

Изменение амплитудных показателей в приливных вариациях силы тяжести в период подготовки близких землетрясений

© 2021 М. Г. Валитов, З. Н. Прошкина*

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

*E-mail: pro-zo@yandex.ru

Резюме. Впервые применив подход, основанный на методике расчета приливных параметров в скользящем окне с различной длиной выборки (от 30 до 120 сут), авторы выявили эффект в вариациях гравитационного поля для главной лунной волны O1, который предшествовал близким землетрясениям. Поскольку наблюдаемые данные были избавлены от океанической нагрузки, то предполагается, что данный эффект связан с локальной перестройкой плотностной среды в твердой Земле. Для волны K1 выявлена сезонная цикличность. Такая цикличность не учитывалась при составлении модели твердой Земли PREM (предварительная эталонная модель Земли).

Ключевые слова: приливные вариации силы тяжести, геодинамика, сейсмичность, гравитационный эффект

Change in the amplitude indicators in tidal variations of gravity during the preparation of nearby earthquakes

Maksim G. Valitov, Zoya N. Proshkina*

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

*E-mail: pro-zo@yandex.ru

Abstract. The authors revealed an effect of gravitational field variations for the principal lunar wave O1, which preceded nearby earthquakes, using for the first time the approach based on the method of calculating tidal parameters in a sliding window with various window width (from 30 to 120 days). Since the observed data were free from the oceanic load, this effect is assumed to be associated with a local restructuring of the density medium in the solid Earth. A seasonal cyclicity was revealed for the K1 wave. Such cyclicity was not taken into account when compiling a solid Earth model PREM (preliminary reference Earth model).

Keywords: tidal variations of gravity, geodynamics, seismicity, gravity effect

Для цитирования: Валитов М.Г., Прошкина З.Н. Изменение амплитудных показателей в приливных вариациях силы тяжести в период подготовки близких землетрясений. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 3, с. 223–228. <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.223-228>

Благодарности и финансирование

Авторы благодарны рецензенту за внимательное прочтение работы и конструктивные замечания. Работа выполнена по программе фундаментальных научных исследований Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН (рег. № 121021500053-6).

Постановка задачи. В настоящее время актуальной задачей науки остается прогноз землетрясений – наиболее опасных геодинамических событий. Традиционно для этих целей используются изучение сейсмического режима [Семенов, 2010; Соболев 1997], геодезические наблюдения, в том числе с применением

For citation: Valitov M.G., Proshkina Z.N. Change in the amplitude indicators in tidal variations of gravity during the preparation of nearby earthquakes. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 3, pp. 223–228. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.3.223-228>

Acknowledgements and Funding

Authors are grateful to the Peer Reviewer for careful reading of the paper and constructive comments. The work was carried out under the program of Basic Scientific Research of the V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS (№ 121021500053-6)

спутниковой геодезии [Сдельникова, Стеблов, 2016], электромагнитные исследования [Довбня и др., 2019], анализ вариаций газовых эманаций [Уткин, Юрков, 2010], мониторинг деформаций и уровнемерные наблюдения [Долгих и др., 2007; Федотов, 1988], гравиметрические измерения [Добровольский, 2005] и др.

Гравиметрические исследования, как правило, основываются на методах, направленных на измерение абсолютного значения ускорения свободного падения и позволяющих с максимальной точностью определить высоту, а через нее вертикальные перемещения массива земной коры в точке наблюдения. Единственный недостаток этих измерений – их малая дискретность, но он целиком перекрывается главным преимуществом – отсутствием дрейфа или «сползания нуля».

Геодинамические процессы порождают множество откликов в физических полях Земли. Гравитационное поле также подвержено этому влиянию. Помимо нормального влияния Луны и Солнца, которое образует периодические вариации поля силы тяжести [Мельхиор, 1968], в наблюдаемом поле существуют аномальные эффекты, вызванные перераспределением масс внутри планеты, изменением упруго-вязких свойств, а вместе с ними и отклика земной поверхности на периодическое воздействие. Эти эффекты носят название непериодических вариаций силы тяжести. Они могут быть потенциально полезны при обнаружении подготовки сейсмического события в окрестностях пункта наблюдения.

