



ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В БАЙКАЛЬСКОМ И АЛТАЙСКОМ РЕГИОНАХ

В.Ю. Тимофеев¹, А.В. Тимофеев¹, В.М. Семибаламут²

*¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,*

²Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук” Сибирский филиал, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия

e-mail: TimofeevVY@ipgg.sbras.ru

В работе рассматриваются результаты многолетних измерений скорости современной деформации в штольне, в скважине и на земной поверхности. Используются короткобазисные (кварцевые наклонометры и лазерные деформографы, датчики уровня воды, база от метров до десятков метров) и длиннобазисные (комплекты спутниковой навигации, база измерения деформаций от десятков до сотен километров) средства измерений. Выделены косейсмические скачки деформации (до 10^{-6}) в Байкальском и Алтайском регионах. Годовые межсейсмические скорости деформирования ($5 \cdot 10^{-8}$) в регионах оказались сходными.

Современные скорости деформации земной коры, лазерные деформографы, наклонометры, ультразвуковые датчики уровня воды, приемники космической геодезии, Байкальский и Алтайский сейсмоактивные регионы

DEFORMATION MEASUREMENT AT BAIKAL AND ALTAY REGIONS

V.Yu. Timofeev¹, A.V. Timofeev¹, V.M. Semibalamut²

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

*²Federal Research Center “United Geophysical Survey of the RAS”, Siberian Branch,
Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

e-mail: TimofeevVY @ipgg.sbras.ru

The paper presents the results of velocity observations for current deformation in underground gallery, In wells and on earth surface. Different instruments were used: short-base quartz tiltmeters and laser extensometers, sensors of water level with meters base, and long-base sensors (spacy geodynamic instruments with kilometers bases). Coseismic deformation jumps obtained (up to 10^{-6}) at Baikal and Altay regions. Annual velocities (at $5 \cdot 10^{-8}$ level) were registered at Baikal and Altay.

Modern deformation velocities for earth surface, laser extensometers, tiltmeters, ultrasound sensor of water level, spacy geodesy receivers, seismic-active Baikal and Altay regions

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что разрушение материалов происходит при достижении уровня критических деформаций в упругой среде. Факт образования протяженных разрывов, картируемых на земной поверхности при сильных землетрясениях, позволяет связывать подготовку землетрясений с процессами деформирования земной коры. В таком случае само сейсмическое событие есть результат быстрого

высвобождения упругой энергии, накопившейся в геологической среде. Измерения смещений и деформаций пунктов, расположенных на земной поверхности, различными методами проводятся многие десятилетия [Jahr et al., 2006; Takemoto et al., 2006; Чупин, 2019]. Множество известных результатов относится к измерениям в зонах сильных землетрясений и крупных промышленных объектов [Лухнев и др., 2021; Долгих, Долгих, 2022]. Такие исследования проводятся для поиска предвестников и уточнения параметров землетрясений, определения величины тектонических эффектов, определения критического уровня техногенных деформаций. Методы измерений изменения положений точек на поверхности относятся как к геодезии, так и к геофизике [Agnew, 1986]. Измерения деформаций проводятся на различных базах от долей метра до сотен километров. Существенные различия в методах и технологиях имеются при измерениях на земной поверхности и в глубине. Задача нашего исследования – проиллюстрировать возможности и результаты многолетних измерений разными системами: деформографами, наклономерами, датчиками уровня в скважинах, приемниками космической геодезии на примерах, полученных при многолетних наблюдениях в сейсмоактивных регионах Сибири (Байкальская рифтовая система и Горный Алтай).

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И АППАРАТУРА

В нашей стране деформографические и наклономерные измерения широко использовались в сейсмоактивных регионах СССР и в зонах строительства крупных гидроэлектростанций [Островский, 1978; Гриднев и др., 1989]. При проведении измерений на земной поверхности и в подземных штольнях было отмечено существенное отличие в уровне регистрируемых квазисуточных вариаций. Известно, что температурные наклоны и деформации (неприливные периодические) в основном вызваны периодическим неравномерным нагревом поверхности при суточном вращении Земли [Попов, 1961]. Неоднородности в нагреве земной поверхности возникают из-за расчлененности рельефа, наличия зданий, различий в цвете пород поверхности и коэффициентах теплопроводности. Как следует из известных аналитических выражений [Попов, 1961], наклоны на поверхности при обычных параметрах рельефа (1–5 км) составляют от 0.1 до 1 с дуги (для деформаций до 10^{-6}). При заглублении пункта измерений происходит экспоненциальное затухание величины эффекта, а уже с глубин 10 м и больше появляется возможность, помимо долговременных вариаций деформаций, связанных с тектоническими и сейсмическими эффектами, изучения эффектов земных приливов (50 мс дуги в наклонах и $3 \cdot 10^{-8}$ деформациях) и собственных колебаний Земли.

Кратко остановимся на конструкции приборов (наклономер, деформограф и система космической геодезии), которые использовались в наших экспериментах для изучения деформаций на уровне от 10^{-6} до 10^{-9} , что соответствует наклонам земной поверхности от секунд дуги до миллисекунд дуги. В наклономерах датчиком наклона является кварцевый или металлический маятник на цельнеровском подвесе. Известно, что при медленных движениях чувствительность такой системы пропорциональна квадрату периода. Для длиннопериодного горизонтального маятника – маятника Цельнера – компонента силы тяжести наклонной под углом Z к вертикальной плоскости равна $g \cdot \cos Z$. Следовательно, период маятника длиной L равен:

$$T = 2\pi[L/(g \cdot \cos Z)]^{1/2}. \quad (1)$$

По мере приближения маятника к горизонтальному положению ($Z \rightarrow \pi/2$) период колебаний приближается к бесконечности, возрастает чувствительность, но маятник теряет устойчивость для наклономеров $T_{\max} = 60$ с. При измерениях в штольнях с низким уровнем шумов нами достигался период в 15–20 с, что достаточно сложно и требует долгого времени установки. На поверхностных пунктах использовались периоды 2–4 с, что, естественно, резко увеличивало диапазон измерений.

