

УДК 528.27

DOI: 10.23671/VNC.2013.2.55543

МОНИТОРИНГ ПРИРАЩЕНИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НА ОПОРНЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ПУНКТАХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА ВЫСОКОТОЧНЫМИ ОТНОСИТЕЛЬНЫМИ ГРАВИМЕТРАМИ

© 2013 В.К. Милюков¹, д.ф.-м.н., В.Д. Юшкин¹, А.П. Миронов¹,
В.Б. Заалишвили², д.ф.-м.н., профессор, А.С. Кануков², асп.,
Б.В. Дзеранов², к.г.-м.н.

¹ Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга,
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Россия,
119991, Москва, Университетский проспект, д. 13,

e-mail: milyukov@sai.msu.ru;

² Центр геофизических исследований Владикавказского научного
центра РАН-PCO-A, Россия, 362002, Владикавказ, Маркова, 93а,

e-mail: cgi_ras@mail.ru.

Представлены результаты измерения приращений силы тяжести относительными гравиметрами на семи пунктах Северо-Кавказского региона, образующих опорную гравиметрическую сеть для определения вариаций абсолютных значений силы тяжести и вертикальных движений региона. Для распространения сети на другие участки региона без проведения дорогостоящих абсолютных измерений разработана методика, основанная на измерении приращения силы тяжести между новым и опорным пунктами высокоточным относительным гравиметром. Апробация методики на двухлетнем интервале наблюдений показала ее перспективность, тем не менее, для достоверного определения вертикального движения пункта необходимы наблюдения на более длительном интервале.

Ключевые слова. Вертикальные движения земной коры, сила тяжести, относительные гравиметры.

Введение

Первые опорные гравиметрические пункты на Северном Кавказе были заложены в 1994 г. в рамках международного проекта SELF (Sea Level Fluctuations). В 1994 г. совместно со специалистами института IFAG (Германия) были сделаны измерения абсолютных значений силы тяжести баллистическим гравиметром FG5 № 101 в Баксанской подземной обсерватории ГАИШ (Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга) (п. Нейтрино, Кабардино-Балкария) и Зеленчукском филиале Института прикладной астрономии РАН (ст. Зеленчукская, Карачаево-Черкесия) [Wilmes et al., 1994]. В настоящее время сеть пунктов повторных измерений абсолютных значений силы тяжести в Северо-Кавказском регионе покрывает территории трех республик: Карачаево-Черкесию, Кабардино-Балкарию и Северную Осетию, и состоит из семи пунктов: «Зеленчукская», «Нейтрино», «Азау», «Терскол», «Нальчик», «Владикавказ» и «Ардон» (рис. 1) [Milyukov et al., 2010].

На пунктах абсолютной гравиметрической сети в результате продолжительных повторных наблюдений абсолютными гравиметрами с достаточной точностью можно получить оценку величины вертикального подъема этих пунктов. До недав-