С целью выявления в поле вариаций силы тяжести таких эффектов, которые могут быть вызваны как подготовкой землетрясения, так и постсейсмическими изменениями в литосфере, было выполнено исследование, основанное на методике расчета приливных параметров (ПП) в скользящем окне. С помощью этой методики можно проследить плавное изменение основных параметров главных приливных волн, а используя выборки разной длительности – определить оптимальную ширину окна для фиксации непериодических аномальных эффектов. Данная методика для расчета приливных параметров применяется впервые, поэтому исследование носит экспериментальный характер, и одной из целей работы является ее апробация. В целом исследование было направлено на обнаружение эффектов в гравитационном поле Земли, связанных с геодинамическими процессами, протекающими в зоне перехода от континента к Японскому морю, т.е. в геодинамически активном регионе. Стационарный гравиметрический пункт (СГП) находится на территории Морской экспериментальной станции «Мыс Шульца» (Приморский край, п-ов Гамова, бухта Витязь, 42.583° с.ш., 131.158° в.д.) (рис. 1) [Прошкина и др., 2015], где начиная с 2012 г. идет круглогодичный мониторинг вариаций гравитационного поля Зем-

ли. Для регистрации используется лабораторный относительный гравиметр gPhone № 111.

Экспериментальный материал. Методика исследований заключалась в многократном расчете в программе ETERNA [Wenzel, 1996] основных параметров (амплитудного δ -фактора и задержки фаз α) главных приливных волн (O1, K1, P1, M2, S2, K2) с различной длиной анализируемой выборки и шагом смещения расчетного окна. Такой подход к расчету приливных параметров используется впервые. Иными словами, из имеющейся выборки наблюдений вариаций силы тяжести выбирались «окна» определенной продолжительности, внутри которых выполнялись вычисления. При выборе размеров окна авторы стремились учесть две противоположности: зашумленность получаемых данных при минимальных размерах расчетного окна и сглаживание аномального эффекта при большой длине выборки. Качество получаемых приливных параметров оценивалось по среднеквадратичной ошибке (СКО) их определения. При длине анализируемой выборки 38 сут и более СКО определения дельта-фактора не превышала 0.001. При проведении вычислений расчетное окно «сдвигалось» на определенное количество суток (от 3 до 12) и вычисления повторялись. Величина «сдвига» зависела от размера окна и не превышала 0.1 от его значения.

Таким образом, для генеральной выборки (куда вошли ближайшие к пункту наблюдения землетрясения, т.е. с 2012 по 2014 г.) были получены серии расчетов с выборками различной длины, в которых начиная с определенной ширины окна, как мы предполагаем, могут присутствовать эффекты от геодинамических процессов, связанных с сейсмичностью региона. При увеличении ширины окна аномальный эффект должен плавно затухать, а параметры главных приливных волн должны стремиться к параметрам, полученным при анализе полного временного ряда.

Кроме того, при подготовке данных наблюденные вариации гравитационного поля были избавлены от влияния океанической нагрузки путем вычитания океанического прилива, полученного с использованием уровнемерных наблюдений. Данная методика подробно описана в работе [Прошкина и др., 2021].

Данные по землетрясениям получены из каталога National Earthquake Information Center (NEIC) (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>) Геологической службы США (рис. 1).

В Приморском крае наиболее часто случаются глубокофокусные землетрясения (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>). Они в основном сосредоточены в южных, юго-восточных, восточных районах Приморья и прилегающей акватории Японского моря. Прослеживается явная тенденция уменьшения глубины гипоцентров с запада на восток. Коровые землетрясения проявлены значительно реже. В основном они фиксируются на Ханкайском массиве и сопредельной территории западного Китая. Стоит отметить, что на протяжении длительного периода инструментальных наблюдений в Приморье работали только две сейсмостанции [Горелов, Шкабарня, 2014], не позволяющие в полной мере учитывать коровую сейсмичность, что в целом повлияло на общую сейсмическую изученность региона. На п-ове Корея регистрируются (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>) коровые землетрясения, обусловленные техногенными событиями – испытаниями ядерного оружия КНДР. Некоторые из происходящих в регионе землетрясений фиксируются на записи гравиметра, установленного на СГП «мыс Шульца», прохождением сейсмических волн. Замечено, что коровые землетрясения Китая более интенсивно воздействуют на гравиметр, чем аналогичные землетрясения Японии, находящиеся на сопоставимом удалении и имеющие сопоставимую магнитуду.

