

УДК 550.831.23:550.312

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

© 2021 г. М.Н. Дробышев¹, В.Н. Конешов¹, Д.В. Абрамов¹, Д.А. Малышева²

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

² *Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия*

Автор для переписки: В.Н. Конешов (e-mail: slavakoneshov@hotmail.com)

Получение наиболее точных и достоверных гравиметрических данных всегда было и остается главной задачей гравиметрии. Одна из основных помех при проведении наземных гравиметрических измерений – сейсмическое воздействие как природного, так и техногенного происхождения.

В статье рассматривается сейсмическое влияние на высокоточные гравиметрические измерения в качестве устранимой помехи, а также вариант использования сейсмических станций для оценки пригодности пункта наблюдения к проведению высокоточных гравиметрических измерений по рассчитанному значению среднеквадратического отклонения измерений вертикального канала. В целях получения необходимых экспериментальных данных на полигоне “Запольское”, в условиях геофизической обсерватории, на постаменте гравиметрического пункта первого класса были проведены гравиметрические и сейсмометрические измерения с различной продолжительностью регистрации и частотой отсчетов. Для определения степени влияния сейсмических колебаний на высокоточные гравиметрические измерения было проведено моделирование сигнала чувствительного элемента гравиметра с использованием сейсмической информации в качестве входных данных и сопоставление полученных рядов с гравиметрическими измерениями. В частотном диапазоне 1.7·10⁻²–6.0 Гц значение коэффициента корреляции между рядами не опускалось ниже 0.9.

Экспериментальные результаты подтверждают возможность применения сейсмометров в качестве источника дополнительной информации об инерционных помехах при проведении высокоточных гравиметрических измерений. При этом наблюдается значительное снижение амплитуды высокочастотной фоновой зашумленности гравиметрических данных. Среднеквадратическое отклонение гравиметрических отсчетов показывает меру зашумленности полученных данных и является важной характеристикой точности выполненных гравиметрических измерений. Так же подтверждена возможность применения сейсмических станций для оценки вероятной инерциальной помехи в потенциальных пунктах гравиметрических измерений.

Ключевые слова: высокоточные гравиметрические наблюдения, микросейсмические колебания, среднеквадратическое отклонение (СКО), оценка влияния микросейсм на долговременные гравиметрические измерения.

Введение

Сейсмические явления оказывают существенное воздействие на гравиметрические измерения, в том числе при проведении долговременных наблюдений [Табулевич, 1986]. Данная статья – продолжение исследований влияния внешних факторов на гравиметрические измерения, проводимых в Институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. Ранее нами была оценена степень возможного учета сейсмического воздействия и определен уровень влияния землетрясений [Дробышев, Конешов, 2014; Абрамов, Дробышев, Конешов, 2013].

В современных гравиметрах предусмотрена система сейсмической фильтрации, но, несмотря на это, наблюдается значительное остаточное влияние, вызванное тем, что в гравиметре микросейсмические воздействия устраняются простым осреднением [Boddice et al., 2018]. В связи с этим получение точностей на уровне первых мкГал затруднено без использования дополнительной информации в пункте наблюдения.

В предлагаемой статье рассматривается сейсмическое влияние на гравиметрические измерения в качестве устранимой помехи, а также вариант использования сейсмических станций для оценки степени пригодности точек наблюдений к проведению высокоточных гравиметрических измерений по рассчитанному значению среднеквадратического отклонения (СКО) измерений вертикального канала.

Сопоставление гравиметрической и сейсмометрической информации

Гравиметр и сейсмометр – приборы, действующие на одних физических принципах и имеющие общий частотный диапазон [Цифровая..., 2005; Относительный..., 2008]. Их расположение на одном геофизическом постаменте позволяет считать зарегистрированные инерционные помехи идентичными по происхождению [Дробышев, Конешов, 2013; Абрамов, Дорожков, Конешов, 2010; Абрамов и др., 2017]. Инерционное воздействие регистрируется обоими приборами и в рамках совпадения их амплитудно-частотных характеристик данные, записанные сейсмической станцией, можно использовать для снижения высокочастотной составляющей помех гравиметрического ряда [Абрамов и др., 2017; Вучков, Митунина, 2015]. Измерения выполнялись в геофизической обсерватории “Запольское” во Владимирской области на постаменте гравиметрического пункта первого класса [ГОСТ РВ 1.1-96; Seigel, 1995].