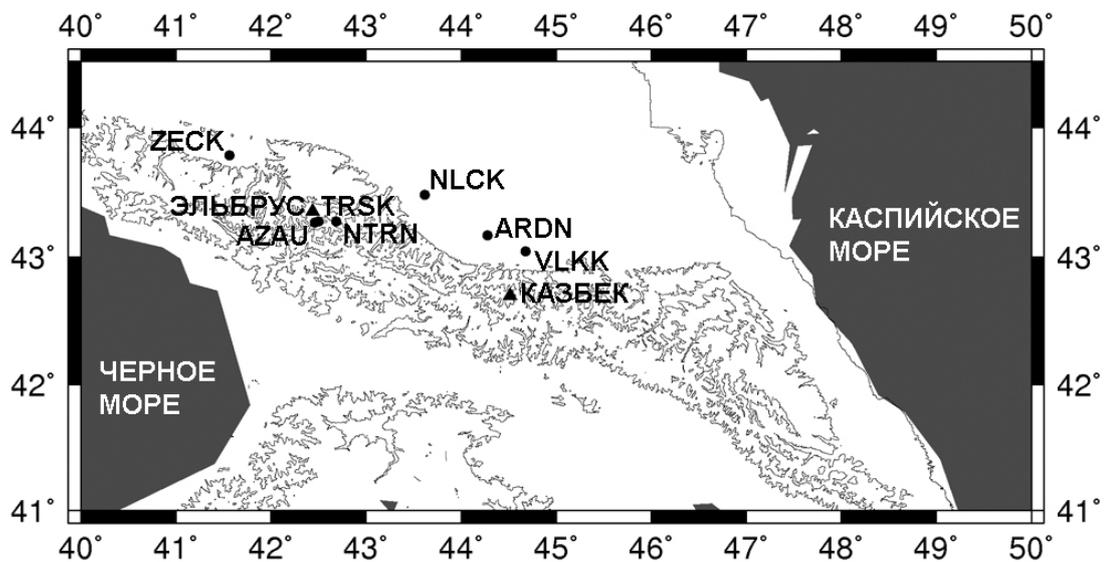


Рис.1. Сеть пунктов повторных определений абсолютных значений силы тяжести Северо-Кавказского региона: ZECK – Зеленчук; AZAU – Азау; TRSK – Терскол; NTRN – Нейтрино; NLCK – Нальчик; ARDN – Ардон; VLKK – Владикавказ. Треугольниками отмечены вулканы: Эльбрус и Казбек.

него времени альтернативы таким наблюдениям не было, поскольку при больших расстояниях между пунктами (более 150 км) и значительной разности высот (более 1,7 км) измерения приращений силы тяжести относительными гравиметрами имели погрешности, значительно превышающие погрешности абсолютных измерений. С появлением в России относительных гравиметров Scintrex CG3 и CG5, погрешности относительных измерений стали сравнимы с погрешностями абсолютных гравиметров. Так как затраты на проведение абсолютных гравиметрических измерений практически на порядок превышают затраты на относительные измерения, в ряде задач высокоточной гравиметрии может быть успешно использована съемка относительными гравиметрами. В частности, контроль вертикальных движений региона может быть осуществлен с помощью относительных гравиметров, если в регионе имеются опорные пункты, на которых с помощью абсолютных гравиметров определены изменения значения силы тяжести, а с помощью GPS наблюдений – изменения высот. С помощью высокоточной относительной съемки новые пункты могут быть связаны с опорными, и в дальнейшем на этих пунктах может осуществляться мониторинг вертикальных движений.

В работе приводятся результаты мониторинга приращений силы на гравиметрических пунктах Северного Кавказа относительными гравиметрами. Работы по этому мониторингу начаты в 2010 году и выполняются ежегодно специалистами МГУ ГАИШ и Центром Геофизических Исследований Владикавказского Научного Центра Российской Академии Наук.

Методика относительных измерений

Пусть $g_1^{t_1}$, $g_2^{t_1}$ и $\Delta p^{t_1} = g_1^{t_1} - g_2^{t_1}$ – сила тяжести на пункте (1), сила тяжести на пункте (2) и приращение силы тяжести между двумя пунктами, измеренные в эпоху t_1 . Соответственно, $g_1^{t_2}$, $g_2^{t_2}$ и $\Delta p^{t_2} = g_1^{t_2} - g_2^{t_2}$ – те же величины, измеренные в эпоху

t_2 . Тогда приращение силы тяжести между двумя пунктами за интервал времени $\Delta t = t_2 - t_1$ выражается следующим соотношением

$$\Delta p = \Delta p^{t_2} - \Delta p^{t_1} = (g_1^{t_2} - g_2^{t_2}) - (g_1^{t_1} - g_2^{t_1}) = (g_1^{t_2} - g_1^{t_1}) - (g_2^{t_2} - g_2^{t_1}) = \Delta g_1 - \Delta g_2 = (\Delta \tilde{g}_1 + \Delta h_1 \times \tilde{W}_1) - (\Delta \tilde{g}_2 + \Delta h_2 \times \tilde{W}_2), \quad (1)$$

