

УДК 550.831:556.3

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-5-40-51

## **ВАРИАЦИИ ОБЪЕМНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И УРОВНЯ ВОДЫ В СКВАЖИНАХ, ИХ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

***Владимир Юрьевич Тимофеев***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383) 330-53-75, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

***Дмитрий Геннадьевич Ардюков***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 330-53-75, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

***Антон Владимирович Тимофеев***

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383) 330-53-75, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

***Павел Юрьевич Горнов***

Институт тектоники и геофизики им. Ю. А. Косыгина ДВО РАН, 680000, Россия, г. Хабаровск, ул. Ким Ю. Чена, 65, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, e-mail: gornov@itig.as.khb.ru

***Юрий Федорович Стусь***

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: yfstus@academ.org

***Владимир Михайлович Семибаламут***

ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» Сибирский филиал, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3, кандидат физико-математических наук, директор, тел. (383)330-88-48, e-mail: wladim28@yandex.ru

Высокоточные гравиметрические измерения на наноуровне (при ошибке измерений  $g_0 \cdot 10^{-9}$ ) требуют учета изменений плотности, вызванной деформацией земной коры и движением и положением флюида в слое. Работа посвящена анализу результатов наблюдений за уровнем воды в трех скважинах, расположенных в Приморье, на Камчатке и в Байкальском регионе. Вариации уровня в основном связаны с приливным воздействием, вариациями атмосферного давления, косейсмическими эффектами и сезонными влияниями осадков. С использованием приливного анализа данных получены коэффициенты связи вариаций уровня и объемной деформации от 0,1 до 1,6 мм/10<sup>-9</sup>. Проведена оценка вклада вариаций объемной деформации в результаты гравиметрических мониторинговых наблюдений. Для скважины, пробуренной в коренных породах с использованием эффекта фазового запаздывания приливной деформации определена ориентация системы трещиноватости в горной долине Прибайкалья. Анализ многолетней серии гравиметрических измерений, полученной на сейсмостанции Талая, показывает, что для гравиметрических пунктов, расположенных на монолитных горных породах, вклад вариаций уровня вод значительно меньше ошибки абсолютных гравиметрических наблюдений. Быстрые косейсмические эффекты землетрясений хорошо регистрируются равномерными, деформографическими и абсолютными гравиметрическими методами.

**Ключевые слова:** измерения абсолютным гравиметром ГАБЛ и оценка вклада внешних эффектов, уровень воды в скважинах, объемная деформация, наблюдения вариаций водного уровня, Приморье, Камчатка, Прибайкалье, косейсмические, приливные, барические и сезонные эффекты, учет гравиметрических поправок при измерениях в Прибайкалье

### Введение

Мониторинг вариаций силы тяжести на наноуровне требует учета вклада изменений плотности, вызванных вариациями деформации и движением флюида в слоях земной коры. Известно, что одним из методов изучения объемной деформации является измерение водного уровня в глубоких скважинах и колодцах. В этом случае жидкость в скважине действует как объемный деформограф. При этом появляется возможность регистрировать эффекты, связанные с тектонической составляющей, приливным воздействием Луны и Солнца и атмосферным давлением [1–5]. Используя цифровые методы и теорию приливной деформации Земли, появляется возможность откалибровать такой естественный инструмент. Объемные деформации порядка  $10^{-8}$  вызывают наблюдаемые современной аппаратурой приливные колебания водного уровня. В гравиметрии при мониторинге поля силы тяжести, помимо изучения вариаций объемной деформации, важное значение имеет задача учета вариаций уровня грунтовых вод. Этот процесс сложен в расчетах, связан с понятиями «проводимость», «пористость горных пород»

и «время воздействия». Так, для района Токио (Япония) при 20 % пористости горных пород изменение уровня на 1 метр приводит к изменению силы тяжести на 11 микрогал [6]. Но в целом вариации уровня грунтовых вод очень разнообразны и с трудом поддаются оценке. Наиболее остро задача расчета гравиметрических поправок встала в последние десятилетия, с развитием в Западной Европе и странах мира систематических измерений стационарными криогенными гравиметрами (относительными гравиметрами с использованием эффекта сверхпроводимости – SG), с точностью регистрации вариаций силы тяжести до сотых микрогала [7, 8]. Известно, что сезонные изменения уровня грунтовых вод имеют естественный и искусственный характер. Изучая изменения в тектонически-спокойном районе, можно определить уровень нормальных вариаций. Так, по данным европейских станций для вариаций, зарегистрированных в Нидерландах за 45 лет [8], сезонные изменения носят регулярный характер и достигают 1 м, при этом долговременный линейный ход, видимо, связанный с климатическими изменениями в регионе, составляет 2 см в год (рис. 1).

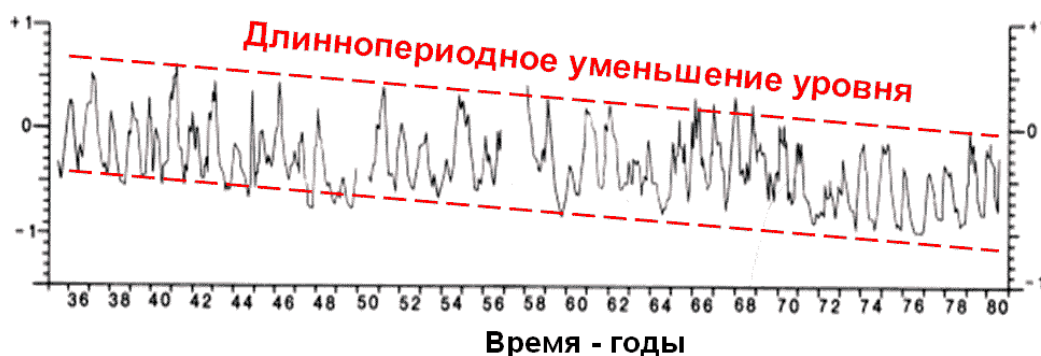


Рис. 1. Сезонные и долгопериодные вариации уровня грунтовых вод в Нидерландах (1935–1980 гг.). Вертикальная шкала в метрах (-1; 0; +1)

Задачами нашей работы являются изучение отражения геодинамических и сейсмических эффектов в флуктуациях водного уровня, на примере трех глубоких скважин, расположенных в Приморском, Камчатском и Байкальском регионах, оценка вклада изменений объемной деформации в результатах гравиметрических измерений.