Обычно при измерениях в штольнях используются как штанговые системы регистрации деформаций, так и лазерные. Кратко остановимся на описании используемого нами лазерного деформографа. Данный тип приборов относится к гетеродинным фазочувствительным лазерным измерителям малых перемещений на больших базах. В его основу положена двухчастотная интерферометрическая система с двумя синхронизированными по фазе лазерами [Багаев и др., 1992]. Принцип действия системы состоит в непрерывной регистрации изменения фазы волны во времени, обусловленной эффектом Доплера при отражении излучения от движущегося объекта, так что

$$\Delta l = (\Delta\varphi(t)/2\pi)\lambda/2 = (\lambda/4\pi) \int_0^T \Omega(t) dt, \quad (2)$$

где Δl – регистрируемое перемещение, $\Delta\varphi(t)$ – разность фаз, λ – длина волны и $\Omega(t)$ – частотный доплеровский сдвиг, зависящий от времени, а T – время измерения. Чувствительность системы в реальных условиях штольни при стабильных значениях температуры (суточные вариации 0.001 °C) ограничена воздействием вариаций атмосферного давления, поэтому была экспериментально реализована лазерная интерферометрическая система с опорным компенсационным плечом. Без специальной экранировки каждого из двух измерительных плеч в такой системе удалось исключить влияние медленных суточных вариаций метеопараметров на деформационный сигнал и поднять относительную чувствительность к перемещениям в приливном диапазоне частот более чем на два порядка, достигнув величины 10^{-9} – 10^{-11} . Конечно, даже при измерениях при стабильной температуре в регистрируемом сигнале остаются сезонные метеовлияния.

Периодические колебания уровня в глубоких скважинах известны давно. В таком случае ограниченная пластом жидкость действует как объемный деформограф. Малые объемные дилатации порядка 10^{-8} вызывают наблюдаемые приливные колебания водного уровня от нескольких миллиметров до десятков сантиметров. Такие флуктуации противоположны по фазе с приливным потенциалом: низкий прилив вызывает сжатие, которое повышает уровень жидкости. Наблюдения за долговременными изменениями уровня позволяет надеяться на определение параметров длиннопериодных эффектов. Регистрация измерений водного уровня проводилась с помощью установленного в скважине датчика давления, чувствительность системы составляла 0.1 мм. Известны трудности калибровки такого инструмента при измерениях объемной деформации пласта, но комплекс таких измерений с приливными деформографическими определениями позволяет определить упругий коэффициент для отдельной скважины, который можно использовать для изучения многолетних вариаций.

Рассматривая возможности метода космической геодезии, отметим, что основная проблема при вычислении расстояния до спутника системы спутниковой навигации связана с синхронизацией часов на спутнике и в приемнике. Даже мизерная погрешность может привести к огромной ошибке в определении расстояния. Каждый спутник несет на борту высокоточные атомные часы, которые встроить в обычный приемник невозможно. Чтобы скоррелировать временное рассогласование и избежать огромных ошибок в позиционировании, в систему спутниковой навигации введен принцип избыточности для определения

трехмерных координат на поверхности Земли. Обычно приемник использует сигналы не трех, а как минимум четырех спутников и на основании вспомогательных сигналов вносит все необходимые коррективы в работу своих часов. Кроме навигационных сигналов спутник непрерывно передает различную служебную информацию. Приемник получает, например, эфемериды (точные данные об орбите спутника), прогноз задержки распространения радиосигнала в ионосфере, а также сведения о работоспособности спутника. Элементы орбит известны с высокой точностью и корректируются 2–3 раза в день; также корректируются и высокоточные часы, точность которых сравнима с атомными часами – порядка 3 нс. Точность, достигаемая при таком использовании группового сигнала, в настоящее время составляет лишь несколько метров. Принципиально новые возможности системы были обнаружены в экспериментах по оценке фазовых задержек сигнала. Инструментальная точность приема фазовых сигналов составляет 0.2 мм в расчете расстояния до спутника, однако, сами отсчеты изначально содержат неоднозначность в виде неизвестного целого числа длин волн, а также подвержены искажающему влиянию ряда факторов, в первую очередь, задержек сигнала, связанных с прохождением через ионосферу и тропосферу. Разрешение указанных неоднозначностей и устранение искажений позволили достичь точности измерения взаимных расстояний 1–2 мм, что обусловило возможность применения системы для геодинимических исследований. Нами при геодинимических исследованиях используются двухчастотные приемники космической геодезии при накоплении сигнала в 36 и более часов. Постобработка данных проводится по специальным программам с использованием данных мировых постоянных станций и комплекса спутниковых поправок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ШТОЛЬНЕ, В СКВАЖИНЕ И НА ПОВЕРХНОСТИ

Наиболее широкий спектр методов измерения деформаций представлен на сейсмостанции Талая (координаты 51.68°N, 103.64°E), расположенной на берегу озера Байкал (рис. 1).



Рис. 1. Положение станции Талая в 4 км к западу от берега озера Байкал, южнее Главного Саянского разлома

Байкальский регион известен своей высокой сейсмичностью. Станция Талая находится в нескольких километрах южнее Главного Саянского разлома – границы Сибирской платформы и Байкальской рифтовой системы. Здесь имеется горизонтальная 90-метровая штольня, пройденная в северном склоне горной гряды, что минимизирует температурные эффекты. Суточные вариации

температуры в 90 м от входа составляют 0.001 °С, годовые вариации от 1 °С зимой до 2 °С летом. В штольне и были установлены наклонометры и деформографы различных систем. В 100 м от штольни у южного склона долины ручья Талая расположена 120-ти метровая скважина, пройденная в архейских мраморах. В штольне отмечены гранито-гнейсовые интрузии с проявлениями слюды. Кондиционные данные по деформациям получены разными методами в период с 1985 по 2015 гг. Отдельные примеры записи зарегистрированных наклонов, деформаций и вариаций уровня воды в скважине приведены на рис. 2–5.

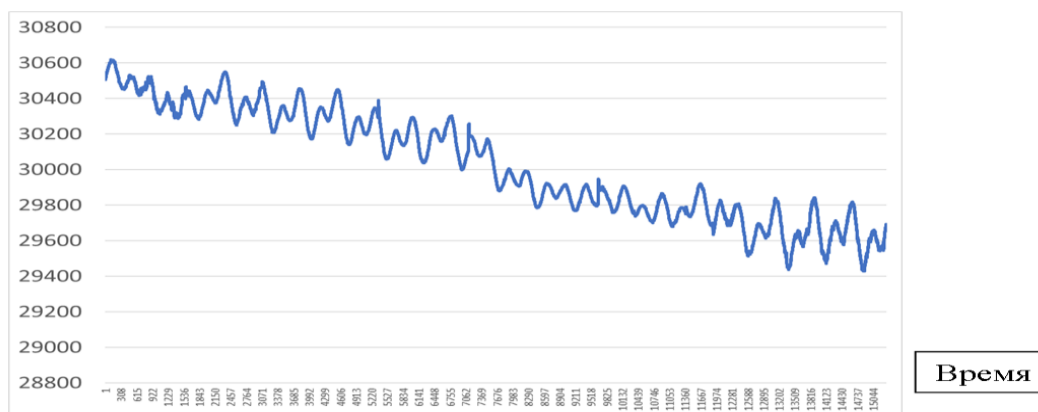


Рис. 2. Ход наклона (В–3) в период 23.06.1999, 03 часа 00 минут по 1999.07.14, 09 часов 00 минут, шаг 60 секунд. Горизонтальная шкала – время (минуты), вертикальная шкала – наклон (10^{-7} секунды дуги = 200 делений шкалы). Выделяются двухнедельные вариации амплитуды (низкий и высокий прилив), связанные с положением Луны (лунным месяцем)