Результаты

С применением данной методики расчета приливных параметров в скользящем окне, с различной шириной окон (от 30 до 120 сут), был выявлен эффект в вариациях гравитационного поля, избавленных от влияния океанической нагрузки [Прошкина и др., 2021], для главной лунной волны O1 при подготовке близкого землетрясения (рис. 2). Поскольку описываемые землетрясения произошли в период апрель–ноябрь 2013 г., то для визуализации полученного результата был выбран участок записи с 2012 по 2014 г.

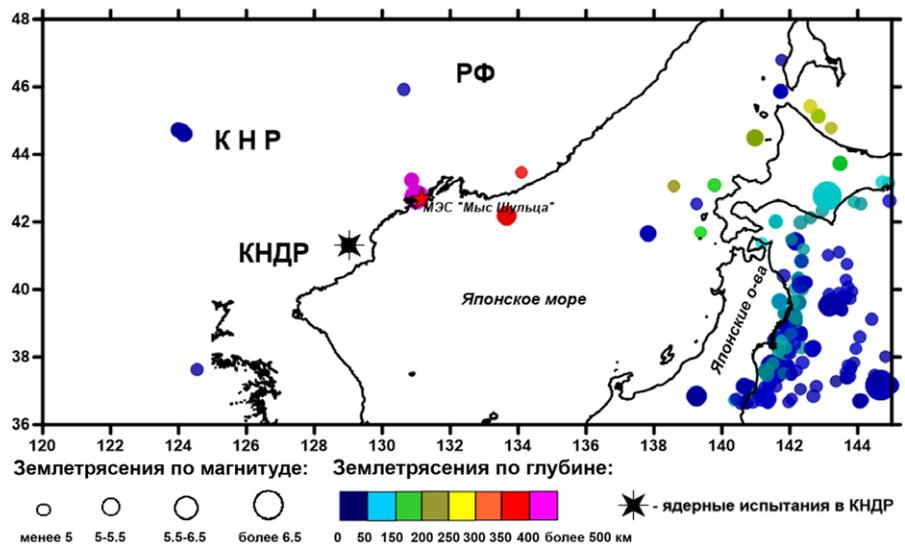


Рис. 1. Карта сейсмичности региона в 2013 г.

(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>) с указанием места расположения СГП.

Fig. 1. Seismicity map of the region in the period from 01.01.2013 to 31.12.2013 (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>) with SGP location.

Сразу необходимо отметить, что интерполированные участки, связанные с техническим простом гравиметра, дают значительные сдвиги по амплитудным показателям, и важной задачей при использовании подобной методики является минимизация перерывов в записи.

При счете с размером окна 38 сут зафиксированы аномальные скачки амплитудных показателей у волны O1 в период двух серий близких землетрясений, одна из которых произошла на границе России и КНДР вблизи пункта измерения 5–6 апреля 2013 г. на глубине около 600 км с магнитудами от 5.8 до 6.3. Другая серия из четырех коровых землетрясений произошла на территории Китая 31 октября и 22 ноября 2013 г. с глубиной гипоцентра от 2 до 10 км и магнитудами от 4.7 до 5.4. В обоих случаях перед землетрясениями примерно за 20 сут зафиксировано снижение амплитудных показателей для волны O1, для китайских землетрясений более значительное. При этом в период землетрясений на границе России и КНДР нет интерполированных участков, на которые можно было бы списать выявленные аномалии, как в случае с китайскими землетрясениями, когда такой участок мог внести погрешность в расчеты. Но и в этом случае, с учетом небольшого размера окна в 38 сут, интерполированный участок незначительно перекрыл анализируемый период, поэтому можно считать, что аномалии связаны именно с сейсмическими событиями.