### Методы анализа

Изучение объемной деформации земной коры, отражающееся в изменениях уровня грунтовых вод проводилось нами на основе данных, полученных на скважинах Сибири и Дальнего Востока России, расположенных в Приморье, на полуострове Камчатка и в рай-

оне озера Байкал. Приливные эффекты являются одним из редких явлений в геофизике, где точно известна сила. Используя известные приливные модели, можно определить чувствительность отдельных скважин к деформациям.

Известны три модели водоносных систем: замкнутый пласт, незамкнутый пласт и ограниченная полость [9].

Замкнутый водоносный пласт состоит из проницаемого пористого слоя, покрытого сверху и снизу непроницаемым материалом. В этом случае изменение гидростатического напора  $dp$  в слое  $dh$ , вызванное дилатацией  $\Delta$ , будет

$$dh = \frac{dp}{\rho \cdot g} = \frac{\Delta \cdot K}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  – пористость;  $\rho$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $K$  – объемный модуль упругости воды.

Водоносный слой снизу ограничен водупором (водонепроницаемым слоем) – незамкнутый пласт. В этом случае деформация среды меняет положение водоносного горизонта, т. е. вызывает изменения в высоте поверхности  $db$

$$db = \left( \frac{\Delta}{n} \right) \cdot b, \quad (2)$$

где  $b$  – высота уровня вод.

В водоносных системах такого типа пористость должна быть малой, или толщина слоя должна быть большой для того, чтобы можно было наблюдать значимые приливные вариации.

Для модели «ограниченная полость» в монокристаллических породах при рассмотрении изменений водного уровня, вызванных приливной деформацией, исходили из следующего соотношения:

$$dH = \frac{dV}{\pi r^2 + \rho \cdot g \cdot \frac{V}{K}}, \quad (3)$$

где  $dH$  – перемещение воды, вызванное изменением  $dV$  в объеме  $V$  ограниченной полости;  $r$  – радиус скважины.

Таким образом, для скважины глубиной 1 000 м приблизительные оценки приливной амплитуды (при деформации  $\Delta = 3 \cdot 10^{-8}$ ) соответственно дают: 90 мм,  $0,6 \cdot 10^{-3}$  мм и 6 мм. Для одних типов моделей главным предметом изучения является пористость и реакция на прохождение сейсмических волн [10, 11], для других предмет изучения – эффекты, связанные с современной сейсмичностью и изменением геодинамических условий, а для третьих это особенности структуры – разломы и параметры системы трещин в массивах горных пород.

### Результаты наблюдений и интерпретация

В работе проводится анализ данных наблюдений вариаций водного уровня в следующих скважинах: Бычиха (№ 1401, в районе пос. Бычиха, Хабаровский край координаты  $\varphi = 48^{\circ}19'N$ ,  $\lambda = 134^{\circ}49'E$ , глубина 1 000 м), ЮЗ-5 (полуостров Камчатка,  $\varphi = 53^{\circ}169'N$ ,  $\lambda = 158^{\circ}41'E$ , глубина 1 001 м), Талая (скв. № 1608, Прибайкалье,  $\varphi = 51^{\circ}41'N$ ,  $\lambda = 103^{\circ}38'E$ , глубина 110 м). Регистрация изменений водного уровня в последние десятилетия проводилась с помощью установленных в скважинах датчиков типа «Кедр-2» и его модификаций, чувствительность систем составляет от 0,1 до 1 мм. Цифровая запись атмосферного давления проводилась датчиками с чувствительностью 1 мбар и лучше. Приливный анализ выполнялся с помощью программы ETERNA [12], использованы известные параметры приливной деформации Земли [13]. Датчики расположены в изотермических условиях, опрос – от минут до часа, серии от 3 до 18 лет. Рассмотрим результаты, полученные на глубоких скважинах (1 000 м). Скважина Бычиха расположена в 300 км от морского побережья (в 600–700 километрах от Тихоокеанского сейсмического кольца и зоны субдукции – Курильских островов и Японии, вне зоны влияния активных разломов). Здесь, исходя из описания геологического разреза и регистрируемого уровня приливных вариаций, актуальна модель «замкнутый пласт». Примеры записи вариаций для скважины приведены на рис. 2, 3.

