УДК 550.312

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛЬСКОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ПО ДАННЫМ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ И GPS НАБЛЮДЕНИЙ*

Геннадий Петрович Арнаутов
Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 1, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист, тел. (383)330-79-31, e-mail: arnautov@iae.nsk.su

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

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

Исследованы результаты измерений неприливных вариаций ускорения силы тяжести Δg, проведенных в 1992–2014 гг. на сейсмостанции «Талая» в Слюдянском районе Иркутской области и в г. Иркутске, а также данные GPS-наблюдений вертикальных движений земной поверхности Δh в районе этих пунктов. Показано, что на изменения Δg преимущественное влияние оказывало изменение плотности земной коры, а на изменение Δh – горизонтальное сжатие-растяжение литосферы на границе Байкальской рифтовой системы и Сибирской платформы.

Ключевые слова: абсолютный лазерный баллистический гравиметр, мониторинг вариаций ускорений силы тяжести, рифтовая зона, GPS-наблюдения, вертикальные движения земной поверхности.

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта программы Президиума РАН № 4.1.

EVALUATION OF THE EFFECTS DEFORMATION PROCESSES IN GEOLOGICAL ENVIRONMENT IN SOUTHWESTERN BAIKAL GEODYNAMIC POLYGON ACCORDING TO GAVIMETRIC AND GPS MEASUREMENTS

Gennadii P. Arnautov
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, Ph. D., tel. (383)330-79-31, e-mail: arnautov@iae.nsk.su

Eugenii N. Kalish
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, Ph. D., e-mail: kalish@iae.nsk.su

Dmitrii A. Nosov
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, e-mail: danossov@ngs.ru

Igor S. Sizikov
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, e-mail: sizikov.i.s@gmail.com

Mikhail G. Smirnov
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, e-mail: smirnov.m.g@iae.nsk.su

Yurii F. Stus
Institute of Automation and Electrometry SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 1 Koptyug Prospekt, Ph. D., e-mail: stus@iae.nsk.su

Studied the results of measurements of variations of non-tidal gravity acceleration Δg, conducted in 1992-2014 years on seismic station "Talaya" in Slyudyanka district of Irkutsk region and on city Irkutsk, as well as GPS-data observations of vertical movements of the earth's surface Δh in the area of these points. It shown that Δg variations mainly due to the change of density of the crust and Δh variations – horizontal compression-stretching of the lithosphere at the boundary of Baikal rift system and the Siberian platform.

Key words: absolute laser ballistic gravimeter, monitoring variations of acceleration due to gravity, the rift zone, GPS-observations, the vertical movement of the earth surface.

В сейсмоактивной Байкальской рифтовой зоне (БРЗ) начиная с 1992 г. проводятся регулярные измерения неприливных вариаций ускорения силы тяжести Δg (гравиметрический пункт находится на сейсмостанции «Талая» в Слюдянском районе Иркутской области). Для таких измерений используются прецизионные лазерные баллистические гравиметры, разработанные в Институте автоматики и электрометрии СО РАН [1, 2]. По точности измерений эти гравиметры находятся на уровне лучших мировых образцов: среднеквадратическая погрешность измерений Δg не превосходит 1÷2 мкГал (1 мкГал = $1 \cdot 10^{-8}$ м/с^2), что подтверждено официальными международными метрологическими сравнениями лучших гравиметров мира [3].

Практически одновременно (с отставанием не более трех суток) этими же гравиметрами проводятся контрольные измерения в платформенной области (в г. Новосибирск и в г. Иркутск). Результаты этих гравиметрических наблюдений представлены на рис. 1. В этих результатах учтено приливное воздействие Луны и Солнца, а также, согласно рекомендациям Международной гравиметрической комиссии [4], влияние смещения полюса Земли и притяжения изменяющихся атмосферных масс. За нулевое значение Δg принят результат первого измерения g.