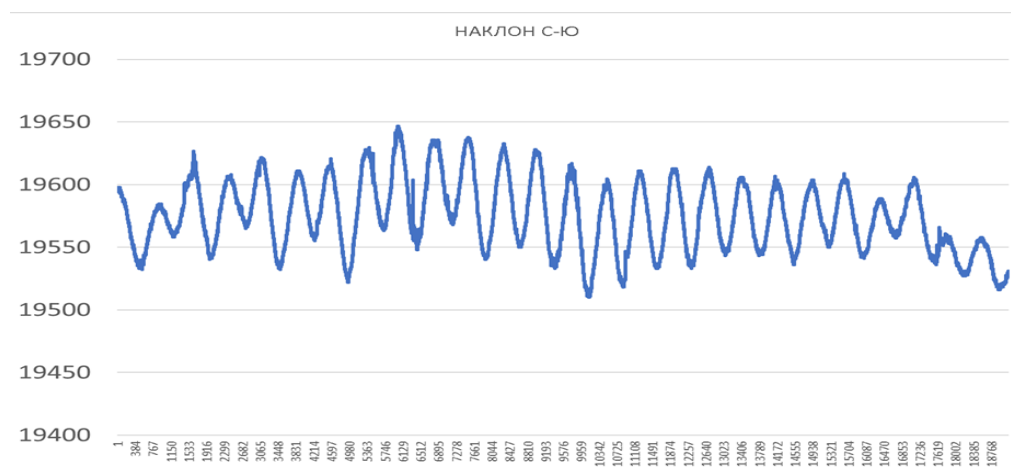


Рис. 3. Ход наклона (С–Ю) в период 03.09.1999, 17 часов 00 минут по 17.09.1999, 00 часов 00 минут, шаг 60 секунд. Горизонтальная шкала – время (минуты), вертикальная шкала – наклон (50 делений шкалы= 10^{-7} секунды дуги)

На основе данных многолетних измерений проведено изучение приливных вариаций наклонов и деформаций [Тимофеев и др., 2008; Ducarme et al., 2008]. Полученные результаты хорошо соответствуют статической (упругие деформации) и динамической (резонанс жидкого ядра Земли) теории приливных деформаций (модель приливной деформации Земли DDW99 и модели океана TPX06) [Dehant et al., 1999]. В результате имеется возможность точного расчета эффектов по разным компонентам прилива,

например, определить коэффициент связи объемной деформации и уровня воды в скважине, что позволяет проанализировать вариации уровня, как изменения объемной деформации (рис. 4 и 6).

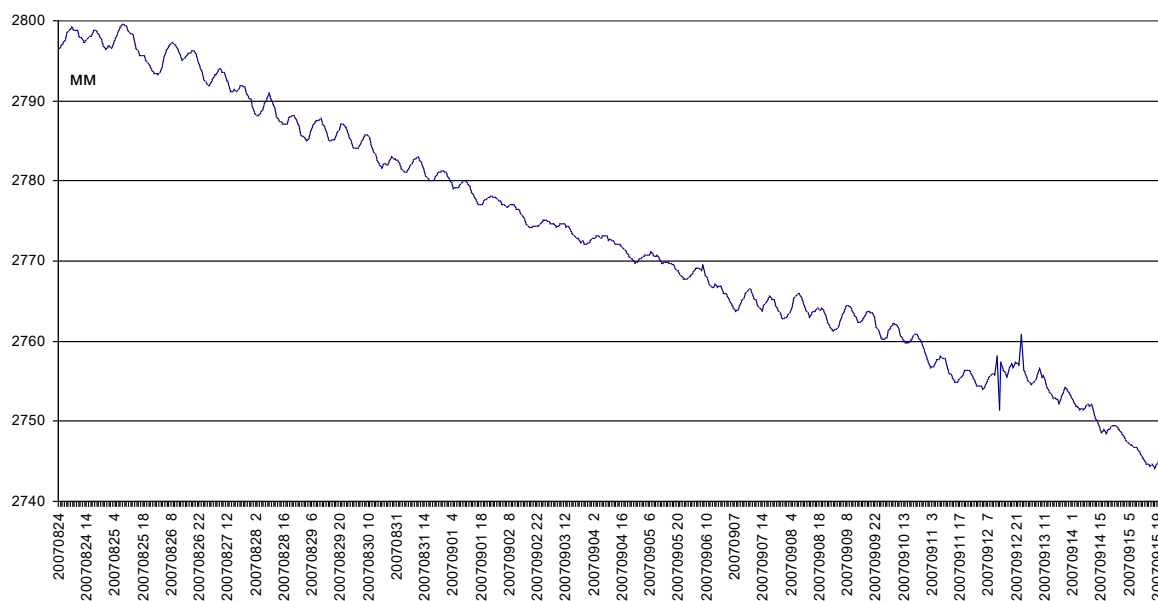


Рис. 4. Приливные вариации водного уровня в миллиметрах по данным наблюдений ультразвуковым датчиком. На графике показана почасовая серия наблюдений с 24.08.2007 по 16.09.2007 (приливная амплитуда до 0.2 см) [Тимофеев и др., 2012]