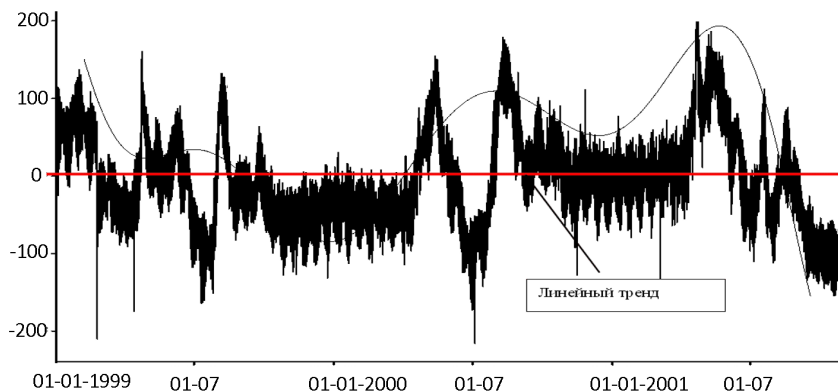
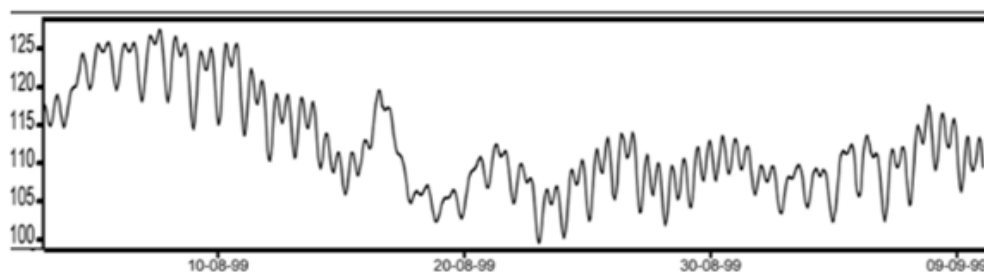
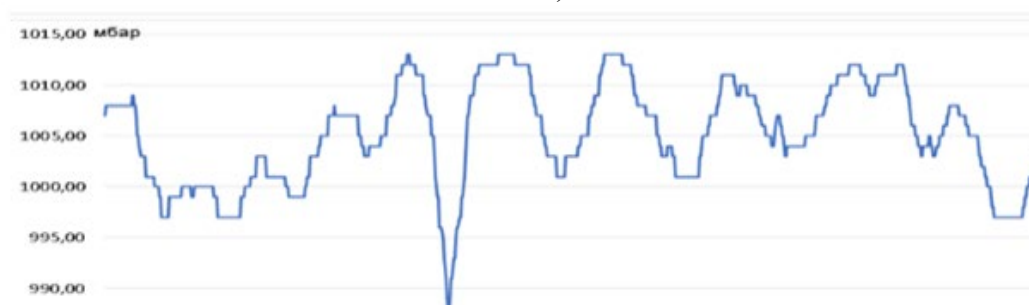


Рис. 2. Трехлетний ряд вариации уровня воды в скважине Бычиха (01.01.1999–01.01.2002). Вертикальная шкала в миллиметрах. Сезонные вариации, зарегистрированные в летний период, связаны с осадками



а)



б)

Рис. 3. Результаты измерений уровня в скважине и вариаций атмосферного давления в Хабаровском крае:

а) вариации уровня в скважине Бычиха, время с 03.08.1999 по 10.10.1999. Вертикальная шкала в сантиметрах. Амплитуда приливных вариации до 5 см; б) вариации атмосферного давления в миллибарах. Курьезным фактом является аномалия уровня воды в период сильного землетрясения в Турции (17.08.1999, координаты 29,9°N, 40,7°E, M = 7,8, H = 17 км). В этот период аномалия уровня вызвана вариациями атмосферного давления

Из анализа по полусуточной волне M2 получено соотношение для чувствительности водного уровня скважины от величины деформации:  $1,590 \text{ мм}/10^{-9}$ . Полученный коэффициент хорошо соответствует результатам, полученным в других регионах, например, в Китае для пятнадцати скважин значение коэффици-

ента связи меняется от  $0,52$  до  $2,03 \text{ мм}/10^{-9}$  [14]. На графике многолетних изменений (рис. 3) выделяются сезонные вариации в летний период (до 200 мм), связанные с периодом муссонных дождей. Линейный многолетний тренд на этом пункте наблюдается на уровне приливных деформаций  $3 \cdot 10^{-8}$ . Оценивая связь вари-

ций  $g$  и изменений плотности  $\rho$ , вызванных деформацией среды, можно использовать известную формулу для притяжения бесконечного плоского слоя

$$\Delta g = 2\pi \cdot k \cdot \Delta\rho \cdot d = 2\pi \cdot k \cdot \Delta\varepsilon \cdot \rho \cdot d, \quad (4)$$

где  $\Delta g$  – изменение значения силы тяжести;  $k$  – гравитационная постоянная;  $\Delta\rho$  – изменение плотности  $\rho$  из-за вариации объемной деформации  $\Delta\varepsilon$  земной коры ( $\Delta\rho = \Delta\varepsilon \cdot \rho$ );  $d$  – толщина деформированного слоя земной коры;  $\rho$  – средняя плотность земной коры. При деформации  $3 \cdot 10^{-8}$ , мощности земной коры 50 км и ее плотности  $2,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, получаем  $\Delta g = 0,1$  мкГал, ме-

нее ошибки высокоточных гравиметрических измерений.

Скважина ЮЗ-5 расположена на полуострове Камчатка в 15 км от залива Авача (Тихий океан), в 100 км от зоны субдукции. Описание и анализ параметров водоносного слоя достаточно полно представлены в работах [2, 15]. Для скважины используем модель типа «закрытый пласт». На многолетних графиках вариаций уровня преобладает сезонная компонента амплитудой до 0,5 м (рис. 4, 5). Из приливного анализа по полусуточной волне М2 для скважины нами получен коэффициент связи с объемной деформацией  $0,890$  мм/10<sup>-9</sup>.

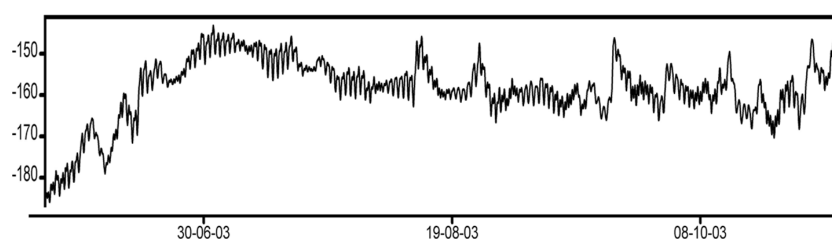


Рис. 4. Вариации уровня воды в скважине ЮЗ-5 за период 01.06.2003 – 10.11.2003. Вертикальная шкала в сантиметрах. Приливные вариации до 3 см