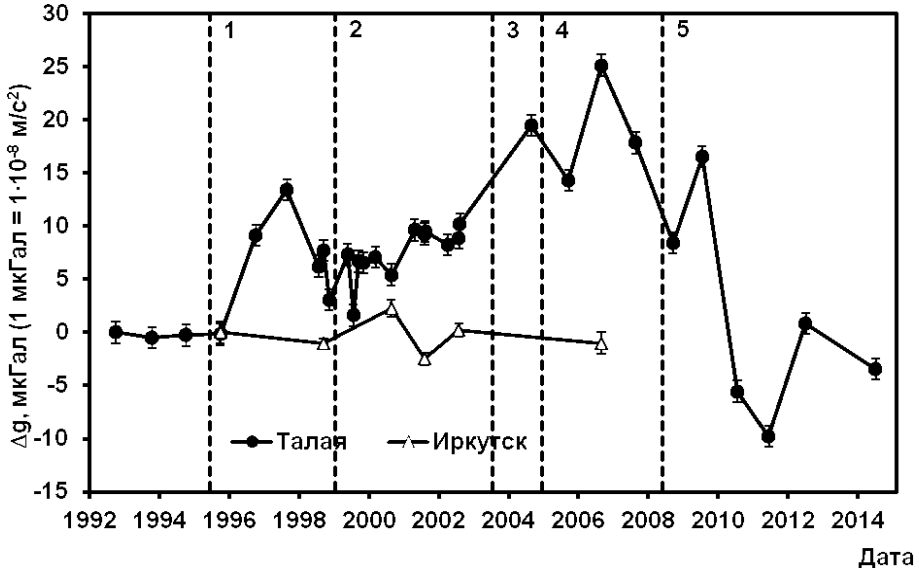

Рис. 1. Вариации ускорения силы тяжести: на сейсмостанции «Талая» и в Иркутске (здесь вертикальными штрихами указаны моменты сильных землетрясений: 29.06.1995 (M=5,5; L=50 км); 25.02.1999 (M=5,9; L=90 км); 17.09.2003 (M=5,3; L=155 км); 23.02.2005 (M=5,3; L=160 км); 27.08.2008 (M=6,3; L=30 км); L – удаление эпицентра от пункта «Талая»)

На основании результатов контрольных гравиметрических наблюдений в г. Иркутск и аналогичных измерений в Новосибирской области можно заключить, что наблюдаемые на пункте «Талая» вариации Δg являются региональными и связаны с сейсмическими процессами в БРЗ. При этом основными причинами изменений Δg могут быть две: изменения плотности $\Delta\rho$ земной коры в районе наблюдений и вариации высоты Δh пункта наблюдений.

При сжатии участка земной коры (ЗК) увеличивается его плотность $\Delta\rho$ и, следовательно, увеличивается значение Δg в этом районе. Одновременно с этим при упругом горизонтальном сжатии этого участка происходит поднятие его поверхности Δh и, следовательно, уменьшение значения Δg. При растяжении этого участка изменяются знаки значений Δh, $\Delta\rho$, и Δg.

Результаты GPS наблюдений подтверждают этот вывод (рис. 2). На этом рисунке приведены вариации вертикальных движений поверхности Земли на

двух близлежащих к гравиметрическому пункту «Талая» точках GPS наблюдений [5]: пункт «Слюдянка» удален от пункта «Талая» на 5,3 км, а пункт «Култук» – на 11,7 км. Здесь же показаны результаты GPS мониторинга вертикальных движений пункта «Иркутск». Результаты GPS-измерений на пункте «Талая» отражают только данные наблюдений последних лет [6] и отличаются от данных, приведённых на рис. 2 не более, чем на погрешность измерений.