Для сравнения на рис. 2 и 3 добавлено сильнейшее землетрясение, произошедшее в Охотском море на глубине 609 км с магнитудой 8.3.

Как видно, никаких значимых эффектов в период его подготовки не наблюдается.

Поскольку наблюдаемые данные были избавлены от океанической нагрузки, то предполагается, что данный эффект у главной лунной

волны O1 связан с локальной перестройкой плотностной среды в твердой Земле. Поэтому, чтобы судить об аномальности выявленного эффекта, было решено обработать по такой же методике модельные значения для твердой

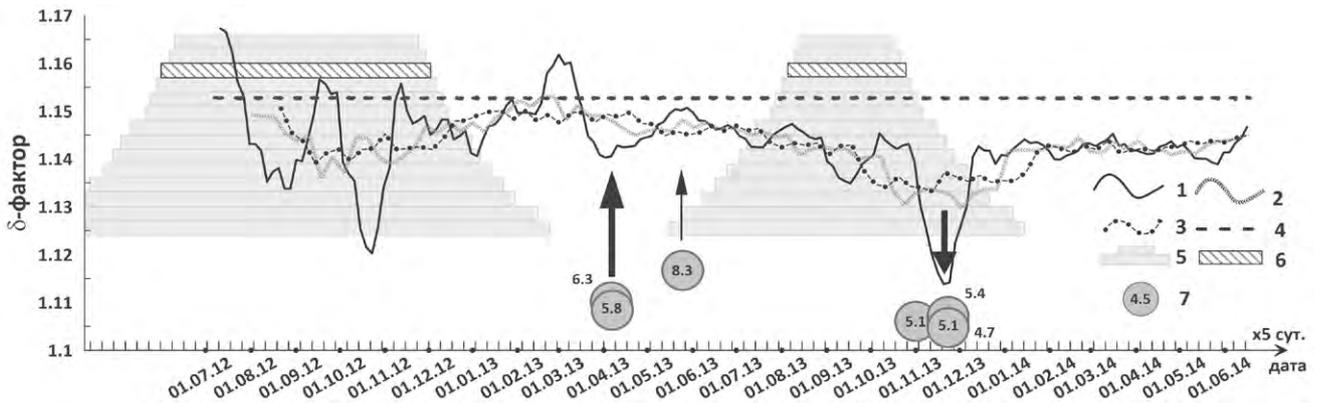


Рис. 2. Расчет амплитудного параметра (δ -фактора) в скользящем окне для главной лунной приливной волны O1 (период с 2012 по 2014 г.): 1–3 – наблюдаемый δ -фактор для ширины окна 38 сут (1), 80 (2) и 120 сут (3); 4 – δ -фактор для твердой Земли по модели PREM [Dziewonski, Anderson, 1981]; 5–6 – области возможного влияния интерполированных участков записи, связанных с техническим простоем гравиметра, для ширины расчетного окна от 30 до 120 сут (5) и 38 сут (6); 7 – близкие к месту расположения СГП землетрясения с указанием магнитуды. Жирной черной стрелкой отмечены моменты ближайших землетрясений, тонкой черной стрелкой – момент удаленного землетрясения.

Fig. 2. Computation of the amplitude parameter (δ -factor) in a sliding window for the principal lunar tidal wave O1 (period from 2012 to 2014): 1–3 – observed δ -factor for the window width of 38 days (1), 80 days (2) and 120 days (3); 4 – δ -factor for the solid Earth according to the PREM model [Dziewonski, Anderson, 1981]; 5–6 – areas of possible influence of interpolated recording areas associated with technical downtime of the gravimeter, for the calculated window width from 30 to 120 days (5) and 38 days (6); 7 – the earthquakes close to SGP location with magnitudes. The thick black arrow marks the moments of the nearest earthquakes, the thin black arrow marks the moment of the distant earthquake.