Относительный гравиметр CG-5 можно представить в виде трех последовательных функциональных блоков: чувствительного элемента, преобразователя и вычислителя. Чувствительный элемент гравиметра – это маятник из плавленого кварца, математически описываемый как колебательное звено второго порядка [Дробышев, Конешов, 2014]. Информация с чувствительного элемента в виде дискретных единичных отсчетов с частотой 6 Гц (рис. 1, *вверху слева*) поступала на вход преобразователя, где добавлялись поправки, учитывающие изменения угла наклона и температуры [Относительный..., 2008]. В вычислителе из полученных значений приращения силы тяжести рассчитывались среднее значение за время накопления отсчетов, заданное оператором (рис. 1, *вверху справа*), и его среднеквадратическое отклонение (рис. 1, *внизу*).

Цифровая сейсмическая станция “УГРА”, в комплекте с однокомпонентными сейсмическими датчиками СМЗ-ОС, используемая в качестве источника сейсмической информации, регистрировала микросейсмические колебания в частотном диапазоне 10–0.1 Гц [Цифровая..., 2005].

Дискретные единичные отсчеты с чувствительного элемента гравиметра (файлы формата *.str*) наиболее близки по частоте отсчетов к сейсмическим измерениям. Для проведения сравнения сейсмические данные были приведены к частоте 6 Гц путем математического осреднения. Полученный коэффициент корреляции между гравиметрическими и рассчитанными сейсмическими данными с частотой 6 Гц составил 0.829.

Применение математической модели гравиметра, описанной в предыдущих работах (см., например, [Дробышев, Конешов, 2014]), с использованием продифференцированных отсчетов вертикального канала сейсмостанции в качестве входных данных для смоделированного чувствительного элемента гравиметра, позволило получить максимальное значение коэффициента корреляции между сейсмическими и гравиметрическими данными. Это значение составило 0.959, что сопоставимо со значением

