

## **ВАРИАЦИИ ПРИЛИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ\***

### ***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, заведующий лабораторией, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### ***Екатерина Ивановна Грибанова***

Сибирский филиал Геофизической службы СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13-3, научный сотрудник

### ***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, 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, младший научный сотрудник, timofeevav@ipgg.sbras.ru

Изучение современных смещений и деформаций земной коры необходимы для решения различных задач геофизики в широком пространственном и временном спектре. Измерения деформаций проводятся различными методами в штольнях и скважинах. В работе представлены результаты измерений на комплексной станции Талая (Байкальский регион). Вариации приливных параметров позволяют оценивать параметры зоны трещиноватости и провести сравнение с уровнем сейсмической активности региона.

**Ключевые слова:** модель приливной деформации Земли, лазерный деформограф, измерения в штольне и в скважине, землетрясения в Байкальском регионе.

## **VARIATION OF TIDAL PARAMETERS AND EARTHQUAKES**

### ***Vladimir Yu. Timofeev***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Doctor of Science, Chief of the Laboratory, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

### ***Ekaterina I. Gribanova***

Siberian Branch of Geophysical Survey SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 13-3 Lavrentieva Prospect, Scientific Worker

### ***Dmitrii G. Ardyukov***

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Scientific Worker, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

---

\* Работа была выполнена в рамках Интеграционного проекта СО РАН № 76, проекта Президиума РАН № 4.1 и Программы РАН ОНЗ 6-2.

**Anton V. Timofeev**

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Scientific Worker, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Current study of crust displacement and strain are impotent for geophysics tasks in time and in space. Different methods were used for deformation's measurements into underground gallery and into key-hole. Experimental measurement results at Talaya station (Baikal region) were presented. Variation of tidal parameters allowed us estimate of cracking zone and of regional seismic activity.

**Key words:** Tidal model of the Earth; laser extensometer; measurements into underground gallery and into key-hole; earthquakes at Baikal region.

Приливные деформации Земли охватывают всю планету от её центра до поверхности, имеют амплитуду порядка единиц  $10^{-8}$ , а приливная сила точно рассчитывается [1, 2]. Экспериментальный выбор приливных моделей Земли проведен с использованием данных, полученных с помощью цифровых приливных гравиметров [3, 4]. Результаты измерений приливных деформаций более подвержены локальным поверхностным воздействиям. Задачи нашего исследования включали: приливный анализ данных лазерного деформографа, полученных в 90-метровой штольне; выделение многолетнего тренда и аномальных особенностей, связанных с землетрясениями; сравнение результатов приливного анализа, полученных в штольне и в скважине; выбор моделей приливных эффектов, оценка модели для зоны трещиноватости.

Рассмотрим результаты, полученные на пункте комплексных наблюдений Талая (Байкальская рифтовая система) (рис. 1).

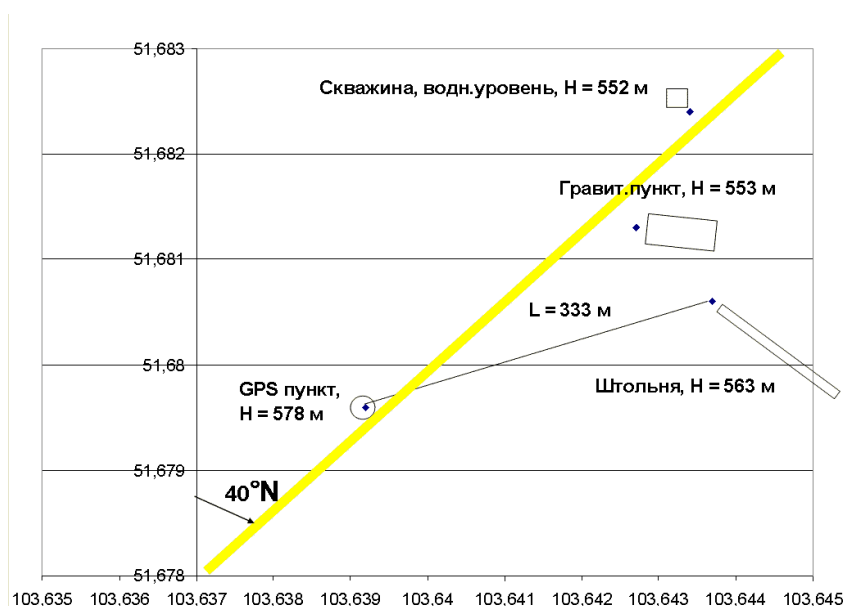


Рис. 1. Комплексная станция Талая, координаты (широта и долгота в градусах). Показано положение пунктов измерений: скважина, штольня, гравиметрический пункт и пункт космической геодезии. Сплошной линией показана приблизительная ориентация горной долины

