

УДК 551.24:528.7 (202)

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СМЕЩЕНИЯ И ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ ПОСЛЕ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 ГОДА

Дмитрий Геннадьевич Ардюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Геннадий Петрович Арнаутков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, главный специалист, e-mail: arnautov@iae.nsk.su

Елена Валерьевна Бойко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Евгений Николаевич Калиш

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Егор Олегович Назаров

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер

Дмитрий Алексеевич Носов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-программист, e-mail: danossov@ngs.ru

Игорь Сергеевич Сизиков

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, инженер-конструктор, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Михаил Георгиевич Смирнов

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, ведущий инженер-конструктор, e-mail: smirnov.m.g@iae.nsk.su

Юрий Федорович Стусь

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

Антон Владимирович Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Владимир Юрьевич Тимофеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Высокоточные геодезические и гравиметрические наблюдения являются важной частью мониторинга в сейсмоактивных областях. Измерения методами космической геодезии и абсолютной гравиметрии в Горном Алтае начаты в 2000 г. Здесь 27.09.2003 г. произошло катастрофическое Чуйское (Алтайское) землетрясение магнитудой 7.3 по Рихтеру. Измеренные косейсмические изменения хорошо соответствуют правостороннему сдвигу в 2 м на субвертикальном разрыве. После землетрясения на пунктах, расположенных в западной части Горного Алтая, зарегистрирован подъем на 15–25 мм. Изменения силы тяжести по определениям на специальных пунктах абсолютным гравиметром ГАБЛ, показали падение значений силы тяжести на 5–10 микрогал, что с учетом нормального вертикального градиента (300 микрогал на метр) соответствует геодезическим результатам. Постсейсмический подъем земной поверхности зарегистрирован в период наблюдений с 2004 по 2012 г.

Ключевые слова: космическая геодезия, метод GPS, абсолютная гравиметрия, землетрясения, постсейсмические вертикальные смещения, Горный Алтай.

Исследование кинематических характеристик земной коры – скоростей смещений и деформаций – является важной частью мониторинга современных процессов в зонах сейсмической и техногенной опасности. Считается, что быстрые поднятия (со скоростью более 3 мм/год) происходят в молодых орогенических и высокосейсмических областях. Напротив, в тектонически стабильных областях могут происходить лишь умеренные опускания, со скоростью 1-2 мм/год. Существуют и отдельные исключения, в частности современные поднятия в пределах некоторых впадин. Эта аномалия объясняется современным сжатием или повышенным тепловым потоком. Были осуществлены успешные попытки корреляции теплового потока и скорости современных движений [1]. Другим важным фактором, вызывающим быстрые горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности, являются сильные землетрясения. При этом, необратимые смещения, в зависимости от энергии события, могут достигать десятков метров и охватывать значительные территории. Рассмотрим вертикальные смещения, зарегистрированные после Чуйского (Алтайского) землетрясения (27.09.2003 г., $M = 7,3$) методами космической геодезии и высокоточной абсолютной гравиметрии. Заметим, что физически очевидная связь вертикальных смещений и изменений силы тяжести до последнего времени не находила ясного отражения в экспериментальных результатах, полученных в зонах высокой сейсмичности.

Целью нашей работы являлось изучение поля вертикальных смещений земной поверхности в дальней зоне Чуйского землетрясения в эпоху 2004–2014 гг. на основе экспериментальных данных космической геодезии и гравиметрии.

Горный Алтай – это молодая горная страна, здесь расположена самая высокая вершина Сибири гора Белуха (4 506 м), территория отличается высокой сейсмичностью, где случаются землетрясения с магнитудой до 7,5 по Рихтеру [2, 3].

Современная картина смещений для территории Горного Алтая и Саян определяется несколькими эффектами – тектоническими, связанными в основном с влиянием коллизии Индийской и Евразийской плит, и быстрыми сейсмическими, связанными с сильными землетрясениями региона [4]. Современными геологическими методами для скоростей вертикальных движений в юго-восточной части Горного Алтая получены оценки 0,5 мм/год [5]. В Горном Алтае с 2000 г. развивается геодинимическая сеть для измерения 3D смещений (рис. 1). Она простирается от г. Новосибирска до границы с Монголией и охватывает территорию Горного Алтая и предгорий. Ежегодные измерения проводятся с использованием технологий космической геодезии – метода GPS. Здесь получены оригинальные результаты по исследованию эффектов, связанных с Чуйским (Алтайским) землетрясением ($M = 7.5$; 27.09.2003 г.) [6, 7].