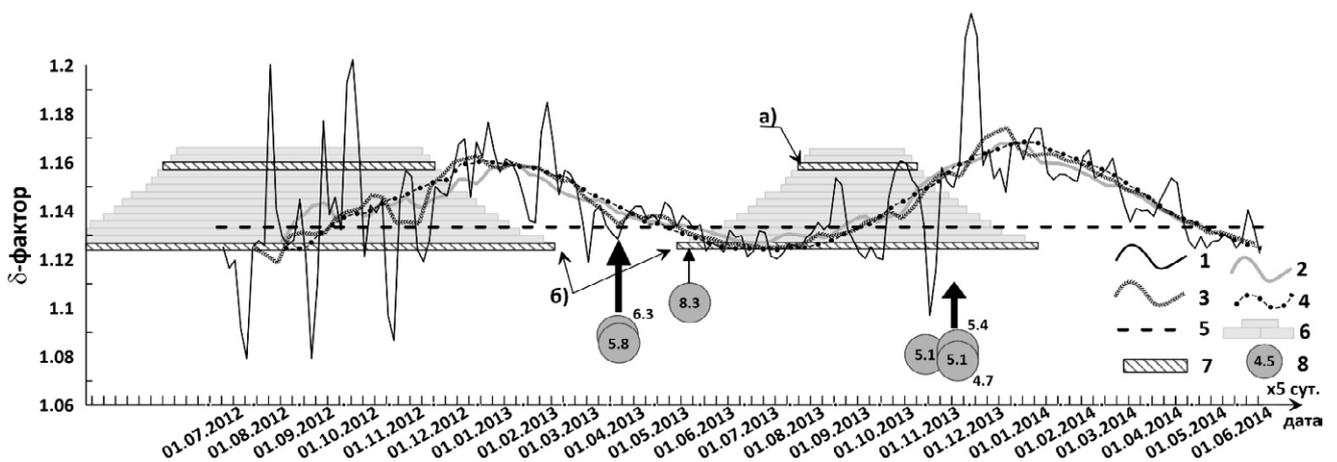


Рис. 3. Расчет амплитудного параметра (δ -фактора) в скользящем окне для главной солнечной приливной волны K1 (период с 2012 по 2014 г.): 1–2 – δ -фактор для ширины окна 38 сут наблюдаемый (1) и сглаженный по 21 точке (2); 3–4 – наблюдаемый δ -фактор для ширины окна 80 сут (3) и 120 сут (4); 5 – δ -фактор для твердой Земли по модели PREM [Dziewonski, Anderson, 1981]; 6–7 – области возможного влияния интерполированных участков записи, связанных с техническим простоем гравиметра, для ширины расчетного окна от 30 до 120 сут (6) и для ширины окон 38 сут (7, а), 120 сут (7, б); 8 – близкие к СГП землетрясения с указанием магнитуды. Жирной черной стрелкой отмечены моменты ближайших землетрясений, тонкой черной стрелкой – момент удаленного землетрясения..

Fig. 3. Computation of the amplitude parameter (δ -factor) in a sliding window for the principal solar tidal wave K1 (period from 2012 to 2014): 1–2 – δ -factor for the window width of 38 days observed (1) and smoothed over 21 points (2); 3–4 – observed δ -factor for the window width of 80 days (3) and 120 days (4); 5 – δ -factor for solid Earth according to the PREM model [Dziewonski, Anderson, 1981]; 6–7 – areas of possible influence of interpolated recording areas associated with technical downtime of the gravimeter, for the calculated window width from 30 to 120 days (6) and for the window widths of 38 days (7, a), 120 days (7, b); 8 – the earthquakes close to SGP location with magnitudes. The thick black arrow marks the moments of the nearest earthquakes, the thin black arrow marks the moment of the distant earthquake.

