

*В. Ю. Тимофеев<sup>1\*</sup>, Д. Г. Ардюков<sup>1</sup>, А. В. Тимофеев<sup>1</sup>*

## **Комплекс геофизических измерений на сейсмостанции Талая (Байкальский регион)**

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,  
Российская Федерация

\* e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** Комплексные измерения геофизических полей выполняются в сейсмоактивных регионах мира для выяснения природы сейсмичности, поиска предвестников землетрясений и определения размеров территории, охваченной значимыми косейсмическими проявлениями. Такие исследования ведутся на сейсмостанции Талая (Слюдянский район, Иркутская область) с 1985 года. За эти годы, помимо сейсмологических измерений, здесь проводились многолетние наблюдения хода наклонов и деформаций земной поверхности в 90-метровой штольне, вариаций силы тяжести в специальном подвале, уровня воды в 120-метровой скважине, а в последние десятилетия методами космической геодезии измерялись 3D смещения. В результатах измерений деформаций выделяются приливные вариации амплитудой  $3 \cdot 10^{-8}$ , сезонные и многолетние периодические, амплитудой до  $10^{-6}$ . Полученный экспериментальный материал позволил рассмотреть связи между разными геофизическими эффектами, определить особенности поведения различных полей в эпоху усиления региональной сейсмичности. Анализ вариаций поля силы тяжести, наклонов-деформаций и уровня воды в скважине приводит к выводу о локальном характере регистрируемых в штольне деформаций, вызванных термическими эффектами на резко пересеченном рельефе. Такие деформации охватывают территорию до 3 км, включая Главный Саянский разлом, расположенный на границе Сибирской платформы и Байкальской рифтовой системы. Проанализированы 3D смещения в разные временные эпохи. Перед землетрясениями отмечены изменения в скорости хода деформации и смещений. Косейсмические эффекты в геофизических полях хорошо проявляются на расстояниях до 30 км от очага землетрясения магнитудой 6.5.

**Ключевые слова:** деформации, смещения, сейсмичность, сила тяжести, Байкал, с. Талая

*V. Yu. Timofeev<sup>1,\*</sup>, D. G. Ardyukov<sup>1</sup>, A. V. Timofeev<sup>1</sup>*

## **Complex of geophysical measurements at the Talaya seismic station (Baikal region)**

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS

\*e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

**Annotation.** Complex measurements of geophysical fields are carried out in seismically active regions of the world to clarify the nature of seismicity, search for earthquake precursors and determine the size of the territory covered by significant coseismic manifestations. Such studies have been carried out at the Talaya seismic station (Slyudyansky district, Irkutsk region) since 1985. Over the years, in addition to seismological measurements, long-term observations of the course of slopes and deformations of the earth's surface in a 90-meter adit, variations in gravity in a special basement, water levels in a 120-meter well were carried out here, and in recent decades, 3D displacements were measured using space geodesy methods. The results of deformation measurements highlight tidal variations with an amplitude of  $3 \cdot 10^{-8}$ , seasonal and long-term periodic variations with an amplitude of up to

10<sup>-6</sup>. The obtained experimental material made it possible to examine the connections between different geophysical effects and to determine the characteristics of the various fields behavior in the era of increased regional seismicity. Analysis of variations in the gravity field, inclination-deformations and water level in the well leads to the conclusion about the local nature of the deformations recorded in the adit, caused by thermal influences on the sharply rugged terrain. Such deformations cover an area of up to 3 km, including the Main Sayan fault, located on the border of the Siberian platform and the Baikal rift system. 3D displacements at different time epochs were also analyzed. Before earthquakes, changes in the rate of deformation and displacement were noted. Coseismic effects in geophysical fields are clearly manifested at distances of up to 30 km from the source of an earthquake of magnitude 6.5.