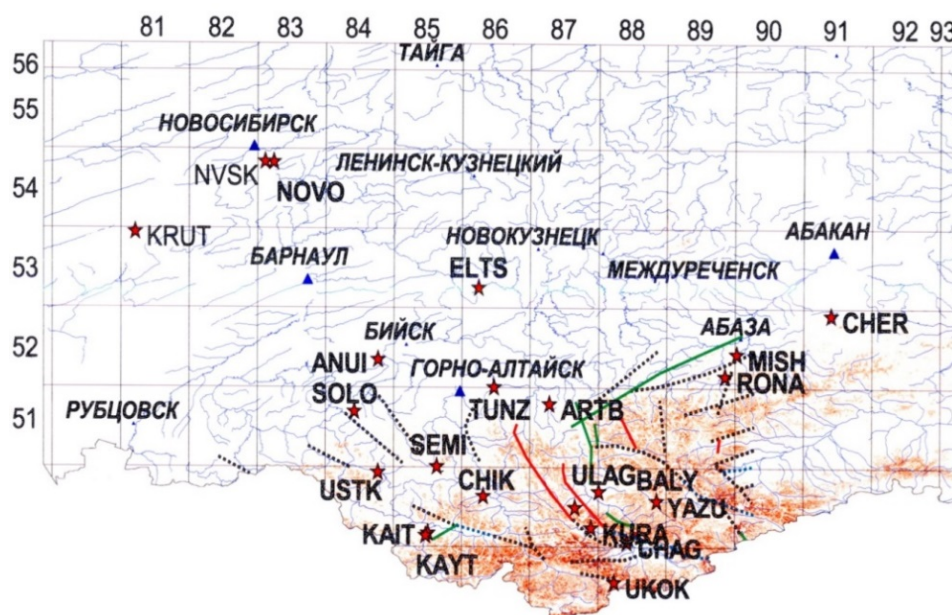


Рис. 1. Алтае-Саянская GPS сеть. Пункты заложены в период 2000–2004 гг. Координаты эпицентра Чуйского землетрясения 27.09.2003: 50,06 °N, 87,96 °E

Точность полученных результатов при использовании комплектов геодезических двухчастотных приемников TRIMBLE 4700, при одновременном многосуточном сетевом опросе и последующей обработке, используя программный пакет GAMIT-GLOBK, может достигать долей миллиметра [6, 7]. Измерения смещений на отдельных пунктах сопровождалось измерениями вариаций поля силы тяжести с помощью абсолютного гравиметра ГАБЛ, разработанного в Институте автоматики и электрометрии СО РАН [8, 9]. Для исключения влияния сезонных вариаций работы проводились ежегодно в июле – первой декаде августа. Иллюстрацией возможной ошибки метода космической геодезии служат оценки, полученные на сибирских обсерваториях. Так, результаты определения скоростей горизонтальных смещений по постоянным GPS станциям Иркутск

(IRKT) и Новосибирск (Ключи, NVSK), за период 2000–2012 гг., в эпохи летних измерений по Алтайской сети, показали значения скоростей для двух отдельных антенн и приемников новосибирской станции: $-0,94 \pm 0,09$ мм/год и $-0,87 \pm 0,05$ мм/год (на юг); $26,00 \pm 0,09$ мм/год и $26,42 \pm 0,06$ мм/год (на восток), для двух приемников иркутской станции $-6,68 \pm 0,04$ мм/год и $-6,37 \pm 0,05$ мм/год (на юг); $25,20 \pm 0,04$ мм/год и $24,89 \pm 0,05$ мм/год (на восток). Расхождение полученных значений скорости на одном пункте составляет от 0,07 мм/год до 0,42 мм/год, что и можно принять за ошибку метода космической геодезии (двухчастотной GPS технологии) для горизонтальных смещений. Ошибка при определении вертикальных скоростей обычно в три раза выше. Измерения смещений на сетевых пунктах выполнялись по технологии жесткой центровки на скальных реперах.

Гравиметрические измерения проводились на старых постаменты сейсмостанций, предназначенных для фотозаписи показаний сейсмографов. Естественно, такие возможности были только на нескольких пунктах (п. Усть-Кан, с. Кайтанак). В последние годы с развитием гравиметрической аппаратуры появилась возможность выполнять измерения на специальных постаментах вне сейсмостанций, например, на Чике-Таманском перевале и на территории сейсмостанции Усть-Кан. Гравиметр ГАБЛ – отечественный аналог американского гравиметра FG5, неоднократно участвовал в сверках гравиметров в международном центре Севр (г. Париж, Франция), при повторных измерениях ошибка составляет 0,5–2,0 микрогал [10]. Зависимые от времени факторы, отражающиеся в изменениях силы тяжести – это эффекты земного прилива и полюса. Приливные поправки в результаты вводятся на основе наших экспериментальных исследований [11–14]. Поправки за движения полюса Земли вводятся с использованием данных международного центра по вращению Земли. Изучение временных вариаций g требует оценки стабильности значения силы тяжести Земли и ее высот. С учетом наличия скорости при линейной связи получаем следующее соотношение:

$$g(r, t) = g'x(t - t_0) = g(r, t_0) = g_e(r, t) = \varepsilon, \quad (1)$$

где g' – скорость изменений; t_0 – начальное время.

Специальные исследования проводились для оценки стабильности глобального значения силы тяжести и радиуса Земли во времени [15–17]. Так, полученные за период 1977–2009 гг. на обсерватории Ключи (г. Новосибирск) вариации на периоде наблюдений не превысили ошибку повторных измерений и стабильность можно оценить, как 0,1 мкгал/год. На современном этапе возможные эффекты глобального изменения силы тяжести и высоты можно ограничить 10^{-10} в год от нормального значения. Сравнимая субмиллиметровая точность измерений вертикальных смещений и силы тяжести позволяет использовать комплекс приборов для оценки изменений высоты пунктов Горного Алтая.

