

УДК 528.27

DOI 10.17513/use.38063

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО СОЗДАНИЮ ОПОРНОГО ПУНКТА ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ К ПУНКТАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ ОПОРНОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЕТИ IGRF

^{1,2}Чистякова Е.А., ²Баранов В.Н.

¹ППК «Роскадастр», Москва;

²ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», Москва,

e-mail: e.a.chistiakova@gmail.com

В рамках эксперимента по созданию опорного пункта фундаментальной гравиметрической сети с учетом требований к пунктам Международной опорной гравиметрической сети IGRF на исходном пункте Государственной гравиметрической сети Российской Федерации поставлены регулярные абсолютные и мониторинговые относительные определения ускорения силы тяжести. В эксперименте использовались абсолютный баллистический гравиметр FG5 и относительный приливной гравиметр gPhoneX, рекомендованные при создании пункта IGRF. В статье описана методика обработки результатов абсолютных и относительных гравиметрических определений. Далее выполнено сравнение ряда абсолютных значений ускорения силы тяжести и мониторинговых значений вариаций ускорения силы тяжести. Результаты сравнения говорят о качестве сборки конкретных гравиметров, корректности применяемых методик измерений и обработки. В представленных результатах измерений отслеживаются остаточные вариации значения ускорения силы тяжести. Они могут быть обусловлены гидрологическими и атмосферными нагрузочными деформациями. Выполнено сравнение результатов абсолютных и относительных гравиметрических определений и гидрологических нагрузок гравитационного поля Земли. По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что гидрологическая нагрузка оказывает заметное влияние на результаты гравиметрических определений и может быть учтена по данным Международной службы нагрузочных деформаций.

Ключевые слова: вариации силы тяжести, геодезия, гравиметрия, земные приливы, атмосферные нагрузки

AN EXPERIMENT ON THE CREATION OF A REFERENCE POINT FOR THE GLOBAL ABSOLUTE GRAVITY REFERENCE SYSTEM, TAKING INTO ACCOUNT THE REQUIREMENTS FOR THE POINTS OF THE INTERNATIONAL GRAVITY REFERENCE FRAME IGRF

^{1,2}Chistyakova E.A., ²Baranov V.N.

¹Center of Geodesy, Cartography and SDI, Moscow;

²State University of Land Use Planning, Moscow, e-mail: e.a.chistiakova@gmail.com

Regular absolute and monitoring relative determinations of the acceleration of gravity were made at the starting point of the State Gravimetric Network of the Russian Federation using certified gravimeters as part of the experiment to create a base point of the fundamental gravimetric network, taking into account the requirements for the points of the International Basic Gravimetric Network IGRF. The FG5 absolute ballistic gravimeter and the reliable gPhoneX tidal gravimeter are presented in the experiment. The article describes a technique for processing the results of absolute and reliable gravimetric determinations. Next, the comparing a number of absolute gravity values and monitoring gravity values was made. The results of the comparison indicate the quality of the assembly of specific gravimeters, the correctness of the measurement and processing methods that were used. In the presented measurement results is shown that there still are some residual gravity variations. It can be caused by hydrological and atmospheric loading deformations. The results of absolute and relative gravimetric determinations and hydrological studies of the Earth are compared. Based on the results of the studies, it can be concluded that the hydrological load affects the results of gravimetric determinations and can be taken into account with data provided by EOST Loading Service.

Keywords: gravimetry, gravity, gravimeters, hydrological loading, Gravity Network

В последние десятилетия все активнее развиваются гравиметрические сети различных категорий: международные, государственные, локальные. Знание о гравитационном поле Земли крайне важно для современного инженерно-геодезического производства, поскольку на строительных площадках все активнее применяются ГНСС-технологии. Ряд работ, таких как мониторинг деформаций зданий и сооружений, требуют наивысшей точности, ино-

гда достигающей десятых долей миллиметра [1, 2]. С целью повышения точности координатных определений, получаемых ГНСС-методами, необходимо знать пространственные и временные вариации гравитационного поля Земли.

В 2015 г. Резолюцией Международной ассоциации геодезии было предложено создание единой Международной гравиметрической опорной сети (IGRF). Для реализации сети была создана специальная рабо-

чая группа IAG JWG 2.1.1, целью которой было установление глобальной абсолютной гравиметрической системы. Для этого необходимо создание сети опорных пунктов, на которых выполняются регулярные абсолютные и мониторинговые относительные определения, доступные в любое время.

Абсолютные значения ускорения силы тяжести в любой точке на земной поверхности не являются постоянными. Временные вариации ускорения силы тяжести зависят от многих факторов, имеющих различную физическую природу и характеристики, поэтому выявление их методом простой фильтрации не представляется возможным [3].