Земли по модели PREM [Dziewonski, Anderson, 1981] (рис. 2). Как видим на рис. 2, амплитудный показатель модельной волны O1 остается постоянным на всем периоде наблюдений, тогда как у наблюдаемой волны слабо изменяется в периоды затишья и испытывает резкие скачки перед близкими землетрясениями.

Кроме выявленного гравитационного эффекта для волны O1, применяемая методика позволила зафиксировать гравитационный эффект у главной солнечной волны K1, по всей видимости связанный с цикличностью солнечной активности (рис. 3).

Как видно из рис. 3, при расчете амплитудного показателя волны K1 с шириной окна 38 сут наблюдается скрытая цикличность, осложненная высокочастотными выбросами. Но сглаживание в скользящем окне шириной 21 точка позволило избавиться от осложняющих факторов. Похожая цикличность прослеживается и для расчетов в окне 80 сут, здесь ее можно наблюдать без дополнительной фильтрации. При увеличении ширины окна до 120 сут цикличность проявляется наиболее четко, причем максимумы и минимумы амплитудных показателей приурочены к холодным и теплым сезонам соответственно. В модели твердой Земли PREM такой цикличности не наблюдается, следовательно, это локальный эффект, который не учтен при составлении данной модели. Предположительно, этот эффект связан с сезонными изменениями, происходящими в окрестностях пункта наблюдения (температурными эффектами, воздействую-

щими на кристаллический массив, на котором расположен пункт наблюдений, остаточными гидродинамическими и атмосферными эффектами или их совместным воздействием).

Выводы

Применение методики расчета приливных параметров в скользящем окне позволило выявить снижение амплитудного показателя (δ -фактора) в приливных вариациях силы тяжести для волны O1, при этом данный эффект наблюдался за несколько дней до землетрясений, локализованных вблизи пункта наблюдения и различающихся по глубинности и магнитуде. При этом оптимальная ширина расчетного окна для рассматриваемого СГП составила 38 сут. Для суточной волны K1 выявлена сезонная цикличность, связанная, на наш взгляд, с температурным эффектом, воздействующим на массивы горных пород, на которых установлен пункт наблюдения.

Негативным фактором в реализации данной методики являются разрывы в записи, поэтому необходимо минимизировать технические простои гравиметра, что позволит более качественно отслеживать эффекты, связанные с геодинамическими процессами, протекающими на границах литосферных плит в геодинамически активном регионе. Проведенное исследование является ретроспективным и по большей части имеет цель апробации новой методики обработки временных рядов, но, возможно, оно окажется полезным в составлении краткосрочных прогнозов опасных сейсмических событий.

Список литературы

1. Горелов П.В., Шкабарня Н.Г. **2014**. Современная сейсмическая активность Приморского края. *Вестник инженерной школы ДВФУ*, 4(21): 97–102.
2. Добровольский И.П. **2005**. Гравитационные предвестники тектонического землетрясения. *Физика Земли*, 4: 23–28.
3. Довбня Б.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А. **2019**. Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений. *Геодинамика и тектонофизика*, 10 (3): 731–740. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0438>
4. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов Б.М., Широков О.П., Чупин В.А., Яковенко С.В. **2007**. Деформационные и акустические предвестники землетрясений. *Доклады Академии наук*, 413(1): 96–100.
5. Мельхиор П. *Земные приливы*. **1968**. М.: Мир, 483 с.
6. Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Колпащикова Т.Н., Наумов С.Б. **2021**. Оценка влияния гидродинамики на приливные вариации силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю. *Физика Земли*, 1: 109–121.
7. Прошкина З.Н., Валитов М.Г., Кулинич Р.Г., Колпащикова Т.Н. **2015**. Изучение приливных вариаций силы тяжести в зоне перехода от континента к Японскому морю. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 3(27): 71–79.
8. Сдельникова И.А., Стеблов Г.М. **2016**. Мониторинг цунамигенных землетрясений методами спутниковой геодезии. *Геофизические исследования*, 17(1): 46–55.
9. Семенов Р.М. **2010**. Землетрясение 27.08.2008 года на юге Байкала и его предвестники. *Геодинамика и тектонофизика*, 1(4): 441–447.
10. Соболев Г.А. **1993**. *Основы прогноза землетрясений*. М.: Наука, 313 с.