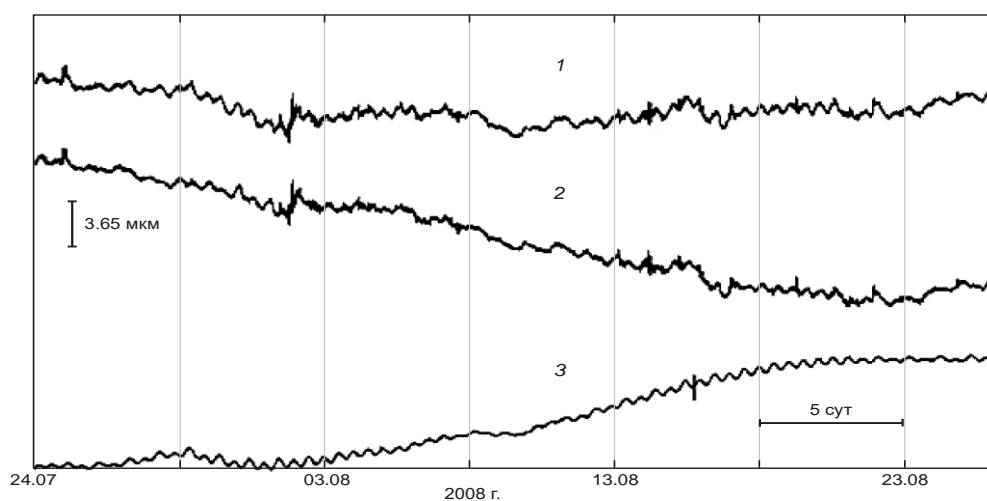


Рис. 5. Результаты наблюдений лазерным деформографом за месяц до Култукского землетрясения (27.08.2008 г., $M = 6.3$, $L = 25$ км). Ход деформации по двум направлениям $-24^\circ N$ (1) и 66° (2) и разностная деформация (3), база деформографов 25 м, штольня сейсмостанции Талая [Тимофеев и др., 2020]

Из короткопериодных вариаций хода деформации следует выделить косейсмический скачок деформаций в момент Култукского землетрясения (27.08.2008 г., $M = 6.3$), случившегося в 25 км от сейсмостанции. Отклик был получен на всех деформографических устройствах (кварцевые наклономеры, лазерные деформографы, уровнемеры). Скачок объемной деформации составил $\Delta = +1 \cdot 10^{-6}$ (см. рис. 6). Полученные результаты вместе с данными о косейсмических смещениях и использованием решения прямой задачи при дислокационной модели землетрясения [Toda et al., 2009], позволили уточнить

положение эпицентра Култукского землетрясения, случившегося в районе акватории озера Байкал (рис. 7).

Рассмотрим многолетние изменения скорости деформации, используя изменения за месяц и за год (рис. 8–10). Оценим вклад годовых вариаций уровня (1 м) озера Байкал, расположенного в 4 км к востоку от станции. В упругом решении для годового изменения деформаций получаем значение 10^{-8} , что и определяет нижний уровень представительности для многолетних наблюдений наклонов и деформаций.

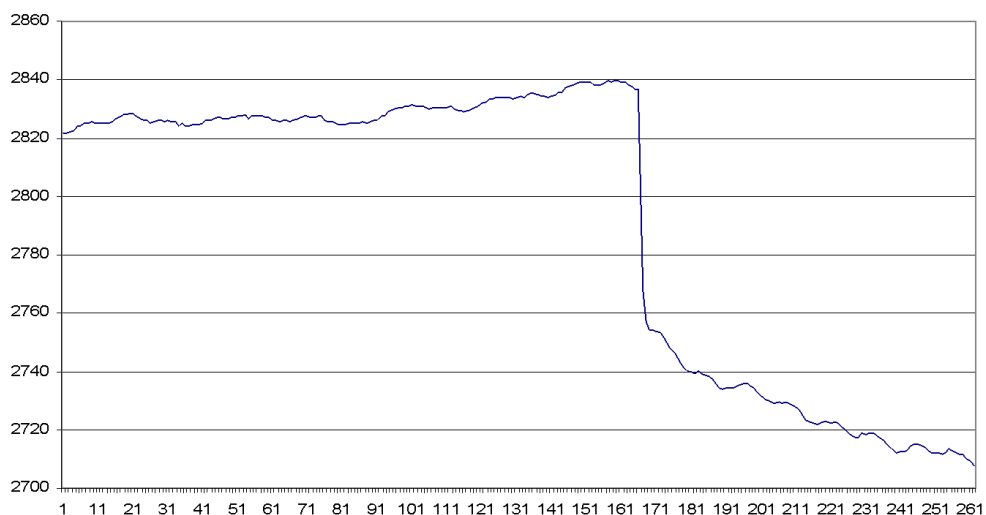


Рис. 6. Вариации уровня воды в скважине Талая (с 13 ч 20.08.2008 до 10 ч 31.08.2008 г.) скачок 10–11 ч 27.08.2008 – землетрясение, при часовой дискретизации записи. Время местное. По вертикальной оси – мм, по горизонтальной – часы. Упругий коэффициент получен из приливного анализа $dH/d\epsilon = 0.10$ мм/нстр. Нстр – нанострейн 10^{-9} [Тимофеев и др., 2012]. Косейсмический скачок объемной деформации составил: $\Delta = +1 \cdot 10^{-6}$

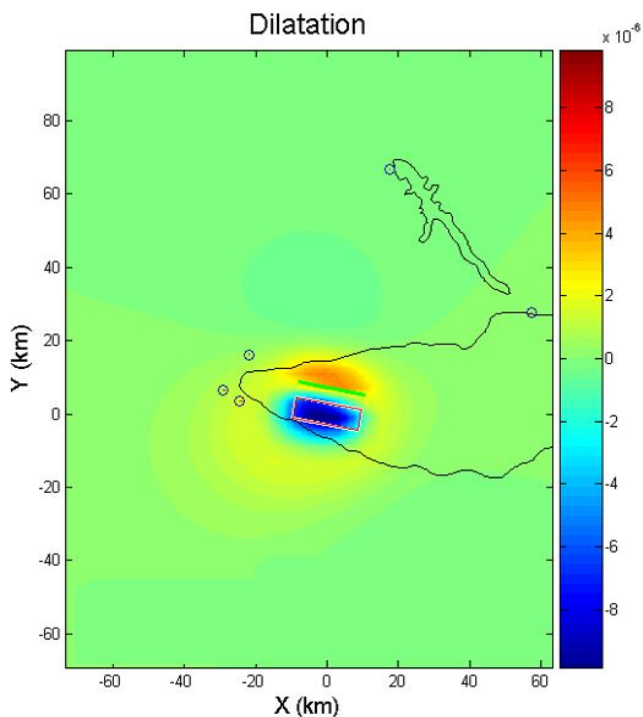


Рис. 7. Моделирование косейсмической объемной деформации (координаты Култукского землетрясения 27.08.2008: 51.62° N, 104.06° E, $M = 6.3$, параметры очага 101-61-55 – ориентация разрыва, угол падения разрыва, ориентация смещения по разрыву в градусах). Дислокационная модель землетрясения, сейсмическая подвижка в упругом полупространстве [Toda et al., 2009] по данным [<http://www.seismo.crust.irk.ru>]