Распределение скоростей горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности на территории Горного Алтая, полученное в результате Чуйского землетрясения (координаты 50° с.ш., 88° в.д., M (по Рихтеру) = 7,3; 27.09.2003 г.) проанализировано в работах [7, 8]. Для косейсмических смещений, полученных для эпохи 2003–2004 гг. в эпицентральной зоне (до 100 км от эпицентра), можно отметить преобладание горизонтальных смещений над вертикальными, что отражает механизм землетрясения – правосторонний сдвиг на субвертикальном сейсмическом разрыве, выходящем на земную поверхность, протяженностью до 100 км с ЮВ на СЗ вдоль юго-западного борта Курайско-Чуйской впадины.

Горизонтальное правостороннее смещение на сейсмическом разрыве с выходом на земную поверхность составило около 2 м. Для пункта Курай, расположенного в 15 км от эпицентра, и пункта Чаган-Узун, расположенного в 35 км от эпицентра, смещения показаны на рис. 2.

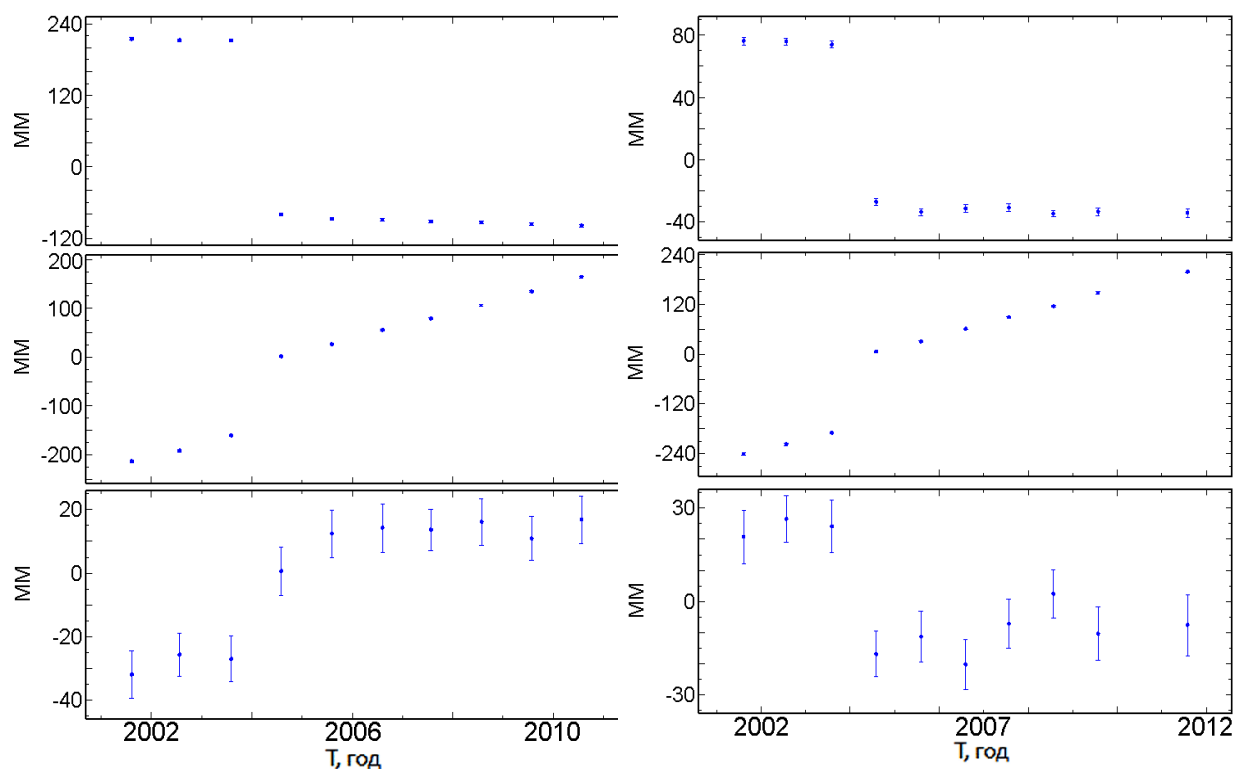


Рис. 2. Изменение положения пунктов KURA (Курай, слева) и CHAG (Чаган-Узун, справа), расположенных в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения (27.09.2003), сверху вниз: С-Ю, В-З и вертикальное смещение (+ вверх) в мм. Горизонтальное смещение на юго-восток, вертикальное: поднятие и опускание

Как и отмечалось выше, горизонтальные смещения (330 мм) здесь на порядок превышают вертикальные (40 мм). Для вертикальных смещений симмет-

рично относительно нодальных плоскостей получена четырехлепестковая картина (см. рис. 2) вертикальных смещений (чередование опусканий и поднятий). Полученная картина смещений хорошо описывается в рамках модели упругой отдачи для однородного изотропного упругого полупространства и соответствует сейсмологическим данным.

На расстояниях более 100 км от эпицентра картина вертикальных смещений меняется, здесь зарегистрировано вертикальное поднятие земной поверхности величиной около 20 мм (рис. 3, 4).