Он находится на северной границе юго-западной части БРС и Сибирской платформы. Границей является глубинный разлом, пересекающий литосферу (мощность земной коры 45 км). По результатам геологических и сейсмологических исследований регион отличается сдвиговым левосторонним движением по Главному Саянскому разлому, расположенному в 3–5 км к северу от станции. Ориентация долины, на бортах которой расположены пункты измерений с. Талая, показана на рис. 1.

Высокоточные измерения различных видов деформаций и наклонов в БРС начаты на сейсмостанции Талая (51.68°N, 103.65°E) весной 1985 года. Положение станции определяет сложный характер локального деформирования. Для исключения поверхностных эффектов измерения проводятся в штольнях на глубине более 50 м. Штольня станции Талая имеет длину 90 м и шесть поперечных штреков длиной до 25 м. Здесь проводятся измерения в двух азимутах с помощью лазерного деформографа. Наличие современных приливных моделей позволяет проводить исследования приливных деформаций, используя датчики, установленные в скважинах или штольнях. Экспериментально установлено, что отражение эффектов полости и локальных особенностей земной коры (линейных зон трещиноватости, зон глубинных разломов) в приливных деформациях для станций Талая достигают 10 % в амплитуде и 9° в фазовом сдвиге. Измерять вариации во времени позволяет лазерный приливный деформограф (база 25 м), метрологические характеристики которого стабильны во времени, т.к. они привязаны к фазе и длине волны лазера. Ещё одним методом приливных исследований являются измерения в скважинах. Они проясняют природу вариаций. Рассмотрим отражение локальных эффектов в приливных вариациях водного уровня в скважине на станции Талая. Цифровая запись уровня воды проводится на скважине с 2007 года практически круглый год за исключением нескольких зимних месяцев (перемерзание воды в скважине). Здесь используется ультразвуковой датчик чувствительностью до 0.1 мм. Приливные вариации для скважины №1608 на сейсмостанции Талая, пробуренной в монолитных мраморах, достигают 2 мм. Наличие приливных вариаций малой амплитуды свидетельствует о том, что в данном случае можно использовать модель «ограниченная полость» [1]. Изменение уровня для этой модели записывается как:

$$dH = dV / [\pi \cdot r_w^2 + (\rho \cdot g \cdot V / K_w)], \quad (1)$$

если в знаменателе выражение, включающее радиус, много меньше выражения, включающего объём (в нашем случае это объём трещин в породе), получаем:

$$dH = \Delta \cdot K_w / \rho \cdot g, \quad (2)$$

где  $\Delta = dV/V$  – дилатация,  $r_w$  – радиус скважины,  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $V$  – объём трещин,  $dV$  – его изменение,  $K_w$  – модуль объёмного сжатия воды. Из приливного анализа уровня, проведенного в сравнении с объёмной деформацией, получено значительное положительное значение сдвига фазы. Чтобы исключить этот парадокс, далее был проведен анализ и вы-

брана компонента деформации с минимизацией фазового запаздывания – горизонтальная деформация в азимуте 130°N (рис. 2).