11. Уткин В.И., Юрков А.К. **2010**. Радон как индикатор геодинамических процессов. *Геология и геофизика*, 51(2): 277–286.
12. Федотов С.А., Магуськин М.А., Левин В.Е. и др. **1988**. Деформации земной поверхности на восточном побережье Камчатки и их связь с сейсмичностью. *Вулканология и сейсмология*, 1: 24–40.
13. Dziewonski A.M., Anderson D.L. **1981**. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25: 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
14. Wenzel H.G. **1996**. The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30. *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 124: 9425–9439.

References

1. Gorelov P.V., Shkabarnya N.G. **2014**. The present day seismic activity in Primorsky Krai. *FEFU: School of Engineering Bull.*, 4(21): 97–102.
2. Dobrovolsky I.P. **2005**. Gravitational precursors of a tectonic earthquake. **2005**. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 41 (4): 273–278.
3. Dovbnya B.V., Pashinin A.Yu., Rakhmatulin R.A. **2019**. Short-term electromagnetic precursors of earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics*, 10(3): 731–740. (In Russ). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0438>
4. Dolgikh G.I., Kuptsov A.V., Larionov I.A., Marapulets Y.V., Shvets V.A., Shevtsov B.M., Shirokov O.P., Chupin V.A., Yakovenko S.V. **2007**. Deformation and acoustic precursors of earthquakes. *Doklady Earth Sciences*, 413(1): 281–285. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07020341>
5. Mel'khior P. **1968**. *Zemnye prilivy [Earth tides]*. M.: Mir, 482 p. (In Russ.).
6. Proshkina Z.N., Valitov M.G., Kolpashchikova T.N., Naumov S.B. **2021**. Estimation of Hydrodynamic effect on tidal variations in gravity in the transition zone from the continent to the Sea of Japan. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 57(1): 98–109. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1069351321010067> (accessed 15.06.2021).
7. Proshkina Z.N., Valitov M.G., Kulinich R.G., Kolpashchikova T.N. **2016**. Investigation of tidal gravity in the transition zone from continent to the Sea of Japan. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 3(27): 71–79. (In Russ.).
8. Sdelnikova I.A., Steblov G.M. **2016**. Monitoring of the tsunamigenic earthquakes by means of satellite geodesy. *Geophysical Research*, 17(1): 46–55. (In Russ.).
9. Semenov R.M. **2010**. Earthquake of 27 August 2008 in the Southern Baikal area and its precursors. *Geodynamics & Tectonophysics*, 1(4): 441–447 (In Russ.).
10. Sobolev G.A. **1993**. [*The basis for earthquake prediction*]. Moscow: Nauka, 314 p. (In Russ.).
11. Utkin V.I., Yurkov A.K. **2010**. Radon as a tracer of tectonic movements. *Russian Geology and Geophysics*, 51(2): 220–227. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.022>
12. Fedotov S.A., Magus'kin M.A., Levin V.E. et al. **1988**. [Earth surface deformations at the eastern coast of Kamchatka and their relation to the seismicity]. *Volcanology & Seismology*, 1: 24–40. (In Russ.).
13. Dziewonski, A.M., Anderson, D.L. **1981**. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25: 297–356. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7)
14. Wenzel H.G. **1996**. The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30. *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 124: 9425–9439.

Об авторах

ВАЛИТОВ Максим Георгиевич (<https://orcid.org/0000-0001-5442-5969>), кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, valitov@poi.dvo.ru

ПРОШКИНА Зоя Николаевна (<https://orcid.org/0000-0002-2460-9916>), кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, pro-zo@yandex.ru

About the Authors

VALITOV Maksim Georgievich (<https://orcid.org/0000-0001-5442-5969>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the laboratory, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, valitov@poi.dvo.ru

PROSHKINA Zoya Nikolaevna (<https://orcid.org/0000-0002-2460-9916>), Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, pro-zo@yandex.ru