**Keywords:** deformations, displacements, seismicity, gravity, Baikal, st.Talay

### *Введение*

Согласно известным представлениям, накопление напряжений (деформаций) на неоднородностях приводят к разрушению материалов. Исходя из этого, наблюдения за накоплением деформаций в земной коре сейсмоактивных областей может привести нас к пониманию эффекта землетрясения с образованием сейсмических разрывов на поверхности и внутри земной коры. Измерения деформаций и наклонов в специальных обсерваториях широко распространены по миру [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Обычно, для исключения температурных деформаций высокоточные измерения проводятся в глубоких штольнях и туннелях [8, 9,10]. На станции Талая наблюдения за ходом деформации сопровождались измерениями вариаций гравитационного поля и уровня грунтовых вод. Для таких наблюдений применяется специальный инструмент: относительные и абсолютные гравиметры, деформографы и наклонометры, способные регистрировать временные вариации деформации с амплитудой 10<sup>-9</sup> и точнее.

Задача нашей работы - определить возможности комплекса методов измерения полей смещений, деформаций, силы тяжести при исследовании сейсмической активности в юго-западной части Байкальской рифтовой системы.

### *Методы и материалы*

Байкальский регион выделяется особенностью строения, современными движениями и сейсмической активностью. Здесь регистрируется до нескольких тысяч землетрясений в год (рис. 1). Комплекс из штанговых и лазерных деформографов, кварцевых наклонометров, абсолютного и относительного гравиметров, датчика уровня воды в скважине и приемников космической геодезии применялся на сейсмостанции Талая, расположенной в юго-западной части Байкальской рифтовой системы [11, 12, 13, 14]. Аппаратура отечественной разработки устанавливалась в штольне в конце прошлого столетия. Наклоны в 90 метровой штольне регистрировались на аналоговый носитель начиная с весны 1985 года, с 1999 года применялась цифровая запись сигналов.

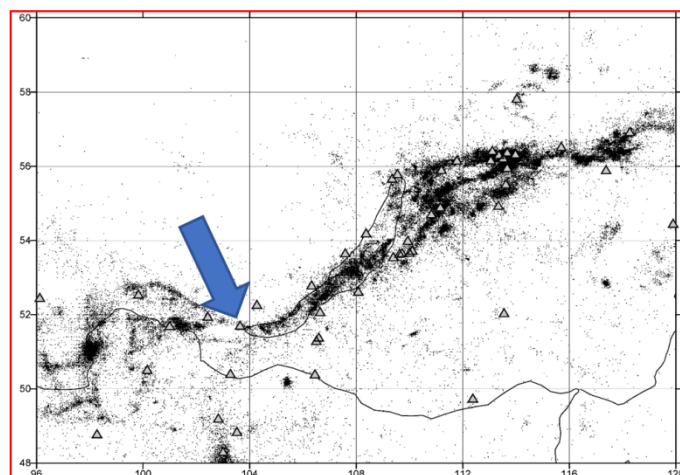


Рис. 1. Положение сейсмостанций Байкальской сейсмологической сети и эпицентры землетрясений (110 тысяч событий, зарегистрированных за период инструментальных наблюдений). Координаты в градусах широты и долготы, треугольниками показаны сейсмостанции региональной сети, положение сейсмостанции Талая отмечено стрелкой. Показан контур озера Байкал