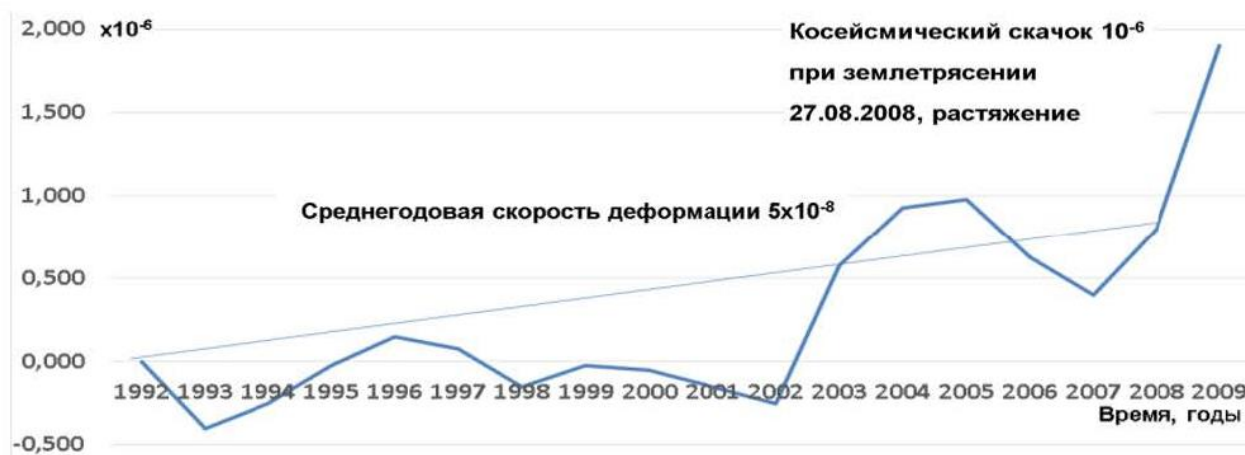


Рис. 10. Изменение объемной деформации по данным, полученным лазерными деформографами в штольне сейсмостанции Талая [Тимофеев и др., 2020]

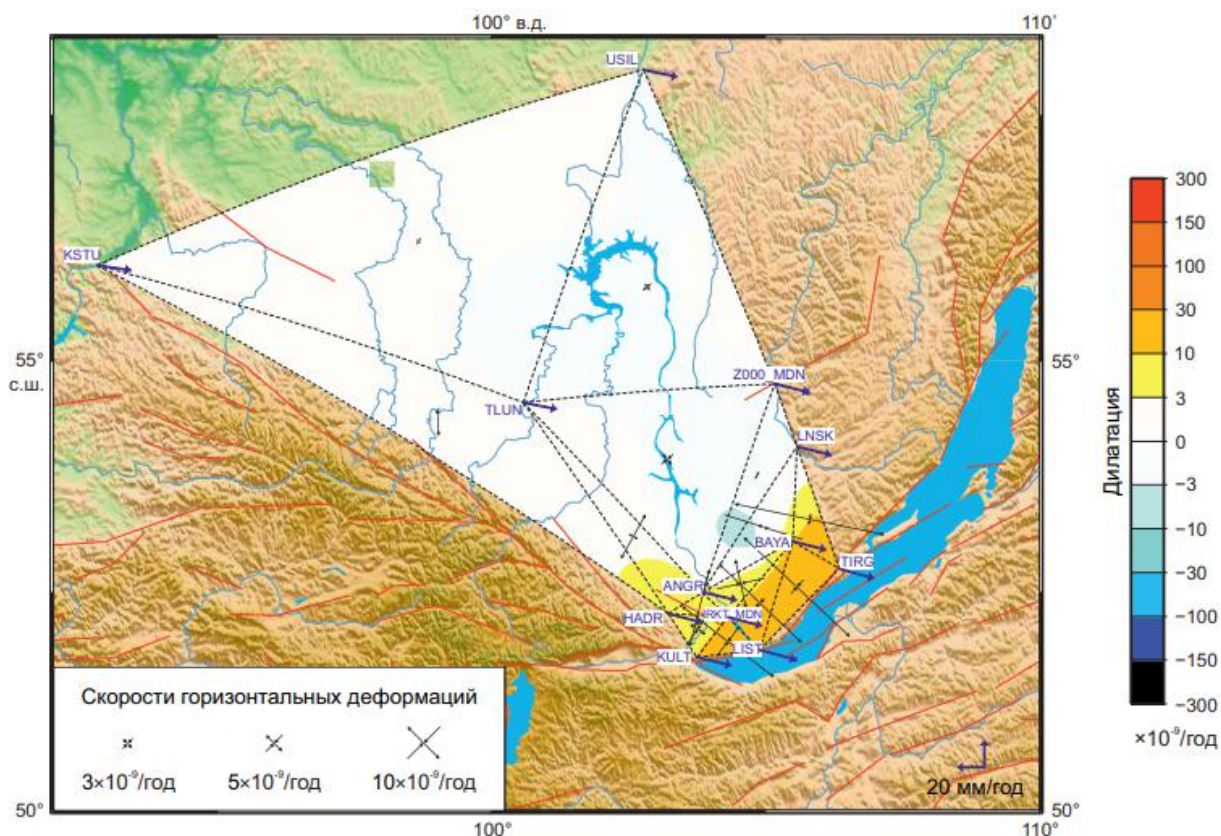


Рис. 11. Скорости дилатации и главных деформаций по определениям методом космической геодезии на Сибирской платформе и в юго-западной части Байкальской рифтовой системы [Ашурков, 2022]

Ход уровня воды в скважине за период 1993–2009 гг. показывает сильное влияния климатических сезонных вариаций, в основном связанных с проникновением осадков в скважину (рис. 9). Многолетние вариации уровня имеют период 11 лет [Тимофеев и др., 2012].

Изменения объемной деформации до данным измерений по двум осям в штольне за период 1992–2009 гг. приведены на рис. 10. При этом среднегодовая скорость деформации составила $5 \cdot 10^{-8}$. Появление методов космической геодезии позволяет сравнить данные, полученные на метровых базах, с данными определений на многокилометровых. Как следует из определений, представленных на рис. 11,

полученные на Талой данные в целом соответствуют GPS скоростям деформирования Байкальской рифтовой системы, а для Сибирской платформы скорости GPS деформирования минимум на порядок меньше и не превышают 10^{-9} .

Измерения смещений и деформаций в сейсмоактивном регионе – Горном Алтае – продолжаются ежегодно с лета 2000 г. Сеть измерений в южной части региона показана на рис. 12.