где:

$\Delta g_i = (\Delta \tilde{g}_i + \Delta h_i \times \tilde{W}_i)$ – изменение гравитационного поля на пункте i ($i=1,2$) за время Δt за счет изменения высоты поверхности Δh_i и изменения гравитационного поля \tilde{g}_i в результате геологических, геофизических процессов;

$$\tilde{W}_i = W_i + 2\pi G\sigma,$$

где W_i – измеренный вертикальный градиент силы тяжести в свободном воздухе на пункте i ; $2\pi G\sigma$ – поправка Буге ($2\pi G\sigma \approx 113$ мкГал/м при плотности $\sigma \approx 2,7$ г/см³); G – гравитационная постоянная.

Если изменения гравитационного поля в результате процессов, не связанных с изменением высоты, составляют малую величину, ($\Delta \tilde{g}_i \approx 0$), тогда

$$\Delta p = \Delta h_1 \times \tilde{W}_1 - \Delta h_2 \times \tilde{W}_2. \quad (2)$$

Если один из пунктов является опорным (например, $i=1$), для которого, из геодезических наблюдений, известно изменение высоты Δh_1 , то по формуле (2) можно определить изменение высоты другого пункта, на котором не выполнялись (или забракованы) измерения высот:

$$\Delta h_2 = \Delta h_1 \cdot \frac{\tilde{W}_1}{\tilde{W}_2} - \frac{\Delta p}{\tilde{W}_2}. \quad (3)$$

Таким образом, для определения подъема некоторого пункта на интервале времени Δt необходимо с помощью относительного гравиметра измерить приращение силы тяжести между опорным и определяемым пунктами Δp , а также измерить вертикальные градиенты силы тяжести на пунктах \tilde{W}_1 и \tilde{W}_2 .

Измерения

Относительная гравиметрическая съемка была выполнена в две эпохи (июнь 2010 г., июнь 2012 г.) гравиметром Scintrex CG5 № 567 (рис. 2) на абсолютных гравиметрических пунктах «Азау», «Нейтрино», «Нальчик», «Ардон», «Владикавказ». Все относительные измерения выполнялись по схеме А-В-А. Во время измерений, с целью введения соответствующих поправок в приращения ускорения свободного падения, на всех пунктах контролировались изменения атмосферного давления. Величины поправок не превышали 0,2 мкГал. На всех пунктах в каждую эпоху выполнялись определения вертикальных градиентов для изучения изменения параметров приповерхностного слоя Земли [Юшкин, 2012]. Вертикальные градиенты определялись тем же гравиметром по разности силы тяжести на высотах 273 мм и 1300 мм.

Для достижения минимальных погрешностей измерений при выполнении высокоточной гравиметрической съемки относительными гравиметрами в работах такого рода, необходимы тщательные предварительные исследования и отбор гравиметров. Исследования заключаются в определении параметров разного рода

дрейфов и стабильность показаний гравиметров [Юшкин, 2011; Юшкин и др., 2011]. При расстояниях между пунктами свыше 150 км и разности высот свыше 2 км стабильность параметров относительных гравиметров имеет решающее значение. К сожалению, замечено, что со временем, даже если гравиметры не используются, их качество ухудшается. При возникновении скачков в записях на стационарных пунктах, гравиметры приходится отправлять на фирму – изготовитель. Как правило, там проводятся работы по чистке приборов, подстройке электронных схем и иногда даже их замене. Это говорит о том, что в камерах чувствительных элементов со временем конденсируются крупные частицы вещества, влияние которых на чувствительную систему приводит к скачкам в сигнале и, как следствие, к увеличению погрешности измерений. Кроме выбора и настройки гравиметров, во время измерений необходимо придерживаться строгой методики, позволяющей полностью вычищать влияния тряски приборов во время транспортировки, ударов их о подставку при постановке на пункт и влияния изменения температур и атмосферного давления. Эти вредные воздействия исчезают с увеличением времени наблюдений на пунктах. Дрейф сигнала гравиметра на всех пунктах должен быть одинаковым, или он должен быть равен стационарному. Т.е. при наблюдениях необходимо постоянно контролировать дрейф, и снимать прибор при одном и том же дрейфе на разных пунктах (для экономии времени съемки), или давать отстаиваться прибору время, которое достигает стационарного дрейфа с гарантией. На рис. 3 представлена кривая дрейфа гравиметра. Серой полосой вы-