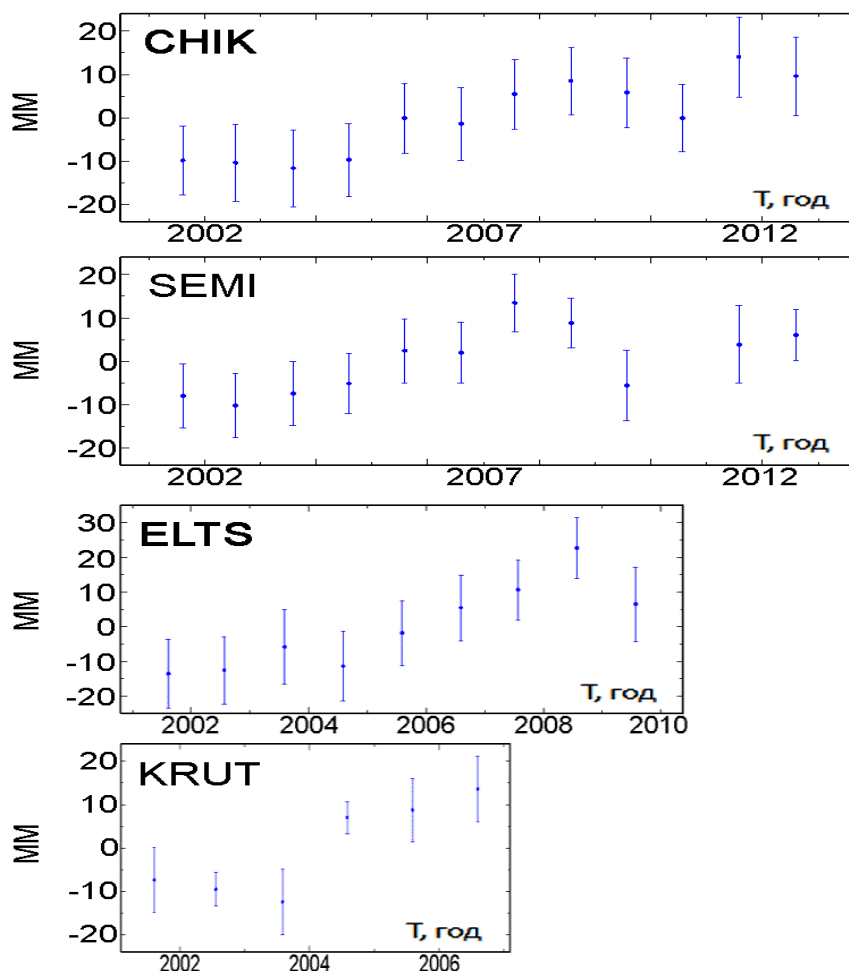


Рис. 3. Изменение высоты пунктов в дальней зоне Чуйского землетрясения (27.09.2003), сверху вниз – пункт CHIK (Чике-Таманский перевал, расположен в 135 км от эпицентра), пункт SEMI (Семинский перевал), пункт ELTS (с. Ельцовка, Салаир) и пункт KRUT (с. Крутиха, около г. Камень-на-Оби). Графики построены по ежегодным измерениям, начиная с 2001 г. по 2006–2012 гг., вертикальное смещение (+ вверх) в мм