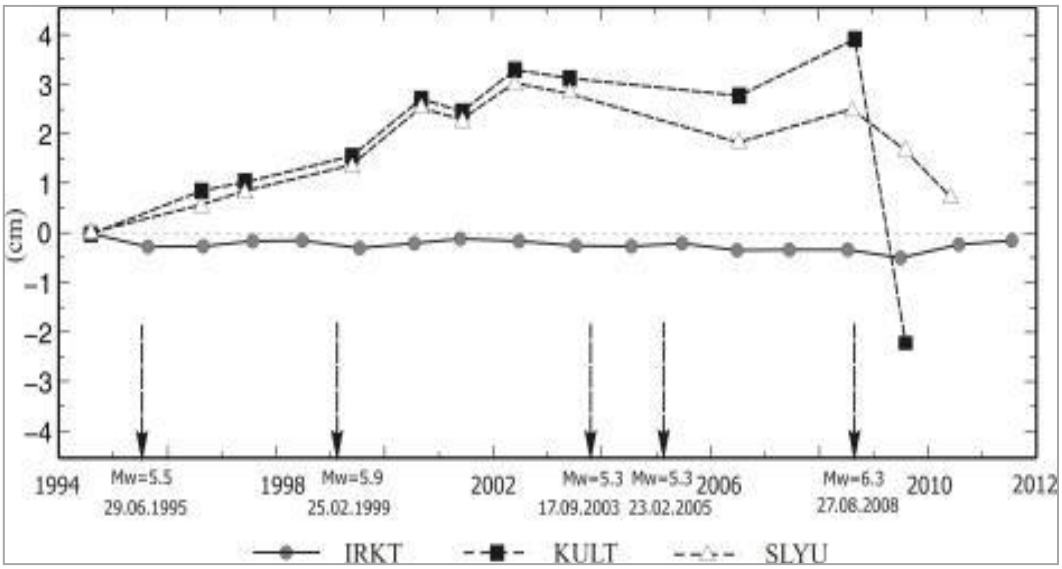

Рис. 2. Временные серии абсолютных вертикальных движений пунктов за период с 1994 по 2011 гг., расположенных на стабильной Сибирской платформе (IRKT, г. Иркутск) и вблизи эпицентра Култукского землетрясения (27.08.2008г., Mw=6.3) (KULT, п. Култук и SLYU, г. Слюдянка)

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что изменения Δg и Δh до Култукского землетрясения 2008 г. имеют положительный тренд со средней скоростью Δg = 2 мкГал/год и Δh = (1,4 ÷ 3) мм/год на пунктах «Слюдянка» и «Култук»

соответственно. Однако из физических соображений зависимость изменений Δg и Δh должна иметь противоположный знак. Устранить это противоречие можно, учитывая последствия деформационных процессов на данном участке литосферы, изложенные ниже.

Поднятие Δh уровня земной поверхности в среднем до 2008 г., как видно из рис. 2, могло происходить из-за горизонтального упругого сжатия литосферы в этом районе [5]:

$$\Delta h = \nu \cdot d \cdot \xi \qquad (1)$$

Здесь ν – коэффициент Пуассона, d – глубина деформированного слоя Земли, ξ – изменение объемной деформации.

По результатам деформационных измерений, проведенных В. Ю. Тимофеевым (ИНГГ СО РАН) [6] средняя скорость изменений ξ на поверхности Земли

в районе пункта «Талая» была равна $\xi = 2\cdot10^{-6}$/год. При этом глубина очагов землетрясений в исследуемом районе располагалась в средней части земной коры (10–20 км) а мощность земной коры составляет 35–40 км. Для оценки минимального влияния сжатия ЗК примем d = 10 км. Примем также типичное для литосферы значение ν = 0,25 и по формуле (1) определим Δh = ($0{,}25\cdot10^6$ см) $\cdot 2\cdot10^{-6}$/год = 0,5 см/год.

Учитывая приближенный характер проведенной оценки, можно считать, что этот результат удовлетворительно (в пределах погрешностей приближенной оценки и результатов измерений) совпадает с данными (1,4 ÷ 3) мм/год, приведенными на рис. 2.

Поднятие уровня земной поверхности на высоту Δh приводит в соответствии с классической формулой гравиметрии к уменьшению значения силы тяжести, измеренного установленным на этой поверхности гравиметром на величину $\Delta g_h = -\gamma\cdot\Delta h$.

Здесь γ – значение вертикального градиента силы тяжести в свободном воздухе. По результатам измерений, произведенным В.Ю. Тимофеевым (ИНГГ СО РАН) относительным гравиметром Лакоста-Ромберга (LCRG-402) значение γ = 1,8 мкГал/см [6]. Следовательно, Δg_h = -1,8·0,5 мкГал/год = - 0,9 мкГал/год.

Второй причиной изменений Δg является изменение ρ плотности участка земной коры $\Delta\rho$ из-за его деформации ξ: $\Delta\rho = \rho\cdot\xi$.