Рис. 2. Наблюдения относительным гравиметром CG5 Scintrex на пункте «Нейтрино» (2007 г.)

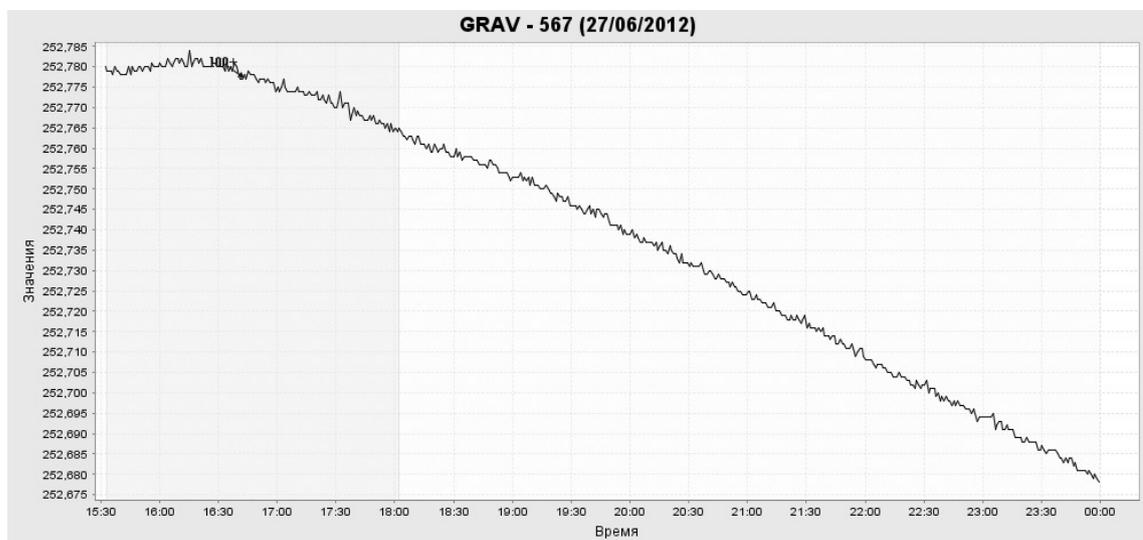


Рис. 3. Выход гравиметра в рабочий режим (кривая дрейфа).

делен участок времени, на котором брать сигнал в обработку при высокоточных наблюдениях нельзя. Из рисунка видно, чтобы дрейф с гарантией стал линейным (таковым он является при стационарных наблюдениях), требуется время не менее 4-х часов.

Результаты измерений приращений силы тяжести гравиметром CG5 приведены в таблице 1. Приращения силы тяжести приведены на высоте чувствительного элемента относительного гравиметра CG5 (273 мм над поверхностью постаментов при среднем положении подъемных винтов).

Таблица 1.