Пункт ЦНИИГАиК (TSNI#110a) является основным пунктом Государственной гравиметрической сети Российской Федерации и исходным пунктом Московского гравиметрического полигона. В связи с этим необходимо знать значение ускорения силы тяжести в любой момент времени с максимально доступной точностью. Кроме того, пункт TSNI#110a в комплексе со всем Московским гравиметрическим полигоном отвечает требованиям к опорным пунктам международной гравиметрической сети IGRF. В связи с этим в рамках эксперимента по созданию опорного пункта для непрерывного мониторинга значений ускорения силы тяжести и включения пункта в международную гравиметрическую сеть IGRF с 2017 г. на пункте TSNI ведутся регулярные абсолютные и мониторинговые относительные наблюдения.

Целью исследования является обоснование методики выполнения и обработки результатов гравиметрических измерений абсолютным и относительным методами. Для этого необходимо выполнить синхронные долговременные измерения абсолютным баллистическим и относительным приливным гравиметрами на соседних постах, выполнить сравнения результатов измерений и определить факторы, влияющие на результаты измерений.

Постановка измерений

Согласно требованиям к пунктам Международной опорной гравиметрической сети, на исходном пункте гравиметрической сети должны выполняться регулярные абсолютные и мониторинговые относительные определения ускорения силы тяжести аттестованными гравиметрами.

В лаборатории ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД» расположены два поста с марками (TSNI#110a и TSNI#110b).

На пункте TSNI#110a выполняются регулярные наблюдения абсолютным гравиметром FG5. Баллистический гравиметр FG5 серийно производится американской фирмой Micro-g LaCoste. Прибор FG5#110 был выпущен в 1990-х гг., и после модернизации был приобретён ФГУП «ЦНИИГАиК» в 2004 г. В июне 2017 г. был отправлен в США на ремонт и частичную модернизацию (полностью заменен блок электроники). В настоящее время в России гравиметром FG5 владеет только ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД».

Для мониторинговых наблюдений ускорения силы тяжести используется специальный приливной гравиметр gPhoneX, также произведенный фирмой Micro-g LaCoste. Таких гравиметров в Российской Федерации насчитывается несколько экземпляров, однако в большинстве они используются в качестве сейсмографов. Приливной гравиметр gPhoneX#117 установлен на пункте TSNI#110b. С 2014 г. практически непрерывно (ежесекундно) выполняются измерения силы тяжести, температуры и давления окружающей среды и датчика, положения уровней. Измерения, производимые гравиметром gPhoneX, относятся к высокоточным измерениям. Инструментальная погрешность измерений составляет 1 мкГал [4, с. 10].

Обработка результатов измерений

Абсолютное значение силы тяжести g_{abs} на пункте из наблюдений в каждом броске вычисляется по формуле [6]:

$$g_{abs} = g_1 + \Delta g_c + \Delta g_a + \Delta g_B + \Delta g_{tide} + \Delta g_{Polar}, \quad (1)$$

где g_1 – полученное из решения по методу наименьших квадратов значение ускорения силы тяжести по одному броску на уровне эффективной высоты гравиметра H_{eff} над местом установки;

Δg_c – поправка за конечность скорости распространения света;

Δg_a – поправка за притяжение атмосферы;

Δg_B – поправка за влияние сопротивления остаточного воздуха в баллистической камере;

Δg_{tide} – поправка за приливные изменения силы тяжести под действием Луны и Солнца;

Δg_{Polar} – поправка за движение полюса.

Повторная обработка результатов измерений гравиметром FG5 выполняется в два этапа:

– вычисление значения силы тяжести на эффективной высоте (при значении вертикального градиента W_{hh} ;

– определение эффективной высоты H_{eff} .

В результате получен ряд абсолютных значений силы тяжести, приведенных к одной высоте. Также выполнена оценка точности каждого из полученных значений. Результаты представлены на рис. 1.

Обработка измерений, выполненных приливным гравиметром, представляет особый интерес, поскольку единый автоматизированный методики обработки на сегодняшний день не существует. Предлагаемая методика описана в ранее проведенных исследованиях, описанных в [6, 7], и заключается в следующем:

1. Исключение случайных выбросов. Выполнялось в автоматическом режиме, пропуски данных, возникающие при исключении случайных выбросов, заполнялись интерполированным значением силы тяжести.

2. Исключение из измерений теоретических приливных изменений силы тяжести с использованием модели EGTAB, движения земных полюсов и дрейфа нуля-пункта гравиметра.