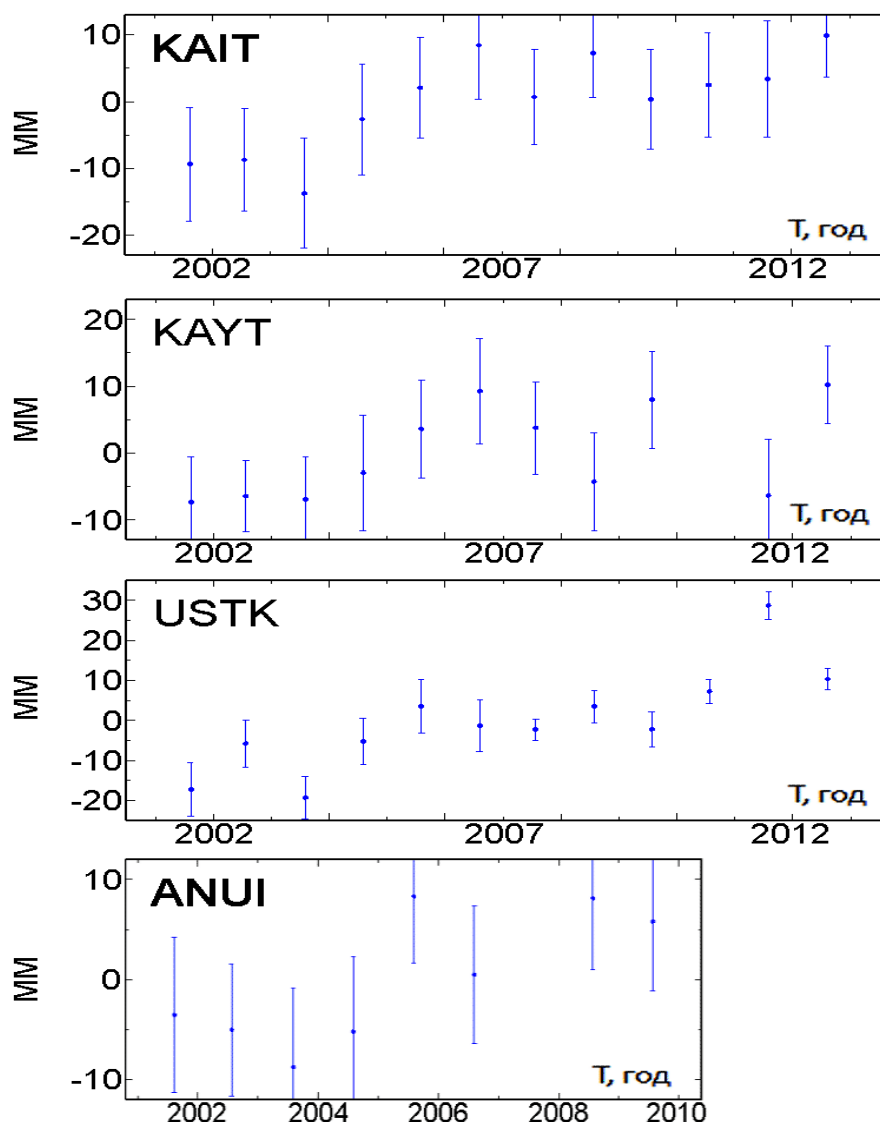


Рис. 4. Изменение положения пунктов КАИТ (с. Кайтанак, скальный), КАУТ (с. Кайтанак, база, постамент), USTK (п. Усть-Кан) и пункт ANUI (гранитный батолит, вблизи впадения р. Ануй в р. Обь), расположенных в дальней зоне Чуйского землетрясения (27.09.2003). Графики построены по ежегодным измерениям, начиная с 2001 г. по 2009–2012 гг., вертикальное смещение (+ вверх) в мм

Измерения силы тяжести с помощью абсолютного гравиметра ГАБЛ проводились одновременно с измерениями смещений. В эпоху после Чуйского землетрясения зарегистрировано постепенное опускание пунктов (рис. 5). Связь вариаций g и высоты Z без учета деформации среды можно описать следующим уравнением (2):

$$\Delta g(t) = \gamma \Delta Z(t) + \varepsilon, \quad (2)$$

где γ – вертикальный градиент g ; $\Delta Z(t)$ – изменение высоты пункта.

В результатах измерений поднятие пунктов сопровождается уменьшением значения силы тяжести, что в целом соответствует приведенному выше соотношению. Величина изменений составила 5–10 микрогал, что при нормальном вертикальном градиенте соответствует 15–30 мм. Полученные значения вертикальных смещений при средней величине в 20 мм имеют разброс значений, соответствующий гравиметрическим оценкам. Запаздывание эффектов в значении силы тяжести во времени может быть связано с асейсмическим скольжением в плоскости сейсмического разрыва с учетом нижней коры [18], эффектом нарушения равновесия порового давления [19] и уровня грунтовых вод после Чуйского землетрясения 2003 г. и влиянием вязкой релаксации в нижней коре региона [20, 21].

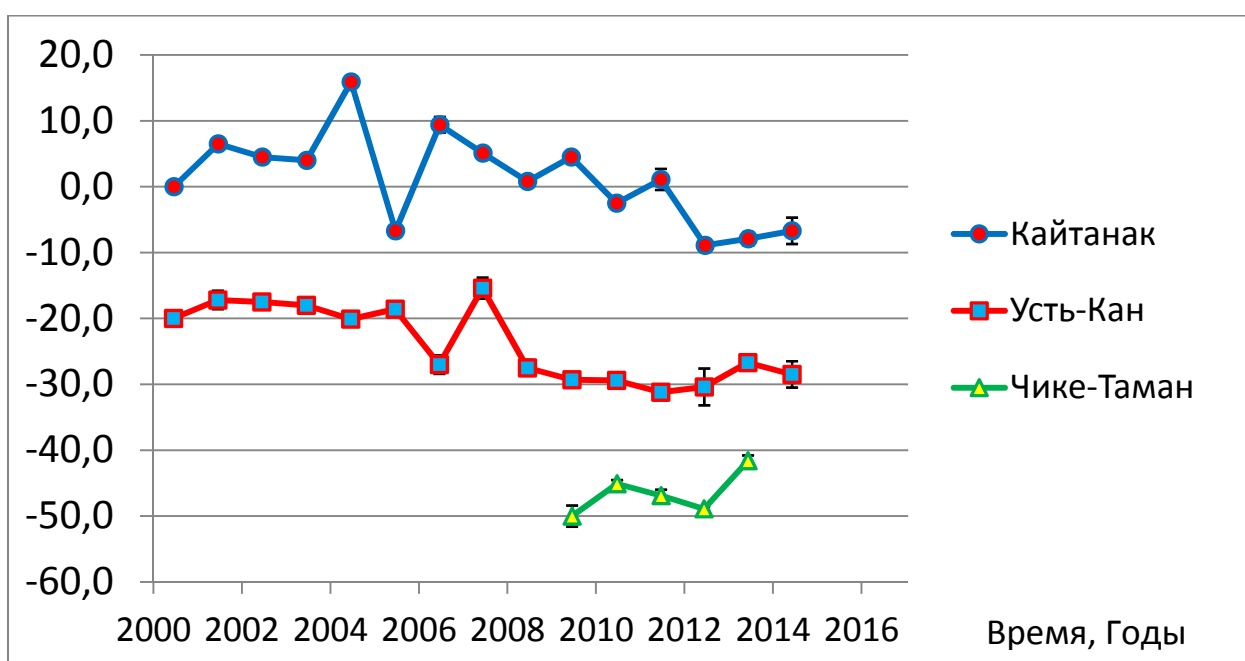


Рис. 5. Изменение значения силы тяжести в микрогалах с 2000 по 2014 г. на пунктах Кайтанак (КАУТ), Усть-Кан (УСТК), перевал Чике-Таман (СНІК)