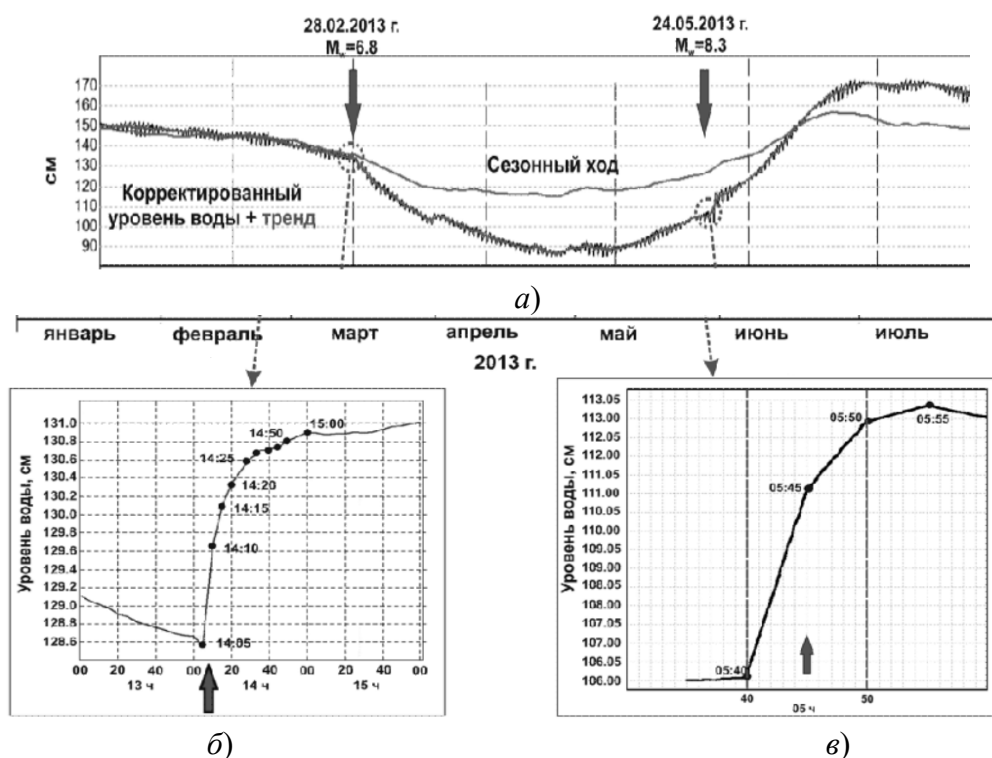


Рис. 5. Результаты измерений в скважине на Камчатке:

а) вариации уровня в скважине ЮЗ-5 на период 01.01.2013 – 01.08.2013; б) косейсмические вариации уровня при землетрясении 28.02.2013, с 00 минут 13 часов до 00 минут 16 часов, время минута и часы, магнитуда 6,8; в) косейсмические вариации уровня при землетрясении 24.05.2013, с 30 минут 05 часов до 00 минут 06 часов, время часы и минуты, магнитуда 8,3 [14]

Интересна косейсмическая реакция уровня на сильные землетрясения. Так, в период сильнейших землетрясений 2013 г. – 28 февраля ( $M_w = 6,8$ , расстояние до эпицентра  $R = 280$  км, гипоцентр на глубине 45 км) и 24 мая ( $M_w = 8,3$ ,  $R = 370$  км, гипоцентр на глубине 611 км), в изменениях уровня воды в скважине ЮЗ-5 были зарегистрированы скачки с амплитудами 2,3 и 7,3 см соответственно, или  $2,5 \cdot 10^{-8}$  и  $8,2 \cdot 10^{-8}$  для деформации (рис. 5). В обоих случаях наблюдалось повышение уровня, отражающее сжатие горных пород. Используя сейсмологические данные и дислокационную модель землетрясения [16], получены оценки косейсмической деформации в районе скважины ЮЗ-5 (для землетрясения 28 февраля 2013 г. –  $1,5 \cdot 10^{-8}$ ; для землетрясения 24 мая 2013 г. –  $6,2 \cdot 10^{-8}$ ). Эти величины неплохо соответствуют результатам наблюдений водного уровня.

Скважина на сейсмостанции Талая расположена в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ), известной своей сейсмической активностью, в 7 км от берега в юго-западной части озера Байкал. Центральная часть БРЗ по геологическим и сейсмологическим данным – это область растяжения, являющаяся западной границей Амурской тектонической плиты. На сейсмостанции 110-метровая скважина пробурена в скальных породах. Приливный анализ результатов наблюдений показал малую амплитуду прилива (2 мм). Исходя из геологии и амплитуды прилива, в этом случае используем модель «ограниченная полость» (рис. 6). Из приливного анализа уровня для полусуточной волны  $M_2$  для Талой получено соотношение с деформацией  $0,1 \text{ мм}/10^{-9}$ .

Многолетние вариации водного уровня (1993–2009 гг.) показывают значительные сезонные флуктуации, связанные с периодом выпадения осадков разной интенсивности (июль – август) и многомесячных со спадом уровня. Многолетний график вариаций уровня можно сравнить с данными измерений деформаций в 90-метровой штольне, построенной на склоне долины в 200 м от скважины, расположенной у другого борта долины. Деформографами зарегистрированы многолетние изменения объемной деформации (рис. 7) величиной до  $1 \cdot 10^{-6}$  [17], что должно привести к изменениям уровня в 10 см. К сожалению, такие изменения на фоне сезонных вариаций 50–150 см практически невозможно выделить (рис. 7). Как и для скважины ЮЗ-5, расположенной на Камчатке, наблюдения водного уровня оказались наиболее полезны при регистрации быстрых – косейсмических вариаций.

Так, на рис. 8 приведен скачок уровня после локального Култукского землетрясения 27.08.2008 ( $M = 6,5$ , расстояние до эпицентра, расположенного на дне озера Байкал, 25 км, гипоцентр – на глубине 15 км), свидетельствующий о эффекте растяжения. Такой результат вместе с данными о смещениях пункта, полученными по GPS измерениям на сейсмостанции

Талая, позволяет уточнить положение эпицентра. В этом случае в рамках дислокационной модели использовано решение прямой задачи с сейсмологическими параметрами. Уточнение позиции очага особенно полезно в случае, если сейсмический разрыв не выходит на земную поверхность или находится на дне озера.