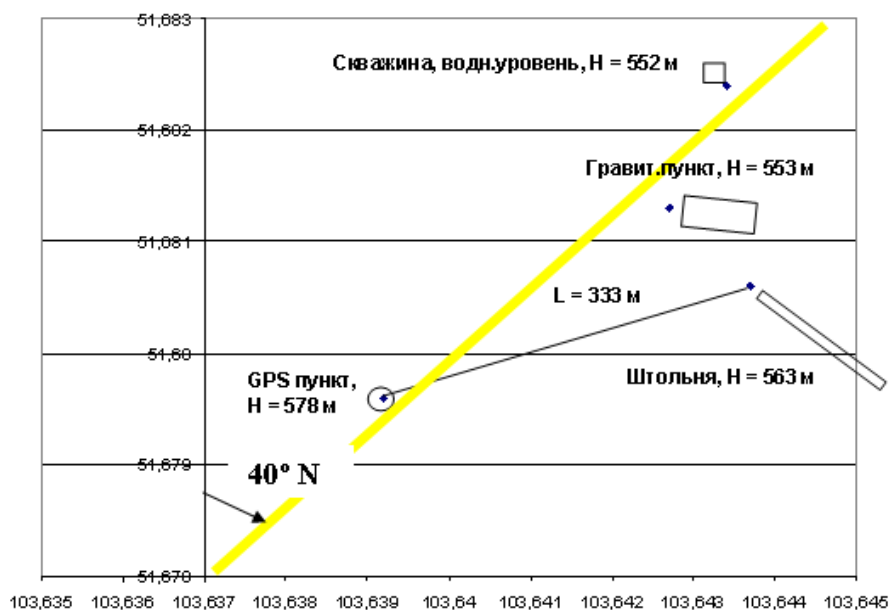


Рис. 2. Положение пунктов различных видов измерений на сейсмостанции Талая. Приведены высоты для отдельных пунктов в метрах (система WGS-84). Наклонометры и деформографы установлены в штольне, гравиметрический пункт – подвал здания сейсмостанции, домик со скважиной для регистрации уровня воды, GPS пункт – специальный столб. Желтой линией показана ориентация горной долины шириной около 100 метров. Широта и долгота в градусах

Измерение деформаций начиналось штанговыми кварцевыми системами в 4-х азимутах в 1989 году, далее были задействованы лазерные деформографы в двух ортогональных направлениях на базах в 25 метров. Абсолютные гравиметрические измерения выполнялись гравиметром ГАБЛ с осени 1992 года, ошибка при повторных наблюдениях составляла от 0.5 микрогал до 2 микрогал. Измерение приливных вариаций силы тяжести выполнены с помощью относительного цифрового гравиметра LCR-402, в рамках работ по трансконтинентальному земноприливному профилю. Регистрация уровня воды проводилась ежедневно начиная с 1993 года, с 2005 года использовался ультразвуковой датчик и цифровая запись. Наблюдения 3D смещений выполняются методом космической геодезии с весны 2000 года. Для исключения сезонных вариаций ежегодные измерения смещений проводятся весной и осенью. Расположение пунктов различных видов измерений на территории сейсмостанции Талая показано на Рис. 2. При постановке работ планировалось оценить связи, которые существуют между различными геофизическими полями. Так, вариации силы тяжести могут быть вызваны вариациями плотности в земной коре, которые, в свою очередь, могут быть связаны с растяжением или сжатием среды. С другой стороны, даже без значимых изменений плотности, вариации силы тяжести отражают опускание или подъём земной поверхности. По геологическим данным Байкальская рифтовая зона выделяется растяжением и опусканием земной поверхности.

Данные измерений деформаций ( $\epsilon$ ) по двум ортогональным направлениям в рамках теории упругости позволяют оценить величину поверхностной, объёмной и вертикальной деформации. Например, для изотропной среды имеем [15]:

$$\epsilon_{\text{volumetric}} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})(1-2\nu)/E = (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})(1-2\nu)/(1-\nu), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – напряжение по осям,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $E$  – модуль Юнга.

Используя величину вариаций наклона, можно оценить сдвиговое напряжение в земной коре, накопленное за период измерений. Для этого существует соотношение для сдвигового напряжения, модуля сдвига ( $\mu$ ) и наклона ( $e$ ):

$$\sigma_{zx} = \mu_s \cdot e. \quad (2)$$

На основе многолетних наблюдений затухания деформаций, используя для интерпретации вязко-упругую модель Кельвина-Фойхта, можно определить значение вязкости  $\eta_s$ , например, в зоне разлома [16]:

$$\Psi(t) = [a \cdot e^{(-t/T)} - b], \quad (3)$$

где  $t$  – время,  $\Psi(t)$  – деформация (наклон),  $T = \eta/\mu$  постоянная времени или время запаздывания для жестко-вязкого движения по модели Кельвина,  $\mu$  – модуль сдвига и  $\eta$  – вязкость,  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты.