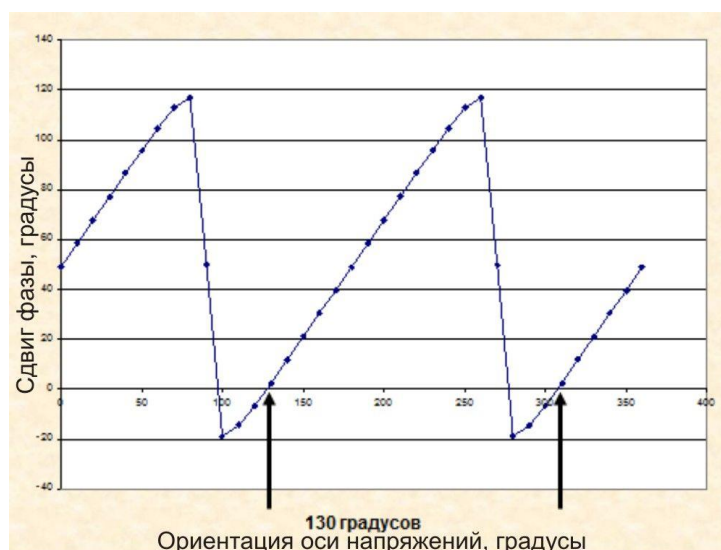


Рис. 2. Определение ориентации линейной деформации по минимуму фазового сдвига (приливный анализ для полусуточной волны M2 уровня воды в скважине станции Талая)

Подобное направление деформации можно объяснить наличием системы трещин вдоль горной долины по ручью Талая, ориентированной в азимуте 40°N, т.е. ортогонально приложенной силе (рис. 1). Физическая модель системы линейных трещин – сильфон показана на рис. 3. Определим параметры системы трещин. Для приливной волны M2 из приливного анализа имеем отношение  $dH/d\varepsilon = 0.10$  мм/нанострейн (при теоретической амплитуде деформации 6.6505 нанострейн ( $10^{-9}$ ), экспериментальной амплитуде уровня 0.675 мм). Сравним выражения в правой и левой частях для соотношения  $dH = \Delta \cdot K_w / \rho \cdot g$ . Для  $dHm$  (теоретическая)  $= \Delta \cdot K_w / \rho \cdot g = 1.56$  мм. Таким образом, экспериментальное значение в два раза ниже теоретических расчётов. Полагая, что в формуле (1) соотношения в знаменателе приблизительно равны, можно оценить объём. Для скважины на Талой при  $r_w = 0.07$  метра в соответствии с выражением  $\pi \cdot r_w^2 = 0.015 \text{ м}^2 = (\rho \cdot g \cdot V / K_w)$  получаем для объёма  $V = 3 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ . Пусть объём охватывает систему близповерхностных трещин. Предположим, система включает десяток трещин, шириной 0.01 м и глубиной 100 м, в этом случае их протяженность составит 300 м вдоль долины.

Сравнение результатов приливных анализов штольневых и скважинных измерений показывает сходный характер долговременных вариаций (2005–2009 гг.) в эпоху Култукского землетрясения 27.08.2008 года. Из приливного анализа данных лазерного деформографа получен график изменения во времени амплитудного фактора и фазового запаздывания для приливной полусуточной волны M2 (рис. 4).

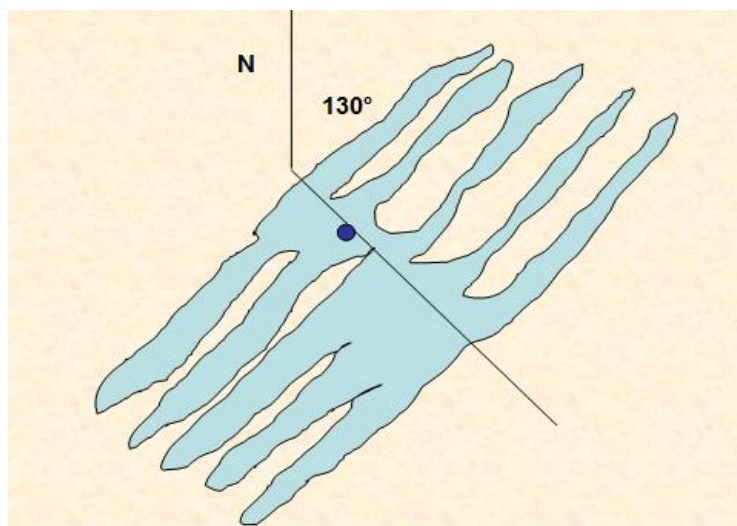


Рис. 3. Физическая модель. Система ориентированных трещин, работающая как сиффон. Ориентация системы трещин  $40^{\circ}\text{N}$ , ориентация оси сиффона (направление приливной силы)  $130^{\circ}\text{N}$ . Точка – возможное положение скважины. Система с одной степенью свободы – сиффон, работает, как пружина, ориентированная вдоль оси сиффона

