to the Day of Volcanologists*. Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 116–125 (in Russian) [Копылова Г.Н., Сизова Е.Г. О предвестнике землетрясений, проявляющемся в изменениях уровня воды в скважине E-1, Камчатка // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 116–125].
- Kopylova G.N., Steblou G.M., Boldina S.V., Sdel'nikova I.A., 2010. The possibility of estimating the coseismic deformation from water level observations in wells. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 46 (1), 47–56. <https://doi.org/10.1134/S1069351310010040>.
- Kovalevsky V.S., 1973. *Conditions of Formation and Forecasts of the Natural Regime of Groundwaters*. Nedra, Moscow, 152 p. (in Russian) [Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. М.: Недра, 1973. 152 с.].
- Medvedev S.V., Sponheuer W., Kárník V., 1965. Seismic Intensity Scale MSK–64. Interdepartmental Geophysical Commission of the USSR Acad. Sci., Moscow, 11 p. (in Russian) [Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.].
- National Earthquake Information Center, 2017. Available from: <http://earthquake.usgs.gov> (last accessed November 14, 2017).
- Okada Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America* 75 (4), 1135–1154.
- Roeloffs E.A., 1998. Persistent water level changes in a well near Parkfield, California, due to local and distant earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 103 (B1), 869–889. <https://doi.org/10.1029/97JB02335>.
- Shi Z., Wang G., Manga M., Wang C.Y., 2015. Mechanism of co-seismic water level change following four great earthquakes – insights from co-seismic responses throughout the Chinese mainland. *Earth and Planetary Science Letters* 430, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.08.012>.
- The Global Centroid Moment Tensor Project, 2017. Available from: <http://www.globalcmt.org> (last accessed November 14, 2017).
- Wang C.-Y., Cheng L.H., Chin C.V., Yu S.B., 2001. Coseismic hydrologic response of an alluvial fan to the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Geology* 29 (9), 831–834. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0831:CHROAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0831:CHROAA>2.0.CO;2).
- Wang C.-Y., Manga M., 2010. *Earthquakes and Water. Lecture Notes in Earth Sciences*, vol. 114. Springer, Berlin, 249 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00810-8>.



Болдина Светлана Васильевна, канд. геол.-мин. наук, с.н.с.
Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия
Тел.: 8(4152)431835; факс: 8(4152)431850; ✉ e-mail: boldina@emsd.ru

Boldina, Svetlana V., Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher
Kamchatka Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS'
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
Tel.: 8(4152)431835; fax: 8(4152)431850; ✉ e-mail: boldina@emsd.ru



Копылова Галина Николаевна, докт. геол.-мин. наук, зав. лабораторией
Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия
Тел.: 8(4152)431849; факс: 8(4152)431850; e-mail: gala@emsd.ru

Kopylova, Galina N., Doctor of Geology and Mineralogy, Head of Laboratory
Kamchatka Branch of Federal Research Center 'Geophysical Survey of RAS'
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia
Tel.: 8(4152)431849; fax: 8(4152)431850; e-mail: gala@emsd.ru