В первом приближении, связь изменений силы тяжести ( $g$ ) и плотности, связанной с деформацией среды, может быть представлена соотношением для бесконечного плоского слоя [17]:

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

где  $k = 6.674 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$  – гравитационная постоянная,  $d$  – толщина слоя,  $\rho = 2.7 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$  – средняя плотность земной коры,  $\Delta \rho$  изменение плотности, связанное с изменением объёмной деформации  $\Delta \varepsilon$ .

### ***Результаты***

Наиболее продолжительные ряды данных на станции получены для наклонов земной поверхности в азимутах С-Ю и В-З, а их ход представлен векторной диаграммой. В результатах хорошо выделяются приливные вариации наклонов, которые были проанализированы по специальным программам. В ходе наклонов отражается периодический характер многолетних наклонов, выделяются периоды в 1 года, 3 год, 7 лет, 11 и 18 лет. Амплитуда наклонов составляла от 0.1 секунды дуги до 3 секунд дуги в год. Векторная диаграмма хода наклонов замкнулась через 18 лет, в эпохи близких землетрясений (в радиусе 50 км, магнитудой от 3 до 5) отмечены повороты вектора наклона и торможение скорости. В момент близкого землетрясения зарегистрирован косейсмический скачок до 2 секунд дуги. График хода наклона, ориентированного по оси штольни, показал экспоненциальное затухание деформации начиная с 1989 года [18].

В записи деформаций по отдельным направлениям выделены приливные деформации. По данным штанговых и лазерных систем измерений линейных деформаций определены изменение объёмной деформации за период с 1989 года по 2015 год. Также отмечен характер вариаций с периодами 1 год, 3 года, 5 и 11 лет с амплитудами от  $0.3 \cdot 10^{-6}$  до  $3 \cdot 10^{-6}$ . Выделяется момент Култукского землетрясения 27.08.2008 ( $M = 6.5$ ), случившегося в 25 км от станции [19]. В изменениях уровня воды в 120 метровой скважине отражены сезонные вариации, связанные с летним периодом дождей (июль-август), величиной до 2 метров, на многолетней записи выделяется 11-летний период. Приливные вариации уровня составляют 2 мм, косейсмический скачок уровня воды отражает деформацию растяжения в области Култукского землетрясения [17].

Относительный гравиметр зафиксировал приливные вариации силы тяжести. Абсолютные гравиметрические измерения показали увеличение значения силы тяжести за период 1992-2008 гг. на 25 мкгал. В эпоху Култукского землетрясения (2008-2009 гг.) косейсмический скачок составил -7 мкгал.

Регистрация смещений GPS-методом показала для горизонтальной составляющей смещение на ЮВ, для вертикальной компоненты зарегистрировано опускание за период наблюдений с 2000 года по 2022 год.

## Обсуждение

Анализ приливных вариаций показал, что приливные числа Лява и Шида для внутриконтинентальных станций Азии на средних широтах, на примере станции Талая, по нашим гравиметрическим и деформографическим данным составляют:  $h = 0.6077 \pm 0.0008$ ,  $k = 0.3014 \pm 0.0004$ ,  $l = 0.0839 \pm 0.0001$ . Эти значения использованы для расчёта поправок в различные виды измерений, к примеру, в абсолютные гравиметрические [20].

По наклономерным и деформографическим данным эффект Главного Саянского разлома проявился в фазовом сдвиге на 9 градусов за многолетний период наблюдений [18]. Сильное близкое землетрясение 27.08.2008 г. ( $M = 6.5$ ) вызвало сдвиг фазы на 2 градуса, что соответствует модельным расчётам для глубинного разлома [21, 22]. Данные о затухании наклона в азимуте вдоль главного штрека штольни ( $-24^\circ\text{N}$ ) за 25 лет соответствуют экспоненциальной кривой. Анализируя эти данные, можно оценить постоянную времени затухания  $T$ , она равна  $T = 10$  лет. В рамках вязко-упругой модели Кельвина-Фойхта, по соотношению (3), при значении модуля сдвига  $\mu = 33$  ГПа, получаем величину эффективной вязкости среды  $\eta = 1.0 \cdot 10^{19}$  Па·с.