Выводы

По экспериментальным данным, полученным методами космической геодезии и гравиметрии с 2001 по 2014 г., проведены оценки постсейсмического подъема земной поверхности Горного Алтая. В отличие от геологических оценок скорости подъема (0,5 мм в год), смещение поверхности после землетрясения в дальней зоне зарегистрировано на уровне 20 мм. Согласно многолетним гравиметрическим измерениям, выполненным с помощью абсолютных гравиметров ГАБЛ, зарегистрировано уменьшение силы тяжести на 5–10 микрогал, что соответствует геодезическому результату в соответствии с нормальным вертикальным градиентом силы тяжести.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vyskocil P. Global recent crustal movements as determined by geodetic measurements // *Tectonophysics*. – 1977. – Vol. 38. – P. 49–59.
2. Goldin S. V., Timofeev V. Yu., Ardyukov D. G. Fields of the Earth's Surface Displacement in the Chuya Earthquake Zone in Gornyi Altai // *Doklady Earth Sciences*, 2005/ – Vol. 405A, No. 9. – P. 1408–1413.
3. Goldin S. V., Kuchai O. A. Seismic strain in the Altai-Sayan active seismic area and elements of collisional geodynamics // *Russian Geology and Geophysics*. – 2007. – Vol. 48., No. 7. – P. 692–723.
4. Continental Deformation in Asia from a Combined GPS Solution / E. Calais, L. Dong, M. Wang, Z. Shen, M. Vergnolle // *Geophysical Research Letters*,. – 2007, 11 Dec. – x-14, doi: 10.1029/2006 GL028433.
5. Cenozoic relief of Gornyi Altai and its reflect in geoelectric field and gravity field / N. L. Dobretsov, M. M. Buslov, A. N. Vasilevskii, E. V. Vetrov, N. N. Nevedrova // *Russian Geology and Geophysics*. – 2016. – No. 11. – P. 937–1948.
6. Displacements Fields and Models of Current Motion in Gornyi Altai / V. Yu. Timofeev, D. G. Ardyukov, E. Calais, A. D. Duchkov, E. A. Zapreeva, S. A. Kazantsev, C. Bruyninx // *Russian Geology and Geophysics*. – 2006. – Vol. 47., No. 8. – P. 915–929.
7. Timofeev V. Yu. Generalization of the Results of Long Term Strainmeter and GPS Observations for Intraplate Regions // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50, No. 6. – P. 752–769.
8. Laser ballistic gravimeter GABL-M and gravity observation results / G. P. Arnautov, E. N. Kalish, M. G. Smirnov, Yu. F. Stus', V. G. Tarasyuk // *Avtometriya*. – 1994. – Vol. 3. – P. 3–11.
9. Arnautov G. P. Results of international metrological comparison of absolute laser ballistic gravimeters // *Avtometriya*. – 2005. – Vol. 41, No. 1. – P. 126–136.
10. Results from the fifth international comparison of absolute gravimeters, ICAG'97 / L. Robertson, O. Francis, T. M. van Dam, J. Faller, D. Ruess, J. M. Delintem, I. Marson // *Metrologia*. – 2001.– Vol. 38, No. 1. – P. 71–78. <http://dx.doi.org/10.1088/00261394/38/1/6>.
11. Tidal gravity observations in Eastern Siberia and along the Atlantic coast of France / V. Y. Timofeev, M. van Ruymbeke, G. Woppelmann, M. Everaerts, E. A. Zapreeva, P. Y. Gornov, B. Ducarme // *Proc. 15th Int. Symp. On Earth Tides. Journal of Geodynamics*. – 2006. – Vol. 41. – P. 3038.
12. Приливные эффекты по гравиметрическим и уровнемерным наблюдениям, океанические приливные модели / В. Ю. Тимофеев, М. Г. Валитов, Б. Дюкарм, Д. Г. Ардюков, С. Б. Наумов, А. В. Тимофеев, Р. Г. Кулинич, Т. Н. Колпащикова, З. Н. Прошкина, И. С. Сизиков, Д. А. Носов // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 36–47.
13. Приливные эффекты по гравиметрическим данным, модели и эффект жидкого ядра Земли / В. Ю. Тимофеев, М. Г. Валитов, Б. Дюкарм, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев, Р. Г. Кулинич, Т. Н. Колпащикова, З. Н. Прошкина, И. С. Сизиков, Д. А. Носов, С. Б. Наумов // *Вестник СГУГиТ*. – 2016. – Вып. 2(34). – С. 34–46.
14. A TransSiberian Tidal gravity profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections / B. Ducarme, V. Yu. Timofeev, M. Everaerts, P.Y. Gornov, V.A. Parovishnii, M. van Ruymbeke // *Journal of Geodynamics*. – 2008. – Vol. 45, No. 2–3. – P. 3–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2007.07.001>.
15. О стабильности значения силы тяжести Земли / В. Ю. Тимофеев, Е. Н. Калиш, Ю. Ф. Стусь, М. Г. Смирнов, Г. П. Арнаутов, Д. Г. Ардюков, Е. В. Бойко, А. В. Тимофеев. // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012. VIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки полезных ископаемых» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.)*. – Новосибирск : СГГА, 2012. Т. 1. – С. 99–103