Рис. 6. Пример приливных вариации водного уровня, почасовые данные, зарегистрированные с 15 мая по 1 июля 2009 гг. в скважине Талая. Вертикальная шкала в миллиметрах. Приливная амплитуда 2 мм

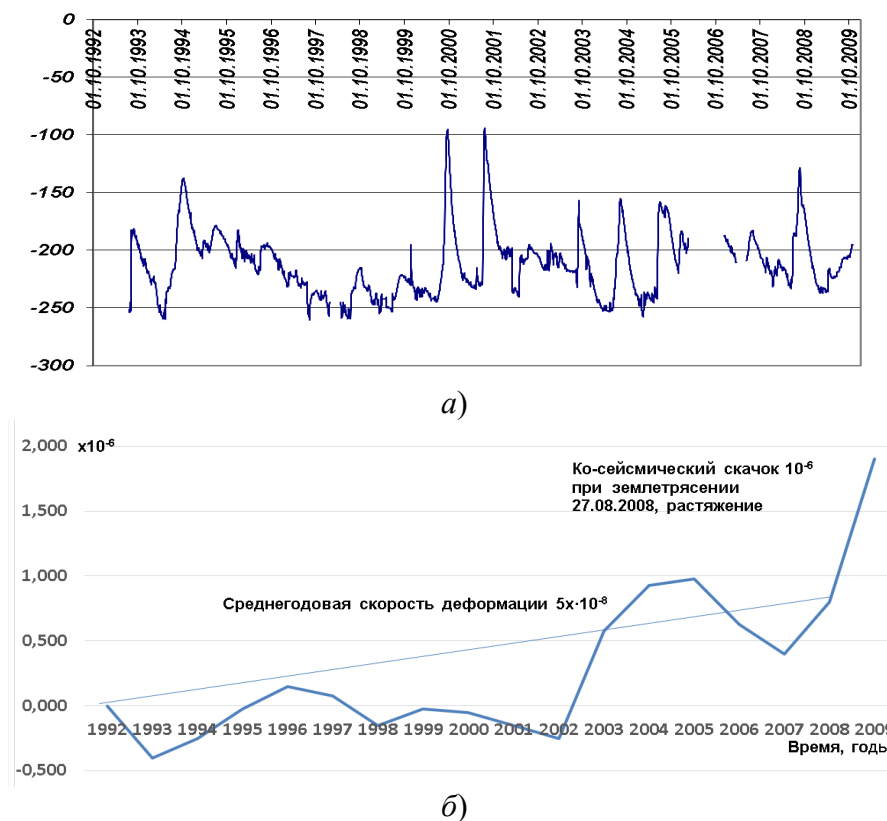


Рис. 7. Результаты одновременных измерений уровня воды и вариаций объемной деформации на сейсмостанции Талая (Байкал):

а) многолетние вариации водного уровня в скважине Талая (1993–2009 гг.) по ежесуточным определениям, период наблюдений с годов с 1993–2009 гг. Вертикальная шкала в сантиметрах; б) изменения объемной деформации, полученные штанговыми и лазерными системами в штольне сейсмостанции. График построен по годовым измерениям. Время – годы, вертикальная шкала деформация построена с шагом  $0,5 \cdot 10^{-6}$ . Вклад годовых изменений деформации в результаты гравиметрических измерений по формуле (4) дает оценку  $\Delta g = 0,2$  микрогал, что на порядок меньше ошибки гравиметрических измерений



Рис. 8. Сезонные и косейсмические изменения водного уровня в скважине Талая в см за период: июнь 2007 – декабрь 2009, по ежесуточным определениям. Показан косейсмический скачок 10 см ( $1 \cdot 10^{-6}$ ) при Култукском землетрясении 27.08.2008. Быстрая косейсмическая деформация по измерениям уровня хорошо соответствует деформографическим измерениям в штольне

Наш интерес к вариациям водного уровня в первую очередь был вызван необходимостью оценки их вклада в результаты гравиметрических измерений, выполняемых с помощью абсолютного гравиметра ГАБЛ на сейсмостанции Талая, в специальном подвале. Расстояние между гравиметрическим подвалом, расположенным под зданием сейсмостанции на коренных породах, и скважиной, расположенной у противоположного склона долины, составляет 100 м. Коренные

породы (архейский мрамор) на дне долины перекрыты моренными отложениями мощностью от 0 до 2 м. Анализ многолетних вариаций поля силы тяжести и флуктуаций водного уровня показал полное отсутствие корреляции (рис. 9), что связано с размещением гравиметрических постаментов на коренных породах. В момент сильного близкого землетрясения обнаруживается сложная связь вертикальных смещений, деформации и силы тяжести [18].

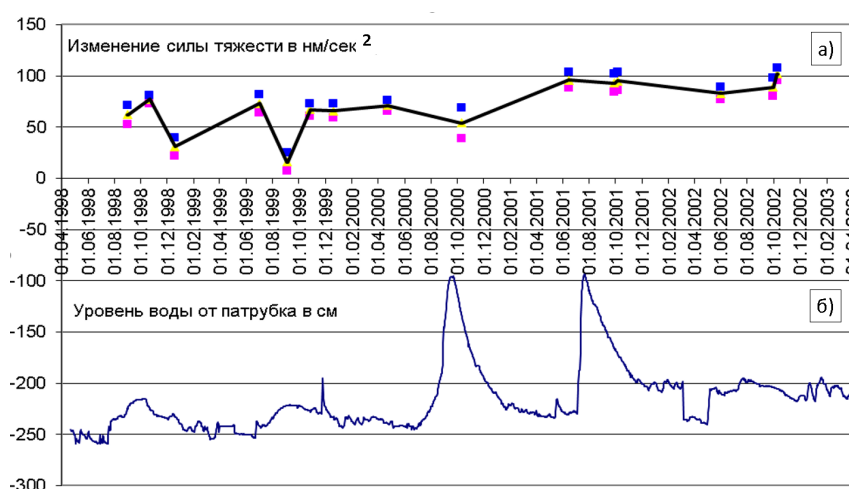


Рис. 9. Данные многолетних измерений уровня воды в скважине и силы тяжести на сейсмостанции Талая (Байкал):