3. Фильтрация и последовательное прореживание секундных данных до частоты одного измерения в минуту, в час, в две недели (в соответствии с правилом Котельникова [8]). Такой выбор частоты дискретизации связан с необходимостью решения тех или иных задач. Для данного исследования

использовались значения, осредненные за один месяц.

4. Приведение результатов к высоте измерений FG5.

По аналогии с абсолютными окончательные значения силы тяжести, полученные по результатам относительным измерений (g_{rel}), можно вычислить по формуле

$$g_{rel} = g_n + \Delta g_a + \Delta g_{tide} + \Delta g_{Polar} + \Delta g_{drift}, \quad (2)$$

где g_n – измеренное значение силы тяжести, полученное после фильтрации и приведенное к уровню эффективной высоты гравиметра H_{eff} ;

Δg_a – поправка за притяжение атмосферы;

Δg_{tide} – поправка за приливные изменения силы тяжести под действием Луны и Солнца;

Δg_{Polar} – поправка за движение полюса;

Δg_{drift} – поправка за дрейф нуля-пункта гравиметра.

Таким образом, в окончательных значениях результатов абсолютных и относительных наблюдений, полученных с учетом формул (1) и (2), учтены инструментальные погрешности, а также основные известные факторы, вызывающие временные вариации гравитационного поля Земли: движение полюса и приливные изменения силы тяжести под действием Луны и Солнца.

Отдельный интерес представляет учет дрейфа нуля-пункта относительного гравиметра.

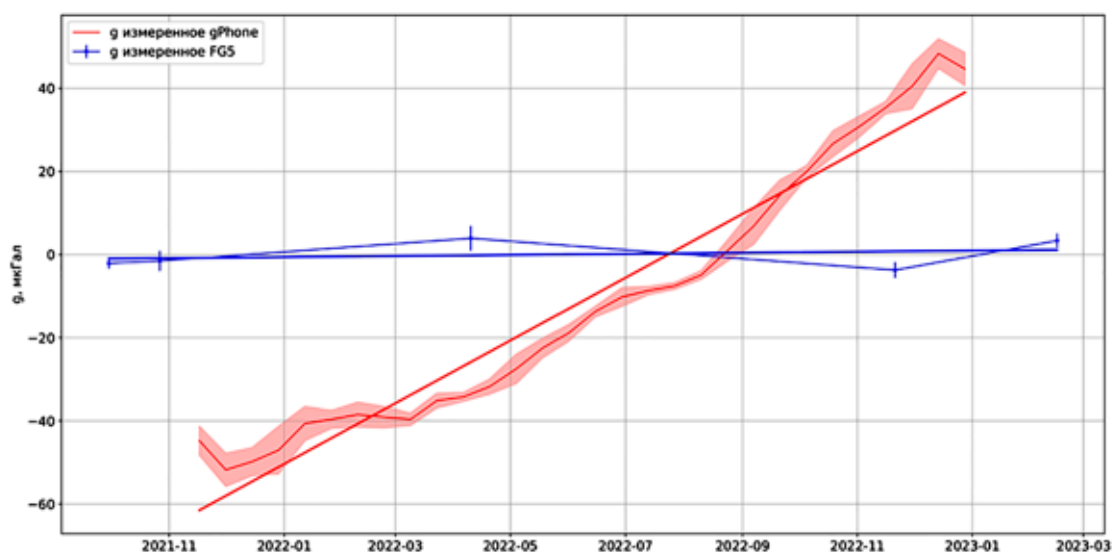


Рис. 1. График сравнения результатов абсолютных и относительных измерений

На рис. 1 представлены результаты сравнения абсолютных значений ускорения силы тяжести и мониторинговых значений, полученных приливным гравиметром без учета дрейфа. Дрейф нуль-пункта характерен только для пружинных гравиметров [4, с. 35] и может быть выявлен методом сравнения с результатами абсолютных определений с учетом его линейности [6, 7].

Таким образом, дрейф нуль-пункта приливного гравиметра, который составляет величину около 7 мкГал/месяц, можно учесть методом линейной аппроксимации.

Результаты исследования и их обсуждение

Получившиеся в результате произведенной обработки значения временных вариаций силы тяжести по данным абсолютных и мониторинговых относительных определений совпадают в пределах точности измерений. Точность определений в каждом случае не превышает 4 мкГал. Однако непостоянство значений силы тяжести во времени все еще существенно – разброс значений достигает 25 мкГал.