Данные измерений позволяют по максимальной величине вариаций наклона, используя соотношение (2) при  $e = 5 \times 4.8 \cdot 10^{-6}$ , и  $\mu_s = 20$  ГПа, оценить максимальное зарегистрированное на станции значение переменной части тектонического напряжения в земной коре  $\sigma_{zx} = 5$  бар (0.5 МПа).

Полученные оценки вязкости и напряжений, видимо, следует отнести к зоне Главного Саянского разлома, расположенного в нескольких километрах к северу от станции Талая на границе Сибирской платформы и Байкальского рифта.

Средняя скорость хода деформации за 25 лет наблюдений с деформографами ( $1 \cdot 10^{-7}$ ) приблизительно соответствует данным космической геодезии [23] на базах 10-50 км. Периодические вариации деформации с амплитудой до  $10^{-6}$  (микрострейн) не отражаются в гравиметрических результатах, что свидетельствует о локальном характере деформирования (представительность до 3 км). Для деформаций в штольне и изменений уровня воды в скважине из приливного анализа имеем отношение  $dH/d\varepsilon = 0.10$  мм/нанострейн, что позволяет оценить косейсмический скачок деформации при Култукском землетрясении:  $+ 3 \cdot 10^{-6}$ . Приливный анализ уровня воды позволил определить ориентацию зоны трещиноватости, расположенной по краю долины Талая ( $40^\circ\text{N}$ ).

Один из вариантов определения вертикальных смещений, полученных методом GPS, приведен на Рис. 3. Опускание со скоростью 3 мм/год за период 2000-2008 гг. соответствует гравиметрическим данным (увеличение значения силы тяжести за 1992-2008 гг. на 1 мкгал/год). Скачок смещений в эпоху Култукского землетрясения (27.08.2008 в 25 км от станции,  $M = 6.5$ ) на 15 мм отражается в гравиметрических данных, как уменьшение на 7 мкгал. Этот эффект свидетельствует о преобладании растяжения, охватывающем всю толщу земной коры над опусканием пункта. Скорость опускания пункта после землетрясения составляет около 0.9 мм/год, что соответствует геологическим данным 0.8 мм/год [24, 25].

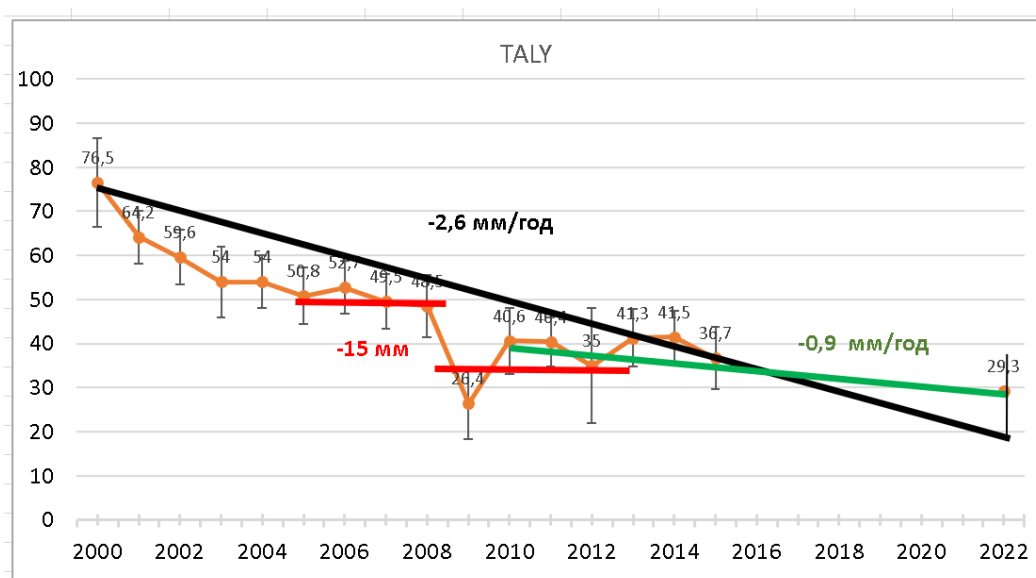


Рис. 3. Вертикальное смещение пункта Талая с 2000 года по 2022 год определено в рамках системы ITRF-2014. В расчётах использованы наиболее надёжные данные, полученные в весеннюю сессию измерений (март-апрель, на промерзшем грунте, в котором забетонирован столб для измерений).