а) вариации силы тяжести по данным абсолютного гравиметра ГАБЛ, вертикальная шкала в  $\text{нм/с}$  ( $10 \text{ нм/с}^2 = 1 \text{ мкгал}$ ), по горизонтальной шкале время с 01.04.1998 по 01.04.2003, деления шкалы – 2 месяца; б) изменения водного уровня, вертикальная шкала в сантиметрах

Еще одной особенностью, выделенной в результате приливного анализа, являлся положительный фазовый сдвиг, полученный для объемной деформации (волна M2:  $+79,40^\circ \pm 0,09^\circ$ ). Заметим, что положительный фазовый сдвиг, т. е. опережение реакции относительно силы физически невозможно. В приливных исследованиях такой эффект может наблюдаться только на побережье океана, где динамический эффект прилива в океанах и прибрежных морях может вызвать резонансы на отдельных частотах и в итоге изменить и амплитуду, и фазовый отклик [13]. Отметим, что на Талой скважина глубиной 110 м пробурена в монолитных мраморах, расположена у борта горной долины. В долине имеются мелкие водные источники, один из них протекает в нескольких метрах от скважины. Ориентация долины

составляет около  $N40^\circ E$ . Чтобы получить нулевую фазу с помощью приливного анализа, было подобрано решение для горизонтальной деформации с минимизацией фазового запаздывания в азимуте  $130^\circ$  (рис. 10). Исходя из модели «ограниченная полость» (3) получен объем воды  $V = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ , которая заполняет систему близь поверхностных трещин. Полученному результату соответствует физическая модель – система ориентированных трещин, работающая как сильфон. Зона трещиноватости (ориентация около  $N40^\circ E$ ) расположена в 100 м от гравиметрического пункта, простирается вдоль борта горной в 100 м по горизонтали от гравиметрического пункта. В таком случае, даже при вариациях водного уровня в 1–2 м, эффект притяжения будет много меньше 1 микрогала.



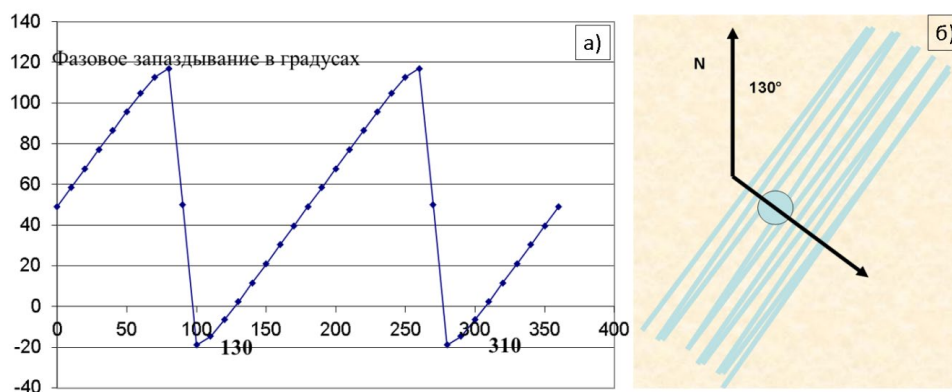


Рис. 10. Результаты анализа вариаций уровня воды в скважине и модель процесса:

а) изменение фазового запаздывания по результатам приливного анализа данных от  $-20$  градусов до  $120$  градусов (вертикальная шкала). Вариация азимутов от  $0$  до  $360$  градусов (горизонтальная шкала). Фазовое запаздывание минимизируется при значении азимута  $130^\circ \pm n \cdot \pi$ ; б) модель области скважины, работающая как сифон. Система трещин, ориентированных в азимуте  $N40^\circ E$ , направление линейной деформации с нулевой фазой  $N130^\circ E$

### Выводы

Проведены оценки вклада вариаций деформации земной коры в результаты гравиметрических измерений микрогального уровня. Вариации деформации могут измеряться разными методами. Для оценки изменений объемной деформации были проанализированы результаты измерений уровня воды, полученные в разных геологических условиях на трех скважинах, расположенных в Приморье, на Камчатке и в Прибайкалье. Флуктуации уровня в основном связаны с приливным воздействием, вариациями атмосферного давления и сезонным вкладом осадков. Приливные амплитуды на глубоких скважинах с замкнутым ограниченным пластом, пробуренных в осадочных породах, составляют  $30\text{--}50$  мм. Для скважины, расположенной в монолитных коренных породах, полученные амплитуды меньше –  $2$  мм. Исследование годовых вариаций уровня грунтовых вод по измерениям в глубоких скважинах ( $1$  км) дает оценку вклада в изменения силы тяжести  $0,1$  микрогал.

В сейсмоактивных районах Прибайкалья и Камчатки выделены ко-сейсмические изменения уровня. Быстрые вариации уровня (минуты – часы) в моменты сильных землетрясений ( $M$  от  $6,5$  до  $8,3$ ) составляли от  $2$  до  $10$  см. Используя приливный коэффициент, проведена оценка косейсмического скачка деформаций. Она составила от  $2,5 \cdot 10^{-8}$  и  $1 \cdot 10^{-6}$ , в зави-

симости от расстояния до очага, энергии и глубины гипоцентра. Вклад в вариации силы тяжести составит от  $0,1$  до  $5$  микрогал. Такие оценки хорошо соответствуют модельным значениям, полученным с помощью дислокационной модели землетрясения и сейсмологических данных. Оценки скачка деформации дают дополнительную информацию о косейсмических эффектах в разных сейсмоактивных регионах. Для скважины Талая (Байкал), пробуренной в монолитных породах (архейский мрамор), используя приливный анализ и значение фазового запаздывания, определены направление системы (зон) трещиноватости ( $N40^\circ E$ , вдоль долины) и ее объем.