Известно, что неприливные вариации ускорения силы тяжести главным образом обусловлены атмосферными и гидрологическими нагрузочными деформациями. Вопрос учета атмосферных нагрузочных деформаций рассматривался авторами ранее [7]. После учета атмосферных нагрузочных вариаций, в результатах и абсолютных,

и относительных измерений прослеживаются сезонные вариации ускорения силы тяжести с максимумом в марте и минимумом в сентябре. Аналогичные характеристики имеет и сигнал гидрологических нагрузочных деформаций гравитационного поля, предоставляемый Службой нагрузочных деформаций Университета Страсбурга (EOST) [9].

На рис. 2 представлены результаты абсолютных и относительных измерений и гидрологическая нагрузка. Под гидрологической нагрузкой подразумеваются временные вариации силы тяжести, вызванные изменением уровня грунтовых вод и влажности почв на локальном и глобальном уровне. Локальный эффект обусловлен изменением притяжения масс в районе наблюдений. На глобальном уровне оказывают влияние и гидрологические изменения в удаленных от места наблюдений районах. Для данного исследования использовалась модель гидрологической нагрузки, основанная на модели гидрологии MERRA2 [10].

Корреляционный анализ показал наличие прямой линейной зависимости между вариациями атмосферного давления и вариациями УСТ. Около 90 % сигнала оставшихся после учета атмосферного воздействия неприливных вариаций УСТ могут быть объяснены гидрологическим воздействием. Таким образом, представляется возможным выполнять учет гидрологической нагрузки по данным EOST на пункте TSNI.



Рис. 2. Оценка влияния гидрологической неприливной нагрузки на результаты гравиметрических определений

Заключение

В статье выполнено сравнение ряда абсолютных значений ускорения силы тяжести и мониторинговых значений вариаций ускорения силы тяжести на основном пункте Государственной гравиметрической сети Российской Федерации. Данное сравнение выполнено в рамках эксперимента по созданию опорного пункта фундаментальной гравиметрической сети с учетом требований к пунктам Международной опорной гравиметрической сети IGRF.

Результаты сравнения говорят о качестве сборки конкретных гравиметров, корректности применяемых методик измерений и обработки. В представленных результатах измерений отслеживаются остаточные вариации значения ускорения силы тяжести. Они могут быть обусловлены гидрологическими и атмосферными нагрузочными деформациями.

Гидрологическая нагрузка оказывает заметное влияние на результаты гравиметрических определений и может быть учтена по данным EOST.

Список литературы

1. Морозов А.В., Баранов В.Н., Андреев В.К. Вариации силы тяжести из-за влияния уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений // Успехи современного естествознания. 2022. № 4. С. 92–97.
2. Морозов А.В., Баранов В.Н. Вариации геодезических высот, вызванные колебаниями силы тяжести, осадков

и уровня грунтовых вод на площадке строительства уникальных зданий и сооружений // Успехи современного естествознания. 2023. № 2. С. 119–128.

3. Суздаев А.С., Вовк И.Г., Артемьева Н.П. Пространственно-временные вариации гравитационного поля Земли // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. № 3. С. 20–25.
4. gMonitor User's Manual: gMonitor Gravity Data Acquisition and Processing Software. Ver. 2.1: Microg LaCoste. 2017. 88 p.
5. Olsson P.-A., Breili K., Ophaug V., Steffen H., Bilker-Koivula M., Nielsen E., Timmen L. Postglacial gravity change in Fennoscandia – three decades of repeated absolute gravity observations. // *Geophysical Journal International*. 2019. Is. 217 (2). P. 1141–1156. DOI: 10.1093/gji/ggz054.
6. Чистякова Е.А. Выявление и учет дрейфа нуля-пункта относительного гравиметра приливного типа // *Геодезия и картография*. 2023. № 4. С. 14–19. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-994-4-14-19.
7. Чистякова Е.А. Исследование атмосферных нагрузочных эффектов по результатам мониторинговых наблюдений силы тяжести на пункте ЦНИИГАиК // *Великие реки – 2019: Труды научного конгресса 21-го Международного научно-промышленного форума: в 3 т. (Нижний Новгород, 14–17 мая 2019 г.)*. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. С. 296–299.
8. Котельников В.А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет // *Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933*. Репринт статьи в журнале УФН, 176:7. 2006. С. 762–770.
9. Boy J.-P. Study of the seasonal gravity signal in superconducting gravimeter data / J.-P. Boy, J. Hinderer // *Journal of Geodynamics*. 2006. Vol. 41, Is. 1. P. 227–233. DOI: 10.1016/j.jog.2005.08.035.
10. Gelaro R. et. al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *J. Climate*. 2017. № 30. P. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.