### Заключение

Проведена комплексная интерпретация данных за 30-летнюю эпоху наблюдений на пункте Талая (БРС). Выявлены изменения скорости деформаций и смещений: перед, в момент и после Култукского землетрясения  $M=6.5$ . Вертикальные движения перед землетрясением по гравиметрическим данным (1992-2008 гг.) соответствуют опусканию пункта  $3.3$  мм/год, определённого по методу GPS, косейсмический скачок составил  $15$  мм (2008-2009 гг.), а пост-сейсмическая скорость  $0.9$  мм/год (2009-2022 гг.), что в 2-3 раза меньше пред-сейсмической. По комплексу данных за период 1992-2022 зарегистрировано опускание:  $2.6$  мм/год. Косейсмическое изменение силы тяжести (2008-2009 гг.) связано с уменьшением плотности ( $\rho = 2.7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, мощность слоя  $35$  км) на  $\delta\rho = 8.1$  г/м<sup>3</sup>, вызванное растяжением земной коры ( $\Delta\varepsilon = 3 \cdot 10^{-6}$ ) в юго-западной части БРС. Перед землетрясением зарегистрирована относительно высокая скорость опускания пункта, а далее торможение смещений перед событием. Горизонтальное смещение пункта Талая относительно Сибирской платформы (2000-2022 гг.) составили  $1.9$  мм/год, при исключении эффекта Култукского землетрясения скорость смещения  $1.7$  мм/год на ЮВВ. По данным о ходе деформаций определены эффекты, связанные с существованием Главного Саянского разлома: вязкость зоны разлома, максимальные вариации напряжений, изменения в приливных параметрах.