Анализ показывает, что для гравиметрических пунктов, расположенных на монолитных коренных горных породах, вклад годовых вариаций грунтовых вод значительно меньше ошибки абсолютных гравиметрических наблюдений ( $1$  микрогал). Быстрые косейсмические деформации хорошо отражаются в результатах водных уровневых, деформографических и гравиметрических измерениях сопоставимого уровня точности. Медленные перетекания флюидов сложны для оценки вклада в гравиметрические результаты и для пунктов, расположенных на осадочных породах, вопрос об учете вариаций уровня грунтовых вод остается открытым для дискуссий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багмет А. Л., Багмет М. И., Барабанов В. Л., Гриневский А. О., Киссин И. Г., Малугин В. А., Рукавишников Т. А., Савин И. В. Исследование земноприливных колебаний уровня подземных вод на скважине «Обнинск» // Физика Земли. – 1989. – № 11. – С. 84–96.
2. Копылова Г. Н., Болдина С. В. Оценка пороупругих параметров резервуара подземных вод (по данным уронемерных наблюдений на скважине ЮЗ5, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. – 2006. – № 2. – С. 17–28.
3. Cuttillo P. A., Bredehoeft J. D. Estimating Aquifer Properties from the Water Level Response to Earth Tides // Ground Water. – 2011. – Vol. 49, No. 4. – P. 600–610. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00778.x.
4. Xue L., Li Y.-B., Brodsky E. E., Xu Z.-Q., Kano Y., Wang H., Mori J. J., Si J.-L., Pei J.-L., Zhang W., Yang G., Sun Z.-M., Huang Y. Continuous Permeability Measurements Record Healing Inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone // Science. – 2013 – Vol. 340. – P. 1555–1559.
5. Rahi K. A., Halihan T. Identifying Aquifer Type in Fractured Rock Aquifers using Harmonic Analysis // Ground Water. – 2013. – Vol. 51, No. 1 – P. 76–82. doi: 10.1111/j.1745-6584.2012.00925.x.
6. Цубои Т. Гравитационное поле Земли. – М. : Мир, 1982. – С. 286.
7. Van Camp M., Francis O. Is the instrumental drift of superconducting gravimeters a linear or exponential function of time? // Journal of Geodesy. – 2007. – Vol. 81. – P. 337–344. doi: 10.1007/s00190-006-0110-4/.
8. Hinderer J., Crossley D. Two Decades of High Precision Gravimetry // NEWSLETTER. – 5 June 2006. – No. 17. – P. 2–12.
9. Melchior P. Die gezeiten in unterirdischen flussigkerten // Erdoel Kohle. – 1960. – Vol. 13. – P. 312–317.
10. Cooper H. H., Bredehoeft J. D., Papadopoulos I. S., Bennett R. R. The response of well-aquifer systems to seismic waves. // Journal of Geophysical Research. – 1965. – Vol. 71. – P. 3915–3926.
11. Bredehoeft J. D. Response of well-aquifer systems to Earth Tides // Journal of Geophysical Research. – 1967. – Vol. 72, No 12. – P. 3076–3087.
12. Wenzel H. G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 // BIM (MareesTerrestres, Bull. D'Informations). – Belgium, 1994. – No. 118. – P. 8719–8721.
13. Timofeev V. Y., Valitov M. G., Ardyukov D. G., Timofeev A. V., Ducarme B., Kulinich R. G., Kolpashikova T. N., Proshkina Z. N., Boyko E. V. Ocean Tidal Models and Tidal Gravity Observation // Oceanology. – 2020. – Vol. 60. – No. 1. – P. 29–39. doi: 10.1134/S0001437020010221.
14. Lai G., H. Ge, W. Wang. Transfer functions of the well-aquifer system response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band // Journal of Geophysical Research. Solid Earth. – 2013. – No. 118. – P. 1904–1924. doi: 10.1002/jgrb.50165/.
15. 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. – Вып. 30, № 2. – С. 66–76.
16. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1985. – Vol. 75, No. 4. – P. 1135–1154.
17. Timofeev V. Y., Ardyukov D. G., Timofeev A. V., Boyko E. V., Semibalamut V. M., Fomin Y. N., Panov S. V., Parushkin M. D. The Use of Strainmeters to Study Oscillation Processes in a Wide Frequency Range // Seismic Instruments. – 2020. – Vol. 56, No. 4. – P. 380–393. doi: 10.3103/S0747923920040106.
18. Timofeev V. Y., Kalish E. N., Stus Y. F., Ardyukov D. G., Valitov M. G., Timofeev A. V., Nosov D. A., Sizikov I. S., Boiko E. V., Gornov P. Y., Kulinich R. G., Kolpashchikova T. N., Proshkina Z. N., Nazarov E. O., Kolmogorov V. G. Gravity and Displacement Variations in the Areas of Strong Earthquakes in the East of Russia // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2018. – Vol. 54. No. 3. – P. 430–443.

Получено 26.04.2021

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев,  
П. Ю. Горнов, Ю. Ф. Стусь, В. М. Семибаламут, 2021

## VOLUME DEFORMATION VARIATIONS AND WELL-AQUIFER RESPONSE, ITS CONNECTION WITH GRAVITY MEASUREMENTS

### *Vladimir Yu. Timofeev*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, D. Sc., Chief Researcher, phone: (383)330-53-75, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### *Dmitriy G. Ardyukov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)330-53-75, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

### *Anton V. Timofeev*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 3, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Ph. D., Researcher, phone: (383)330-53-75, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

### *Pavel Yu. Gornov*

Kosigin Institute of Tectonics and Geophysics Far Eastern Branch of RAS, 65, Kim Yu. Chen St., Khabarovsk, 680000, Russia, Ph. D, Senior Researcher, e-mail: gornov@itig.as.khb.ru

### *Yurii F. Stus*

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 1, Prospect Akademik Koptyug St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: yfstus@academ.org

### *Vladimir M. Semibalamut*

Siberian Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences", 13/3, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Director, phone: (383)330-88-48, e-mail: wladim28@yandex.ru.