Таблица 1

Координаты пунктов Алтайской сети

| Код станции | Широта φ, градусы | Долгота λ, градусы | Высота Н, м |
|-------------|-------------------|--------------------|-------------|
| SEMI | 51.014 | 85.626 | 1483 |
| USTK | 50.939 | 84.769 | 1003 |
| BALY | 50.703 | 88.002 | 1259 |
| CHIK | 50.644 | 86.313 | 1710 |
| YAZU | 50.586 | 88.851 | 1544 |
| ULAG | 50.500 | 87.654 | 2039 |
| KURA | 50.245 | 87.890 | 1470 |
| KAYT | 50.146 | 85.439 | 1038 |
| KAIT | 50.145 | 85.464 | 983 |
| CHAG | 50.068 | 88.417 | 1710 |
| UKOK | 49.562 | 88.232 | 2323 |

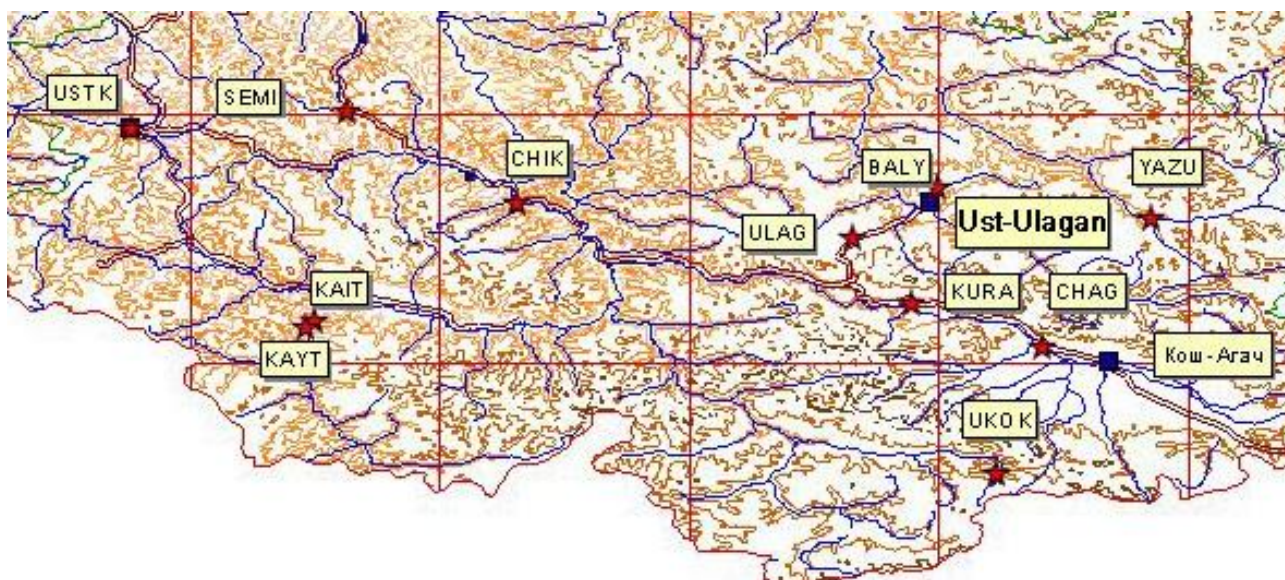


Рис. 12. Положение и коды GPS станций Алтайской геодинимической сети в южной части Горного Алтая (табл. 1). Приведены дорожная и гидросеть

По данным измерений методом космической геодезии в период 2003–2004 гг. зарегистрирован правосторонний скачок смещений в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (координаты эпицентра 50.0° N, 88.1° E, $M = 7.3–7.5$) [Гольдин и др., 2005]. Относительное смещение на сейсмическом разрыве достигало 2 м. Ориентация смещений по определениям на пунктах KURA (155° N) и CHAG (125° N) в

среднем составила $140^\circ \text{ N} \pm 15^\circ$, что соответствует геологическим и сейсмологическим определениям ориентации сейсмического разрыва. Косейсмическое правостороннее смещение по нашим данным в зависимости от расстояния меняется от 0.40 м в 11 км от разрыва до 0.04 м в 90 км. Его можно описать в рамках упругой модели сдвига на вертикальном разломе. В целом для описания процесса землетрясения можно использовать модель упругой отдачи. По данным (2003–2004 гг.), полученным в эпицентральной части Чуйского землетрясения, определено положение главных деформаций по треугольникам: UKOK, KAIT, CHIK; KURA, ULAG, BALY; KURA, BALY, YAZU; CHAG, YAZU, KURA. Базы треугольников составляли от десятков до сотен километров. Косейсмический скачок даже на больших базах составил несколько единиц на 10^{-6} и соответствовал модельным расчетам по [Toda et al., 2009].

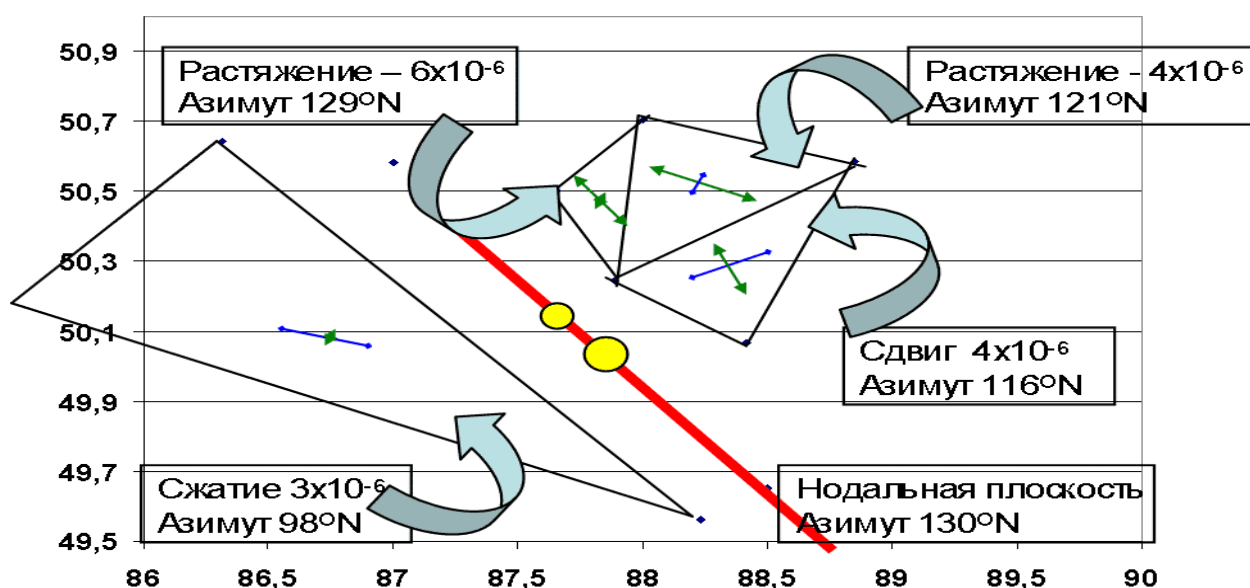


Рис. 13. Косейсмические деформации при Чуйском землетрясении 27.09.2003 по данным измерений методом космической геодезии (2003–2004 гг.). По данным пунктов UKOK, KAIT, CHIK; KURA, ULAG, BALY; KURA, BALY, YAZU; CHAG, YAZU, KURA. Красная линия – схематическое положение сейсмического разрыва (ориентация по сейсмическим данным 130° N , глубина по разным определениям от 10 до 26 км, разрыв субвертикален и выходит на поверхность). Желтыми кружками показано положение главного события 27.09.2003 и следующего сильного афтершока 01.10.2003