16. Кафтан В. И., Цыба Е. Н. Оценка изменений полуосей земного геометрического эллипсоида по результатам спутниковых наблюдений в глобальной геодезической сети // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 1. – С. 33–40.
17. Коломиец А. Г., Герасименко М. Д., Ильницкая А. В. Определение возможного изменения радиуса Земли по данным глобальных космических геодезических сетей // Научная конференция «Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири»: сб. материалов. – Хабаровск : ИТиГ ДВО РАН, 2010. – С. 87–88.
18. Brown L. D. Postseismic crustal uplift near Anchorage, Alaska // J. Geophys. Res. – 1977. – Vol. 82. – P. 3369–3378.
19. Poroelastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture / G. Peltzer, P. Rosen, F. Roges, K. Hudnut // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103, No. B12. – P. 30131–30145.
20. Pollitz F. F., Peltzer G., Burgmann R. Mobility of continental mantle: Evidence from postseismic geodetic observations following the 1992 Landers earthquake // J. Geophys. Res. – 2000. – Vol. 105. – P. 8035–8054.
21. Deng J. Viscoelastic flow in the lower crust after the 1992 Landers, California, earthquake // Science. – 1998. – Vol. 33. – P. 1689–1692.

Получено 27.12.2016

© Д. Г. Ардюков, Г. П. Арнаутков, Е. В. Бойко, Е. Н. Калиш,
Е. О. Назаров, Д. А. Носов, И. С. Сизиков, М. Г. Смирнов,
Ю. Ф. Стусь, А. В. Тимофеев, В. Ю. Тимофеев, 2017

VERTICAL DISPLACEMENT AND GRAVITY CHANGE AFTER CHUYA EARTHQUAKE AT WEST PART OF GORNY ALTAY

Dmitriy G. Ardyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Senior Researcher, tel. (383)335-64-42, e-mail: ardyukovdg@ipgg.sbras.ru

Gennadii P. Arnautov

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Professorial Research Fellow, e-mail: arnautov@iae.nsk.su

Elena V. Boyko

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Researcher, tel. (383)335-64-42, e-mail: boykoev@ipgg.sbras.ru

Eugenii N. Kalish

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademika Koptyuga Prsp., Ph. D., Senior Researcher, e-mail: kalish@iae.nsk.su

Egor O. Nazarov

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Akademika Koptyuga Prsp., Engineer

Dmitrii A. Nosov

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Prsp., 1, Engineer, e-mail: danossov@ngs.ru

Igor S. Sizikov

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Prsp., 1, Engineer, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Michail G. Smirnov

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Prsp., 1, Professorial Engineer, e-mail: smirnov.m.g@iae.nsk.su

Yurii F. Stus

Institute of Automatic and Electrometry of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Prsp., 1, Ph. D., Senior Researcher, e-mail: yfstus@academ.org

Anton V. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Prsp., 3, Researcher, tel. (383)335-64-42, e-mail: timofeevav@ipgg.sbras.ru

Vladimir Yu. Timofeev

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, 630090, Russia, Novosibirsk, Akademika Koptyuga Prsp., 3, D. Sc., Leading researcher, tel. (383)335-64-42, e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Precise geodesy measurement and gravity observation are important for monitoring study at seismic-activity region. Space geodesy observation started at Gorny Altay from 2000 year. There strong earthquake with 7,3 magnitude was happened at 27.09.2003. Coseismic horizontal right-side shift (2m) was presented at sub-vertical crack. Post-seismic uplift motion (15-25 mm) was registered at west part of Gorny Altay. Gravity observation by GABL gravimeter presented the decrease at 5-10 microgal. These values agree with geodesy results if we have normal vertical gradient (300 $\mu\text{Gal/m}$). Post-seismic uplift displacement observed at 2004-2012 period.

Key words: space geodesy, GPS method, absolute gravimetry, earthquake, post-seismic vertical motion, Gorny Altay.

REFERENCES

1. Vyskocil, P. (1977). Global recent crustal movements as determined by geodetic measurements. *Tectonophysics*, 38, 49–59.
2. Goldin, S. V., Timofeev, V. Yu., & Ardyukov, D. G. (2005). Fields of the Earth's Surface Displacement in the Chuya Earthquake Zone in Gornyi Altai. *Doklady Earth Sciences*, 405A(9), 1408–1413.
3. Goldin, S. V., & Kuchai, O. A. (2007). Seismic strain in the Altai-Sayan active seismic area and elements of collisional geodynamics. *Russian Geology and Geophysics*, 48(7), 692-723.
4. Calais, E., Dong, L., Wang, M., Shen, Z., & Vergnolle, M. (2007, 11 Dec.). Continental Deformation in Asia from a Combined GPS Solution. *Geophysical Research Letters*, x-14. doi: 10.1029/2006 GL028433.
5. Dobretsov, N. L., Buslov, M. M., Vasilevskii, A. N., Vetrov, E. V., & Nevedrova, N. N. (2016). Cenozoic relief of Gorny Altai and it's reflect in geoelectric field and gravity field. *Russian Geology and Geophysics*, 11, 1937–1948.
6. Timofeev, V. Yu., Ardyukov, D. G., Calais, E., Duchkov, A. D., Zapreeva, E. A., Kazantsev, S. A., & Bruyninx, C. (2006). Displacements Fields and Models of Current Motion in Gorny Altai. *Russian Geology and Geophysics*, 47(8), 915–929.