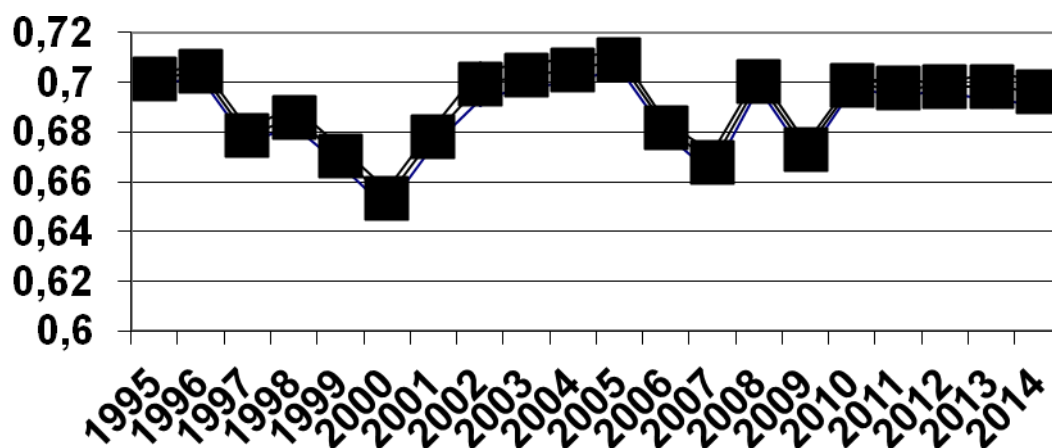


Рис. 4. Вариации значения амплитудного фактора (отношение экспериментального результата к теоретическому значению). Период наблюдений – с 1995 по 2014 гг. Лазерный деформограф, два ортогональных 25-метровых плеча, штольня сейсмостанции Талая

Из анализа следует наличие отклонений от среднего в периоды сильных землетрясений (1999 и 2008 гг.). График вариаций фазового сдвига выявил его переход на новый уровень (изменение на 2 градуса), что свидетельствует об изменении трещиноватости в зоне разлома в результате близкого (25 км) Култукского землетрясения ( $M = 6.3$ ) при растяжении в эпицентральной области. Для станции Талая скачок в момент Култукского землетрясения (27.08.2008,

$M = 6.3$ , в 25 км) позволил оценить изменение деформации – косейсмическое растяжение величиной  $1 \cdot 10^{-6}$ . Определения 3D-смещений проводилось по данным GPS-измерений. Получены косейсмические смещения величиной  $-2 \pm 2$  мм (N),  $+10 \pm 2$  мм (E),  $-15 \pm 5$  мм (V). Используя экспериментальные косейсмические параметры, решая обратную задачу итерационным методом, были выбраны параметры землетрясения, которые оказались сходными с сейсмологическими определениями

В результате многолетних исследований (1995–2014 гг.) сделаны следующие выводы. Вариации амплитуд и фаз приливной деформации по результатам многолетних измерений в Байкальской рифтовой зоне могут достигать  $3\% \div 4\%$  в амплитуде и до  $3^\circ$  в сдвиге фаз, что может быть вызвано изменением структуры и гидродинамических условий в зоне трещиноватости вдоль долины Талая и в зоне Главного Саянского разлома. Положение осей деформации изменилось после регионального землетрясения (27.08.2008,  $M = 6.3$ , 25 км).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Melchior P. Tidal interactions in the Earth Moon system // Chronique U.G.G.I., N210, Mars/Avril, MHN, Luxembourg, - 1992. - P. 76–114.
2. Dehant V, Defraigne P, Wahr J. Tides for a convective Earth. // J. Geoph. Res. - 1999 - 104. - B1. - P. 1035–1058.
3. Timofeev V., M. van Ruymbeke, Woppelmanns G., 2006, Tidal gravity observations in Eastern Siberia and along the Atlantic coast of France. // Journal of Geodynamics. - 2006. - V. 41. - P. 30–38.
4. Ducarme B., Timofeev V.Yu., Everaerts M. A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections. // Journal of Geodynamics. - 2008. - doi: 10.1016/j.jog.2007.07.001

© В. Ю. Тимофеев, Е. И. Грибанова, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, 2015