Оценка уровня межсейсмических деформаций проведена по данным измерений на пунктах KAIT, KAYT, USTK, расположенных 200–300 км от эпицентра Чуйского землетрясения. Пункт KAYT является измерительным полигоном Института лазерной физики СО РАН [Багаев и др., 1992], где проводятся регулярные измерения лазерными дальномерными системами, абсолютными лазерными баллистическими гравиметрами и системами космической геодезии. Измерения методом космической геодезии показали, что среднегодовая скорость деформации 2-х километровой линии KAIT–KAYT (рис. 12), простирающейся с запада на восток, за период 2001–2021 гг. составила $+2 \cdot 10^{-8}$ (растяжение). Линия расположена на резко пересеченном рельефе в межгорной долине у реки Катунь и ее притоков. Для линии KAIT–USTK (см. рис. 12), составляющей 100 км, изменение в период Чуйского землетрясения (2003–2004 гг.) составило $+3 \cdot 10^{-8}$ (растяжение). Среднегодовая скорость деформирования линии KAIT–USTK за период 2001–2021 гг. составила $-5 \cdot 10^{-8}$ (сжатие).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследование деформаций в регионе позволяет переходить к прогнозу и оценке сейсмической опасности, но оценка полной величины накопленных деформаций в среде возможна пока только качественными геологическими методами. Количественно же мы можем оценить скорость изменения деформаций и косейсмический скачок, что позволяет приблизительно определить время подготовки землетрясения. Изучение современных деформаций в отдельных регионах Земли в настоящее время отличается большим разнообразием методов. Появилась возможность рассматривать смещения и деформации для Азии на различных масштабных уровнях (тектоническая плита – сейсмоактивный регион – граница плиты и региона – глубинный разлом и отдельный измерительный пункт). Использование наклономеров и деформографов, установленных в штольне сейсмостанции Талая, а также регистрация уровня воды в скважине позволили оценить уровень приливных эффектов. Оказалось, что полученные результаты хорошо соответствуют статической (упругие деформации) и динамической (резонанс жидкого ядра Земли) теории приливных деформаций (модель приливной деформации Земли DDW99 и модели океана TRX06). Быстрые изменения деформаций в момент сильного регионального землетрясения были зарегистрированы всеми системами и позволили уточнить параметры Култукского землетрясения 27.08.2008 г., с использованием решения прямой задачи. Многолетние вариации наклонов, регистрируемых в штольне на базе в несколько метров, отражают периодическое деформирование края блока земной коры Байкальской рифтовой системы, а ход наклона коррелирует с сильными региональными землетрясениями ($M \geq 5$ на расстоянии до 200 км). Деформации на базе в 25 м за 17-ти летний период наблюдений показали среднегодовую скорость изменений $5 \cdot 10^{-8}$, что хорошо совпадает с результатами измерений методами космической геодезии в этом регионе. Использование метода спутниковой навигации в Горном Алтае показало его высокую эффективность при определении величины косейсмической деформации в эпицентре Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. При этом изменения деформации в эпицентральной зоне на базах от десятков до сотен километров оказалось на уровне 10^{-6} . Величина межсейсмических изменений оценивалась на расстоянии в 200–300 км от эпицентра. Годовая скорость деформации на базе в 100 км за 20-ти летний период наблюдений составила $5 \cdot 10^{-8}$. В целом межсейсмические скорости деформации Алтайского региона совпадают с величинами скоростей, зарегистрированных в Байкальской рифтовой зоне. Контроль за скоростью накопления деформаций в отдельных точках среды позволяет надеяться на выделение потенциально опасных областей будущих природных и техногенных катастроф.

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН, номер FWZZ-2022-0019 «Механизмы воздействия природных и техногенных факторов на процессы в геосферах по результатам мониторинга естественных геофизических полей».

ЛИТЕРАТУРА

- Ашурков С.В.** Деформация южной части Сибирской платформы по данным GPS измерений // Геодинамика и тектонофизика. – 2022. – № 13 (1), 0628, doi: 10.5800/GT-2022-13-1-0628.
- 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.
- Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г.** Поля смещений земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // Доклады академии наук. – 2005. – № 405 (6). – С. 804–809.

- Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю.** Наклоны земной поверхности в районе водохранилища Иркутской ГЭС // Геология и геофизика. – 1989. – № 30 (3). – С. 116–122.
- Долгих Г.И., Долгих С.Г.** Деформационные аномалии как индикатор генерации цунами // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – № 502 (2). – С. 77–82, doi: 10.31857/S2686739722020050.
- Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Саньков А.В., Бызов Л.М.** Тектонические деформации и последующие сейсмические события юго-западного фланга Байкальской рифтовой системы по данным GPS измерений // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – № 500 (1). – С. 58–63, doi: 10.31857/S2686739721090139.
- Островский А.Е.** Деформации земной поверхности по наблюдениям наклонов. – М.: Наука. – 1978. – 184 с.
- Попов В.В.** О температурных деформациях земной поверхности // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1961. – № 7. – С. 3–10.
- Тимофеев В.Ю., Дюкарм Б., Ван Раумбеке М., Горнов П.Ю., Эвераерт М., Грибанова Е.И., Паровышний В.А., Семибаламут В.М., Вепельман Г., Ардюков Д.Г.** Трансконтинентальный приливный профиль: Атлантическое побережье Европы – Юг Сибири – Тихоокеанское побережье России // Физика Земли. – 2008. – № 5. – С. 42–54.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Бойко Е.В., Тимофеев А.В., Ярошевич А.В., Горнов П.Ю.** Об оценке косейсмической деформации, параметров пороупругости и трещиноватости среды по данным уровнемерных наблюдений в скважине // Физика Земли. – 2012. – № 7–8. – С. 89–102.
- 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, doi: 10.21455/si2020.1-1.
- Чупин В.А.** Томография морского дна береговыми лазерными деформографами // Физика геосфер. 11-й Всероссийский симпозиум: Материалы докладов, 9–14 сентября 2019 г. – Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2019. – С. 205–208.
- Agnew D.C.** Strainmeters and tiltmeters // Reviews of Geophysics. – 1986. – Vol. 24 (3). – P. 579–624, doi: 10.1029/RG024i003p00579.
- Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M.** Tides for a convective Earth // Journal of Geophysical Research. – 1999. – Vol. 104 (B 1). – P. 1035–1058, doi: 10.1029/1998JB900051.
- Ducarme B., Timofeev V.Yu., Everaerts M., Gornov P.Y., Parovishnii V.A., van Ruymbeke M.** A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections // Journal of Geodynamics. – 2008. – Vol. 45 (2–3). – P. 73–82, doi: 10.1016/j.jog.2007.07.001.
- Jahr T., Kroner C., Lippmann A.** Strainmeters at Moxa observatory, Germany // Journal of Geodynamics. – 2006. – Vol. 41 (1–3). – P. 205–212, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.017.
- Takemoto S., Momose H., Araya A., Morii W., Akamatsu J., Ohashi M., Takamori A., Miyoki S., Uchiyama T., Tatsumi D., Higashi T., Telada S., Fukuda Y.** A 100m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains // Journal of Geodynamics. – 2006. – Vol. 41. – P. 23–29, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.009.
- Toda S., Steina R., Lin J., Sevilgen V.** Coulomb 3. Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching / USGS Earthquake Hazards Program – Northern California, 2003–2009. – Режим доступа: <http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling>.