7. Timofeev, V. Yu. (2014). Generalization of the Results of Long Term Strainmeter and GPS Observations for Intraplate Regions. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 50(6), 752–769.
8. Arnautov, G. P., Kalish, E. N., Smirnov, M. G., Stus', Yu. F., & Tarasyuk, V. G. (1994). Laser ballistic gravimeter GABL-M and gravity observation results. *Avtometriya*, 3, 3–11.
9. Arnautov, G. P. (2005). Results of international metrological comparison of absolute laser ballistic gravimeters. *Avtometriya*, 41(1), 126–136.
10. Robertson, L., Francis, O., van Dam, T. M., Faller, J., Ruess, D., Delinte, J. M., & Marson, I. (2001). Results from the fifth international comparison of absolute gravimeters, ICAG'97. *Metrologia*, 38(1), 71–78. <http://dx.doi.org/10.1088/00261394/38/1/6>.
11. Timofeev, V. Y., van Ruymbeke, M., Woppelmann, G., Everaerts M., Zapreeva, E. A., Gornov, P. Y., & Ducarme, B. (2006). Tidal gravity observations in Eastern Siberia and along the Atlantic coast of France. *Proc. 15th Int. Symp. On Earth Tides. Journal of Geodynamics*, 41, 30–38.
12. Timofeev, V., Valitov, M., Ducarme, B., Ardyukov, D., Naymov, S., Timofeev, A., Kulinich, R., Kolpashikova, T., Proshkina, Z., Sizikov, I., & Nosov, D. (2016). Tidal effects by gravity and sea level observation, ocean tidal models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 36–47 [in Russian].
13. Timofeev, V., Valitov, M., Ducarme, B., Ardyukov, D., Timofeev, A., Kulinich, R., Kolpashikova, T., Proshkina, Z., Sizikov, I., Nosov, D., & Naymov, S. (2016). Tidal effects by gravity observation, models and liquid core effect. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 2(34), 34–46 [in Russian].
14. Ducarme, B., Timofeev, V. Yu., Everaerts, M., Gornov, P. Y., Parovishnii, V. A., & van Ruymbeke, M. (2008). A TransSiberian Tidal gravity profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections. *Journal of Geodynamics*, 45(2–3), 3–82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2007.07.001>.
15. Timofeev, V., Kalish, E., Stus, Y., Smirnov, G., Arnautov, G., Ardyukov, D., Boyko, E. V., & Timofeev, A. (2012). Gravity Stability for Earth. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2012: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Nedropol'zovaniia [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2012: International Scientific Conference: Vol. 1. Subsoil Use]* (pp. 99–103). Novosibirsk: SSUGT [in Russian].
16. Kaftan, V. I., & Tsyba, E. N. (2009) Estimation of semi-axes earth geometrical ellipsoid changes by space observation into global geodesy net. *Iztestia Vuzov. Geodesia i aerofotosiemka [Iztestia Vuzov. Geodesy and Aerophotography]*, 1, 33–40.
17. Kolomiits, A. G., Gerasimenko, M. D., & Ilnitskaia, A. V. (2010). Observation of Earth Radius changes by global space geodesy nets. In *Sbornik materialov mauchnoy konferentsiy: Problemy seismichnosti i sovremennoy geodinamiki Dalnego Vostoka i Vostochnoi Sibiri [Proceedings of Scientific Conference: Problems of Seismicity and Modern Geodynamic of FAR EAST and Eastern Siberia]* (pp. 87–88). Khabarovsk: ITiG FEB RAS [in Russian].
18. Brown, L. D. (1977). Postseismic crustal uplift near Anchorage, Alaska. *J. Geophys. Res.*, 82, 3369–3378.
19. Peltzer, G., Rosen, P., Roges, F., & Hudnut K. (1998). Poroelastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture. *J. Geophys. Res.*, 103(B12), 30131–30145.
20. Pollitz, F. F., Peltzer, G., & Burgmann, R. (2000). Mobility of continental mantle: Evidence from postseismic geodetic observations following the 1992 Landers earthquake. *J. Geophys. Res.*, 105, 8035–8054.
21. Deng, J. (1998). Viscoelastic flow in the lower crust after the 1992 Landers, California, earthquake. *Science*, 33, 1689–1692.

Received 27.12.2016

© D. G. Ardyukov, G. P. Arnautov E. V. Boyko, E. N. Kalish,
E. O. Nazarov, D. A. Nosov, I. S. Sizikov, M. G. Smirnov,
Yu. F. Stus, A. V. Timofeev, V. Yu. Timofeev, 2017