Результаты определений приращений силы тяжести между пунктами Северного Кавказа относительным гравиметром CG5

| Пункты | Год измерения | Приращение силы тяжести (мкГал) | Прибор |
|------------------------------|---------------|---------------------------------|--------|
| Ардон-Владикавказ (41 км) | 2010 | (56830 ± 3) | CG5 |
| | 2012 | (56832 ± 2) | CG5 |
| Нальчик-Азау (150 км) | 2010 | (474799 ± 2) | CG5 |
| | 2012 | (474800 ± 2) | CG5 |
| Нейтрино-Азау (18 км) | 2010 | (85239 ± 2) | CG5 |
| | 2012 | (85239 ± 2) | CG5 |
| Нальчик-Нейтрино (130 км) | 2010 | (389560 ± 2) | CG5 |
| | 2012 | (389561 ± 2) | CG5 |

Обсуждение результатов

Основываясь на данных по вертикальным движениям пунктов и измеренных вертикальных градиентах на пунктах (таблица 2), по формуле (2) можно оценить

Таблица 2.

Оценки скоростей вертикальных движений пунктов Северного Кавказа по гравиметрическим и геодезическим данным.

| Пункт (высота) | Вертикальная скорость, мм/год | | Изменение силы тяжести, мкГал/год | Верт. градиент, мкГал/м |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | гравиметрия | Геодезия | | |
| 1. Зеленчукская (1166 м) | $(2,2 \pm 0,7)^1$ | $(2,0 \pm 0,7)^2$ | -0,41 | -281,51 |
| 2. Нейтрино (1720 м) | $(5,2 \pm 0,7)^1$ | | -1,00 | -234,31 |
| 3. Терскол (3122 м) | | $(5,6 \pm 0,5)^2$ | -1,06 | -309,0 |
| 4. Азау (2334 м) | | | | -247,1 |
| 5. Нальчик (530 м) | | $(0 \pm 1,0)^3$ | 0 | -280,2 |
| 6. Владикавказ (684 м) | | $(-1,1 \pm 0,7)^2$ | 0,321 | -284,9 |
| 7. Ардон (399 м) | | $(-2,5 \pm 0,7)^3$ | 0,47 | -307,0 |

⁽¹⁾ По данным Северо-Кавказской региональной сети пунктов абсолютной гравиметрии (ГАИШ МГУ).

⁽²⁾ По данным Северо-Кавказской региональной сети стационарных станций наблюдения спутников GPS/ГЛОНАСС (ГАИШ МГУ).

⁽³⁾ Карта современных вертикальных движений земной коры по геодезическим данным на территорию СССР (СВДЗК). Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, М., 1989.

ожидаемые за некоторый интервал времени изменения приращений силы тяжести между двумя пунктами. Эти оценки для двухлетнего интервала приведены в таблице 3. В ней также приведены изменения приращений силы тяжести, вычисленные по значениям приращений, измеренным относительным гравиметром в 2010 и 2012 гг. (таблица 1).

Таблица 3.

Ожидаемые и измеренные изменения приращений силы тяжести между пунктами за два года

| Пункты | Ожидаемое за 2 года изменение приращения силы тяжести (мкГал) | Измеренное за 2 года изменение приращения силы тяжести (мкГал) |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Ардон- Владикавказ (41 км) | 0,9 | (2±2) |
| Нальчик-Азау (150 км) | 2,8 | (1±2) |
| Нейтрино-Азау (18 км) | 0,14 | (0±2) |
| Нальчик-Нейтрино (130 км) | 2,6 | (1±2) |

Как следует из таблицы 3, наибольшее изменение приращений силы тяжести следует ожидать для пунктов, наиболее удаленных друг от друга: Нальчик-Азау (150 км) и Нальчик-Нейтрино (130 км). Измеренные значения изменений в пределах ошибок не отличаются от ожидаемых, тем не менее, точность измерений не достаточна, чтобы значимо выявить измеряемую величину на данном временном интервале. Можно ожидать, что на 5-6- летнем интервале наблюдений изменение приращения силы тяжести между наиболее удаленными пунктами достигнет величины 7-8 мкГал. Эта величина уже может быть уверенно определена современными относительными гравиметрами.

Заключение

В Северо-Кавказском регионе создана сеть пунктов повторных измерений абсолютных значений силы тяжести, которая покрывает территории трех республик: Карачаево-Черкесию, Кабардино-Балкарию и Северную Осетию, и состоит семи пунктов: «Зеленчукская», «Нейтрино», «Азау», «Терскол», «Нальчик», «Владикавказ» и «Ардон». Эти пункты рассматриваются как опорные для контроля современных вертикальных движений региона.