REFERENCES

- Agnew D.C.** Strainmeters and tiltmeters // *Reviews of Geophysics*. – 1986. – Vol. 24 (3). – P. 579–624, doi: 10.1029/RG024i003p00579.
- Ashurkov S.V.** Deformation of southern part of Siberian platform by GPS data // *Geodynamics and Tectonophysics*. – 2022. – Vol. 13 (1), Article 0628, doi: 10.5800/GT-2022-13-1-0628.
- Bagaev S.N., Orlov V.A., Fomin Yu.N., Chebotaev V.P.** Geterodin laser extensometers for precise geophysical observations // *Fizika Zemli*. – 1992. – Vol. 1. – P. 85–91.
- Chupin V.A.** Tomography of the marine bottom by cost laser extensometers // *Physics of Geospheres. Proceedings of 11th All-Russia Symposium, Vladivostok, 9–14 September 2019*. – TOI FEB RAS, Vladivostok, 2019. – P. 205–208.
- Dehant V., Defraigne P., Wahr J.M.** Tides for a convective Earth // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104 (B 1). – P. 1035–1058, doi: 10.1029/1998JB900051.
- Dolgikh G.I., Dolgikh S.G.** Deformation anomalies as an indicator of tsunami generation // *Doklady Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 502 (1–2). – P. 25–30, doi: 10.1134/S1028334X22020052.
- Ducarme B., Timofeev V.Yu., Everaerts M., Gornov P.Y., Parovishnii V.A., van Ruymbeke M.** A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections // *Journal of Geodynamics*. – 2008. – Vol. 45 (2–3). – P. 73–82, doi: 10.1016/j.jog.2007.07.001.
- Goldin S.V., Timofeev V.Yu., Ardukov D.G.** Displacements surface fields at Chuiskoe earthquake zone, Gornii Altay // *Doklady Earth Sciences*. – 2005. – Vol. 405 (6). – P. 804–809.
- Gridnev D.G., Sarycheva Yu.K., Timofeev V.Yu.** The slopes of the Earth's surface in the water reservoir zone of the Irkutsk Hydroelectric Power Station // *Geologiya i Geofizika*. – 1989. – Vol. 30 (3). – P. 116–122.
- Jahr T., Kroner C., Lippmann A.** Strainmeters at Moxa observatory, Germany // *Journal of Geodynamics*. – 2006. – Vol. 41 (1–3). – P. 205–212, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.017.
- Lukhnev A.V., Sankov V.A., Miroshnichenko A.I., Sankov A.V., Byzov L.M.** Tectonic deformations and subsequent seismic events in the southwestern flank of the Baikal Rift System based on GPS data // *Doklady Earth Sciences*. – 2021. – Vol. 500 (1). – P. 756–760, doi: 10.1134/S1028334X21090130.
- Ostrovsky A.E.** Deformation of Earth surface by tilts observation. – Nauka, Moscow, 1978. – 184 p.
- Popov V.V.** About temperature deformation of Earth surface // *Fizika Zemli*. – 1961. – Vol. 7. – P. 3–10.
- Takemoto S., Momose H., Araya A., Morii W., Akamatsu J., Ohashi M., Takamori A., Miyoki S., Uchiyama T., Tatsumi D., Higashi T., Telada S., Fukuda Y.** A 100m laser strainmeter system in the Kamioka Mine, Japan, for precise observations of tidal strains // *Journal of Geodynamics*. – 2006. – Vol. 41. – P. 23–29, doi: 10.1016/j.jog.2005.08.009.
- Timofeev V.Yu., Ducarme B., van Ruymbeke M., Gornov P.Yu., Everaerts M., Gribanova E.I., Parovishnii V.A., Semibalamut V.M., Woppelmann G., Apdyukov D.G.** Transcontinental tidal profile: Atlantic coast of Europe – Southern Siberia – Russian Pacific coast // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2008. – Vol. 44. – P. 388–400, doi: 10.1134/S1069351308050042.
- Timofeev V.Yu., Ardukov D.G., Boiko E.V., Timofeev A.V., Yaroshevich A.V., Gornov P.Yu.** Estimation of co-seismic deformation, poroelasticity, and fracturing of rocks from the data on water level in a borehole // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2012. – Vol. 48. – P. 640–652, doi: 10.1134/S1069351312060067.
- Timofeev V.Yu., Ardukov 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 (4). – P. 380–393, doi: 10.3103/S0747923920040106.

Toda S., Steina R., Lin J., Sevilgen V. Coulomb 3. Graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching / USGS Earthquake Hazards Program – Northern California. – 2003–2009, <http://quake.usgs.gov/research/deformation/modeling/>.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ТИМОФЕЕВ Владимир Юрьевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: космическая геодезия, современные движения и деформация земной коры, приливная и абсолютная гравиметрия, моделирование.

ТИМОФЕЕВ Антон Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: космическая геодезия, современные движения и деформация земной коры, моделирование.

СЕМИБАЛАМУТ Владимир Михайлович – кандидат физико-математических наук, директор филиала, Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. Основные научные интересы: современная деформация земной коры, лазерная деформография.