Precise gravity measurements at  $g_0 \cdot 10^{-9}$  level requires taking into account density change, caused by the Earth's crust deformation and the movement and position of the fluid in the layer. The paper presents analysis of water level observation in three boreholes situated at Primorie, at Kamchatka and at Baikal region. Water-level fluctuations were influenced by earth tides, barometric pressure, co-seismic effects and season precipitations. Water tidal signal was analyzed for calculations of level-strain coefficients, its values changed from  $0.1 \text{ mm}/10^{-9}$  to  $1.6 \text{ mm}/10^{-9}$ . Gravity corrections were developed by volume variation. For borehole drilled at monolithic rock we used the phase-lag effect for tidal strain and crack-system orientation was studied in Pribaikalie mountain valley. Long-term gravity results were tested with water level data at Talaya station (Pribaikalie). Talaya gravity point situated at monolithic rock had no influence from water level variation. Level-correction was less than absolute gravity measurement error. Quick co-seismic effects of earthquakes are well registered by level measuring, deformation graphical and absolute gravimetric methods.

**Keywords:** absolute gravity observation by GABL and different kind correction, water level into borehole, volume deformation, Primorie, Kamchatka, Pribaikalie, co-seismic, tidal, barometric, and season effects, gravity correction for Pribaikalie measurements

## REFERENCES

1. Bagmet, A. L., Bagmet, M. I., Barabanov, V. L., Grinevskii, A. O., Kissin, I. G., Malygin, V. A., Rukavishnikova, T. A., & Savin, I. V. (1989). Investigation of earth-tidal fluctuations in the level of groundwater at the well "Obninsk". *Fizika Zemli [Physics of the Earth]*, 11, 84–96 [in Russian].
2. Kopylova, G. N., & Boldina, S. V. (2006). Estimation of the poroelastic parameters of the groundwater reservoir (according to level observation data at the well YuZ5, Kamchatka). *Vulkanologia i seismologia [Volcanology and Seismology]*, 2, 17–28 [in Russian]
3. Cuttillo, P. A., & Bredehoeft, J. D. (2011). Estimating Aquifer Properties from the Water Level Response to Earth Tides. *Ground Water*, 49(4), 600–610. doi: 10.1111/j.1745-6584.2010.00778.x

4. Xue, L., Li, Y-B., Brodsky, E. E., Xu, Z-Q., Kano, Y., Wang, H., Mori, J. J., Si, J-L., Pe,i J-L., Zhang, W., Yang, G., Sun, Z-M., & Huang, Y. (2013). Continuous Permeability Measurements Record Healing Inside the Wenchuan Earthquake Fault Zone. *Science*, 340, 1555–1559.
5. Rahi, K. A., & Halihan, T. (2013). Identifying Aquifer Type in Fractured Rock Aquifers using Harmonic Analysis. *Ground Water*, 51(1), 76–82. doi: 10.1111/j.1745-6584.2012.00925.x.
6. Tsuboie, T. (1982). *Gravitatsionnoe pole Zemli [Earth's gravitational field]*. Moscow: Mir Publ., 286 p. [in Russian]
7. Van Camp, M., & Francis, O. (2007). Is the instrumental drift of superconducting gravimeters a linear or exponential function of time? *Journal of Geodesy*, 81, 337–344. doi: 10.1007/s00190-006-0110-4
8. Hinderer, J., & Crossley, D. (2006). Two Decades of High Precision Gravimetry. *Newsletter*, 17, 2–12.
9. Melchior, P. (1960). Die gezeiten in unterirdischen flussigkerten. *Erdoel Kohle*, 13, 312–317.
10. Cooper, H. H., Bredehoeft, J. D., Papadopulos, I. S., & Bennett, R. R. (1965). The response of well-aquifer systems to seismic waves. *Journal of Geophysical Research*, 71, 3915–3926.
11. Bredehoeft, J. D. (1967). Response of well-aquifer systems to Earth Tides. *Journal of Geophysical Research*, 72(12), 3076–3087.
12. Wenzel, H. G. (1994). Earth tide analysis package ETERNA 3.0. *BIM (MareesTerrestres, Bull.D'Informations)*, 118, 8719–8721.
13. Timofeev, V. Y., Valitov, M. G., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Ducarme, B., Kulinich, R. G., Kolpashikova, T. N., Proshkina, Z. N., & Boyko, E. V. (2020). Ocean Tidal Models and Tidal Gravity Observation. *Oceanology*, 60(1), 29–39. doi: 10.1134/S0001437020010221.
14. Lai, G., Ge, H., & Wang, W. (2013). Transfer functions of the well-aquifer system response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 118, 1904–1924. doi: 10.1002/jgrb.50165.
15. Boldina, S. V., & Kopylova, G. N. (2016). Coseismic effects of strong Kamchatka earthquakes in 2013 in water level changes in the YuZ-5 well. *Vestnik KRAUNS. Seria: Nayki o Zemle [Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences]*, 30(2), 66–76 [in Russian]
16. 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.
17. Timofeev, V. Y., Ardyukov, D. G., Timofeev, A. V., Boyko, E. V., Semibalamut, V. M., Fomin, Y. N., Panov, S. V., & Parushkin, M. D. (2020). The Use of Strainmeters to Study Oscillation Processes in a Wide Frequency Range. *Seismic Instruments*, 56(4), 380–393. doi: 10.3103/S0747923920040106.
18. Timofeev, V. Y., Kalish, E. N., Stus, Y. F., Ardyukov, D. G., Valitov, M. G., Timofeev, A. V., Nosov, D. A., Sizikov, I. S., Boiko, E. V., Gornov, P. Y., Kulinich, R. G., Kolpashchikova, T. N., Proshkina, Z. N., Nazarov, E. O., & Kolmogorov, V. G. (2018). Gravity and Displacement Variations in the Areas of Strong Earthquakes in the East of Russia. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54(3), 430–443.

Received 26.04.2021

© V. Y. Timofeev, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev,  
P. Y. Gornov, Y. F. Stus, V. M. Semibalamut, 2021