Измерение изменения абсолютного значения силы тяжести на длительном интервале наблюдения дает надежную оценку вертикальных движений. Однако проведение абсолютных гравиметрических работ требует достаточно высоких организационных и финансовых затрат. Разработанная нами методика позволяет заменить дорогостоящие абсолютные гравиметрические определения на измерения приращения силы тяжести между определяемым и опорным (на котором известно абсолютное значение силы тяжести) пунктами высокоточным относительным гравиметром. Затраты на проведение таких измерений будут существенно ниже. Для апробации этого метода на двухлетнем интервале наблюдений была выполнена связь между рядом пунктов Северо-Кавказской сети относительным гравиметром Scintrex CG5. Измеренные значения приращений между пунктами имеют среднеквадратические ошибки, сравнимые с ошибками абсолютных измерений. Можно ожидать, что на 5-6- летнем интервале наблюдения изменение приращения силы тяжести между

наиболее удаленными пунктами достигнет величины 7-8 мкГал. Эта величина уже может быть уверенно определена современными относительными гравиметрами. Таким образом, с использованием высокоточных относительных гравиметров сеть пунктов для контроля вертикальных движений может быть значительно расширена. Это особенно актуально для труднодоступных районов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-05-00475).

Литература

1. Юшкин В. Д. «Опыт работы с гравиметрами CG5» Измерительная техника, 2011, №5, с. 3-9.
2. Юшкин В. Д., Сапунов А. Н., Стусь Ю. Ф., Калиш Е. Н., Бунин И. А., Носов Д. А. «Измерения новым полевым баллистическим гравиметром ГАБЛ-М в условиях тундры», Измерительная техника, № 10, 2011, с. 3-9.
3. Юшкин В. Д. «Влияние поверхностного слоя Земли на ускорение свободного падения», Измерительная техника, 2012, № 5, с.8-11.
4. Milyukov V., Kopaev A., Zharov V., Mironov A., Myasnikov A., Kaufman M., Duev D., «Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS/GLONASS network», J. Geodyn., 2010, с. 216-223.
5. Wilmes H., Schafer U., Kopaev A., Richter B., Becker M., Kumkova I., Milyukov V., «First absolute gravity campaign in the Caucasus Region and its relation to the detection of height variations», IGC/ICG Joint Meeting Abstracts, Sept. 11-17, 1994, Graz, Austria.

DOI: 10.23671/VNC.2013.2.55543

THE INCREMENTS OF GRAVITY MONITORING AT NORTHERN CAUCASUS GRAVIMETRIC TEAM POINTS USING PRECISION RELATIVE GRAVIMETERS

V.K. Milyukov¹, Sc. Doctor (Phys.-math.), V.D. Iushkin¹, A. P. Mironov¹,
V.B. Zaalishvili², Sc. Doctor (Phys.-math.), prof., A.S. Kanukov², B.V. Dzeranov²,
Sc. Candidate (Geol.)

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University,
119991, Moscow Russia, Universitetsky pr., 13,
e-mail: milyukov@sai.msu.ru.,

²Center for Geophysical Investigation of Vladikavkaz Scientific Center of RAS,
Russia, 362002, Vladikavkaz,
e-mail: cgi_ras@mail.ru.

Results of relative gravity measurements on seven sites of Northern Caucasus region, which form a reference network for determination of vertical movements of the region by a gravimetric method, are presented. To spread this network to other parts of the region without carrying out expensive absolute measurements, the technique based on measurement of the gravity increment between the new and reference sites by the high-precision relative gravity meter is developed. Two-years observations showed availability of this technique, nevertheless, for reliable determination of the site vertical movements, the observations on longer time interval are necessary.

Keywords: Absolute and relative gravity, relative gravity meters.