Из приближенной формулы притяжения плоскопараллельного слоя [7,8] можно определить изменение Δg_ρ от изменения плотности деформированного участка литосферы и изменения его глубины:

$$\Delta g_\rho = 2\pi\cdot G\cdot\Delta\rho\cdot(d+\Delta h) + 2\pi\cdot G\cdot(\rho+\Delta\rho)\cdot\Delta h \approx 2\pi\cdot G\cdot\Delta\rho\cdot d + 2\pi\cdot G\cdot\rho\cdot\Delta h \qquad (2)$$

Здесь $G = 6{,}67\cdot10^{-8}$ см^3/гс^2 – гравитационная постоянная. Примем также типичное для литосферы значение $\rho = 2{,}67\cdot10^{-8}$ г/см^3 и упоминавшиеся выше значения d = 10 км, $\xi = 2\cdot10^{-6}$/год и Δh = 0,5 см/год. Тогда из (2) получим значение Δg_ρ = 3 мкГал/год. Суммарное изменение ускорения силы тяжести из-за деформационных процессов в литосфере в районе пункта «Талая» будет равно

$$\Delta g = \Delta g_\rho + \Delta g_h = (3 - 0{,}9) \text{ мкГл/год} \approx 2 \text{ мкГал/год}$$

Этот оценочный результат удовлетворительно совпадает со средним значением тренда, измеренным лазерным гравиметром в период 1995 – 2007 гг. и также равным 2 мкал/год. Из этого результата также следует преимущественное влияние на изменение Δg изменений плотности деформируемой геологической среды. Особенно значимо это влияние проявилось после землетрясения 2008 г.: произошла резкая разрядка напряжения в геологической среде, сопровождающаяся разрушением этой среды и резким уменьшением в период 2009–2010 гг. значения силы тяжести со скоростью около 17 мкГал/год.

Таким образом, оценка причин зарегистрированных изменений Δg показывает преимущественное влияние на них изменений плотности земной коры при её деформации, а изменение Δh обусловлено сменой знака этой деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Смирнов М.Г. и др. Лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-М и результаты наблюдений силы тяжести // Автометрия. -1994. - № 3. - С 3–11.

2. Бунин И.А., Калиш Е.Н., Носов Д.А. и др. Полевой абсолютный лазерный баллистический гравиметр //Автометрия. - 2010. - Т. 46, № 5. - С. 94–102.

3. Арнаутов Г.П. Результаты международных метрологических сравнений абсолютных лазерных баллистических гравиметров // Автометрия. - 2005. - Т. 41, № 1. - С. 126–136.

4. Resolutions international gravity commission. International absolute gravity base station network // Bull. Inform. BGI. Toulouse, France. - 1984. - N 58.

5. Арнаутов Г.П., Калиш Е.Н., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Носов Д.А., Саньков В.А., Сизиков И.С., Смирнов М.Г., Стусь Ю.Ф. Мониторинг вертикальных движений земной поверхности на пунктах Байкальского геодинамического полигона по данным гравиметрических и GPS наблюдений // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2013 (24-26 апреля 2013 г.), т. 3. Недропользование, горное дело, новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых, геоэкология: сб. материалов IX Международного научного конгресса и выставки. - Новосибирск: СГГА, 2013. - С. 203–208.

6. Тимофеев В.Ю., Калиш Е.Н., Стусь Ю.Ф., Ардюков Д.Г., Арнаутов Г.П., Смирнов М.Г., Тимофеев А.В., Носов Д.А., Сизиков И.С., Бойко Е.В., Грибанова Е.И. Вариации силы тяжести и современная геодинамика юго-западной части Байкальского региона // Геодинамика и тектонофизика (GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS), ISSN 2078-502X; 2013, vol. 4, issue 2. – P. 119–134, dx.doi.org/10.5800/GT-2013-4-2-0094.

7. Sasagawa G. and Zumberge M. Absolute gravity measurements in California, 1984-1989 // Journal of Geophysical Research. - 1991. - V. 96, N 82. - P. 2501–2513.

8. Цубои Т. Гравитационное поле Земли. - М.: Мир, 1982. – 286 с.

© Г. П. Арнаутов, Е. Н. Калиш, Д. А. Носов, И. С. Сизиков,
М. Г. Смирнов, Ю. Ф. Стусь, 2015