*Работа выполнена по проекту НИР ИНГГ СО РАН №FWZZ-2022-0019.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Thomas Jahr, Corinna Kroner, Andrea Lippmann, Strainmetersat Моха observatory, Germany. // *Journal of Geodynamics*. – 41. – 2006. -Р. 205–212.
2. Гусева Т.В., Современные движения земной коры в зоне перехода от Памира к Тянь Шаню // М. - ИФЗ АН СССР.– 1986. - 171 с.
3. Деформационные процессы в период, предшествующий Спитакскому землетрясению// Под ред. И.Л.Нерсесова, Л.А.Латыниной. - М.: ИФЗ АН СССР. - 1989. - 100 с.
4. Латынина Л.А., Кармалеева Р.М. Деформографические измерения // М.: Наука. - 1978. -154 с
5. Takemotoa Shuzo, Hideo Momose, Akito Araya, Wataru Morii, Junpei Akamatsu, Masatake Ohashi, Akiteru Takamori, Shinji Miyoki, Takashi Uchiyama, Daisuke Tatsumi, Toshihiro Higashi, Souichi Telada, Yoichi Fukuda. A 100m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains // *Journal of Geodynamics*. - 41.- 2006.-Р. 23–29.
6. Островский А.Е. Деформации земной поверхности по наблюдениям наклонов. - М.: Наука. - 1978. - 184 с.
7. Olivier Francis, Michel Van Camp, Tonie van Dam, Ren'eWarnant and Marc Hendrick Tectonics and geodynamics Indication of the uplift of the Ardenne in long-term gravity variations in Membach (Belgium) // *Geophys. J. Int.* – 2004. – 158. – Р. 346–352.
8. Попов В. В. О температурных деформациях земной поверхности // *Известия АН СССР. Физика Земли*. - 1961. – 7. - С. 3-10.
9. Blair D. Topographic, geologic and cavity effects on the harmonic content of tidal strain // *Geophys. J. R. astr. Soc.* – 1977. – Vol. 48. – Р. 393–405.
10. Agnew.D.C. Strainmeters and Tiltmeters. // *Reviews of Geophysics*. - v.24. - N3. - August 1986. – Р. 579-624.
11. Багаев С.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаев В.П. Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений // *Физика Земли*. – 1992. - № 1. -С. 85-91.
12. Буланже Ю. Д., Гриднев Д. Г., Давыдов В. И., Тененбаум С.Г., Власов Б.В. Кварцевый наклонмер НК-1 // *Приливные деформации Земли*. - М.: Наука. - 1975. - С. 149-157.
13. Гриднев Д.Г., Барсенков С.Н., Гусева Ф.П. Наблюдение приливных наклонов в Обнинске макетом кварцевого наклонмера. // *Приливные деформации Земли*. – М. - 1975. – С. 70-77.
14. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Смирнов М.Г. Лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-М и результаты наблюдений силы тяжести // *Автометрия*. 1994. 3. с. 3-11.
15. Теркот Д., Шуберт Дж., Геодинамика: геологические приложения физики сплошных сред. - М.: Мир, -Ч. 2. -1985. - 643 с.
16. Мельхиор П. Земные приливы. – М.: Мир. – 1968. – 482 с.
17. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Горнов П.Ю., Стусь Ю.Ф., Семибаламут В.М., Вариации объёмной деформации и уровня воды в скважинах, их влияние на результаты гравиметрических измерений // *Вестник СГУГиТ*. - 2021. - т.26. - №5. - С. 40-51.
18. Тимофеев В.Ю., Тимофеев А.В., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В. Кварцевые наклонмеры и опыт их использования в геофизических исследованиях // *Сейсмические приборы*. – 2019. – Т. 55. – № 3. – С. 24-47.
19. Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В., Семибаламут В.М., Фомин Ю.Н., Панов С.В., Парушкин М.Д. Применение деформографов в исследовании колебательных процессов в широком частотном диапазоне // *Сейсмические приборы*. – 2020. – Т. 56. – № 1. – С. 5-24.
20. Тимофеев В.Ю., Валитов М.Г., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Дюкарм Б., Кулинич Р.Г., Колпащикова Т.Н., Прошкина З.Н., Бойко Е.В., Наумов С.Б. Океанические приливные



модели и гравиметрические приливные наблюдения // Океанология. – 2020. – Т. 60. – № 1. – С. 37-48.

21. Молоденский С.М. Приливы, нутация и внутреннее строение Земли. - М.: ИФЗ АН СССР. - 1984. - 215 с.

22. Beaumont C., Berger J. Earthquake Prediction: Modification of the Earth Tide tilts and Strains by Dilatancy // Geophys. J. R. astron. Soc. – 1974. -V.39. -P. 111-121.

23. Саньков В.А., Леви К.Г., Кале Э., Девершер Ж., Лесне О., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Буддо В.Ю., Залуцкий В.Т., Башкуев Ю.Б. Современные и голоценовые горизонтальные движения на Байкальском геодинамическом полигоне// Геология и геофизика. - 2009. - т.40. - №3. - С. 422-430.

24. В.Ю. Тимофеев, А.В.Тимофеев, Д.Г. Ардюков, И.С. Сизиков, Д.А. Носов // Измерение современных движений на станции Талая (юго-западная часть Байкальского рифта) // Вестник СГУГиТ. – 2023. – т.28. - № 4 (август). 59-70.

25. Чеботарев А. А. «Морфотектоника горного фронта Тункинских Гольцов и позднечетвертичное осадконакопление в Тункинской системе впадин»// Автореферат и кандидатская диссертация по специальности 1.6.1. - Иркутск. - ИЗК СО РАН. - 2023. - 250 с.

© В. Ю.Тимофеев, Д. Г.Ардюков, А. В. Тимофеев, 2024