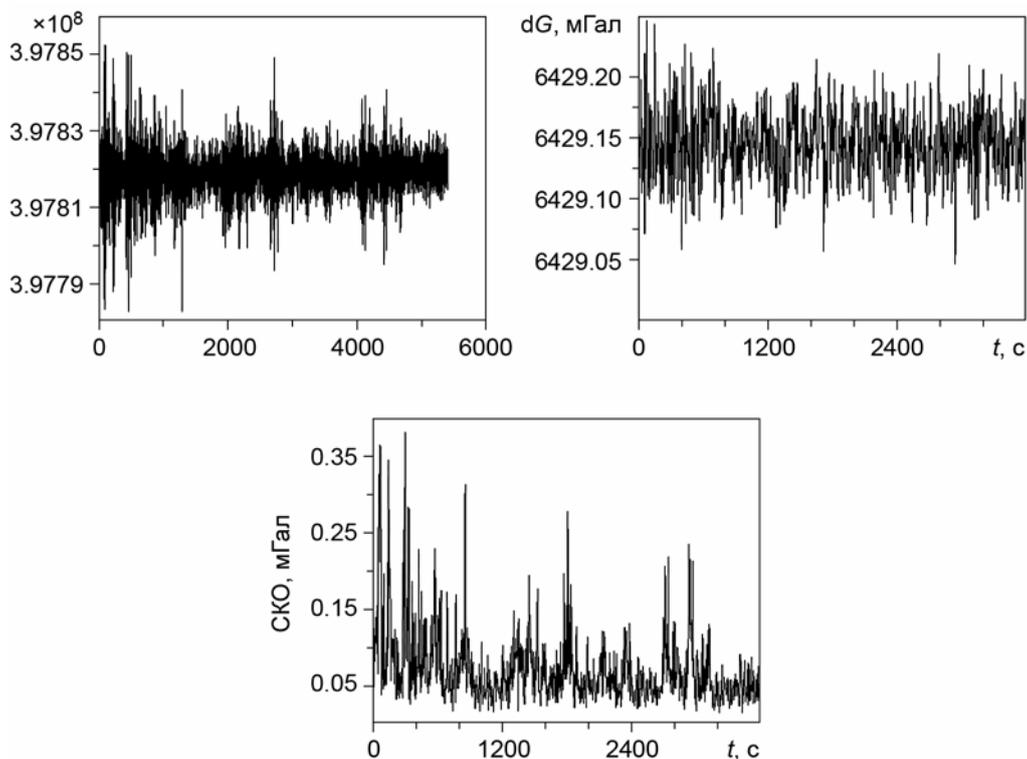


Рис. 1. Гравиметрические данные за 1 ч измерений. *Вверху слева:* дискретные единичные отсчеты с чувствительного элемента (на вертикальной оси – *grav_sample*, выходные значения АЦП гравиметра, на горизонтальной – отсчеты, взятые с частотой 6 Гц); *вверху справа:* четырехсекундный выходной ряд гравиметрических отсчетов; *внизу:* СКО гравиметрических отсчетов, мГал

Fig. 1. Gravimetric data for 1 hour of measurements. *Above on the left:* discrete single readings from the sensitive element (on the vertical axis – *grav_sample*, the output values of the gravimeter ADC, on the horizontal – samples taken with a frequency of 6 Hz); *above on the right:* four-second output series of gravimetric samples; *below:* Root mean squared deviations (RMSD) of gravimetric samples, mGal

корреляции 0.954 между смоделированным сигналом и итоговыми гравиметрическими отсчетами на частоте периода регистрации гравиметра (4 с), подтверждая высокую степень влияния сейсмических явлений на гравиметрические измерения.

Замена шестигерцовых дискретных единичных отсчетов на смоделированный по сейсмическим данным ряд в алгоритме расчета итогового гравиметрического отсчета позволила рассчитать СКО по алгоритму, аналогичному расчету гравиметра. Средне-квадратическое отклонение смоделированного сигнала идентично СКО гравиметрического сигнала. Разность между ними не превышает 0.1 мГал в пиковом и 0.02 мГал в фоновых значениях (рис. 2).

Принимая во внимание, что при моделировании сигнала чувствительного элемента гравиметра использовались только данные вертикального канала сейсмической станции, можно сделать следующие промежуточные выводы:

- СКО гравиметрических отсчетов характеризует уровень влияния микросейсмических шумов на чувствительный элемент гравиметра;
- расчет СКО гравиметрических отсчетов по сейсмическим данным, можно оценить пункт измерений на пригодность к проведению высокоточной гравиметрической съемки.

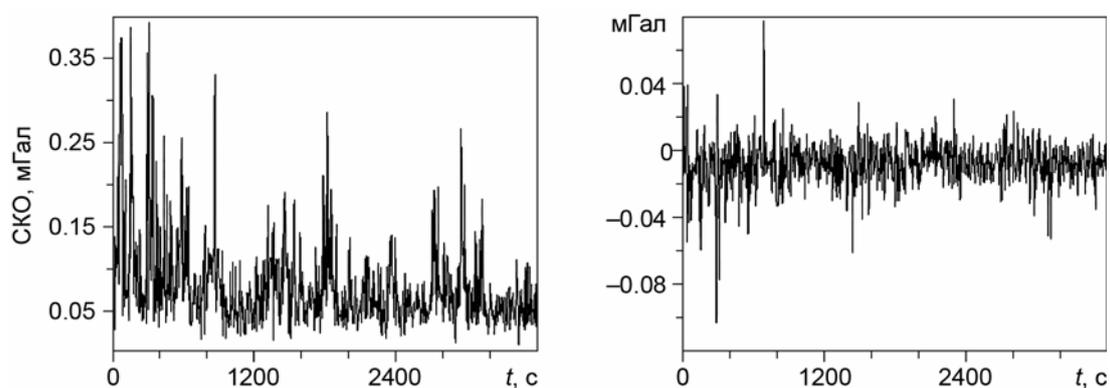


Рис. 2. Слева: СКО смоделированного из сейсмических данных сигнала за 1 ч измерений, мГал; справа: разница СКО смоделированного и гравиметрического сигналов, мГал

Fig. 2. On the left: RMSD of the signal simulated from seismic data for 1 hour of measurements, mGal; on the right: the difference between the RMSD of the simulated and gravimetric signals, mGal

Снижение зарегистрированного сейсмического воздействия в гравиметрических рядах

Вычитание смоделированного на сейсмических данных сигнала из гравиметрического шестигерцового ряда значительно снижает погрешности (рис. 3). Исходный гравиметрический ряд был представлен ранее (см. рис. 1, *вверху справа*).

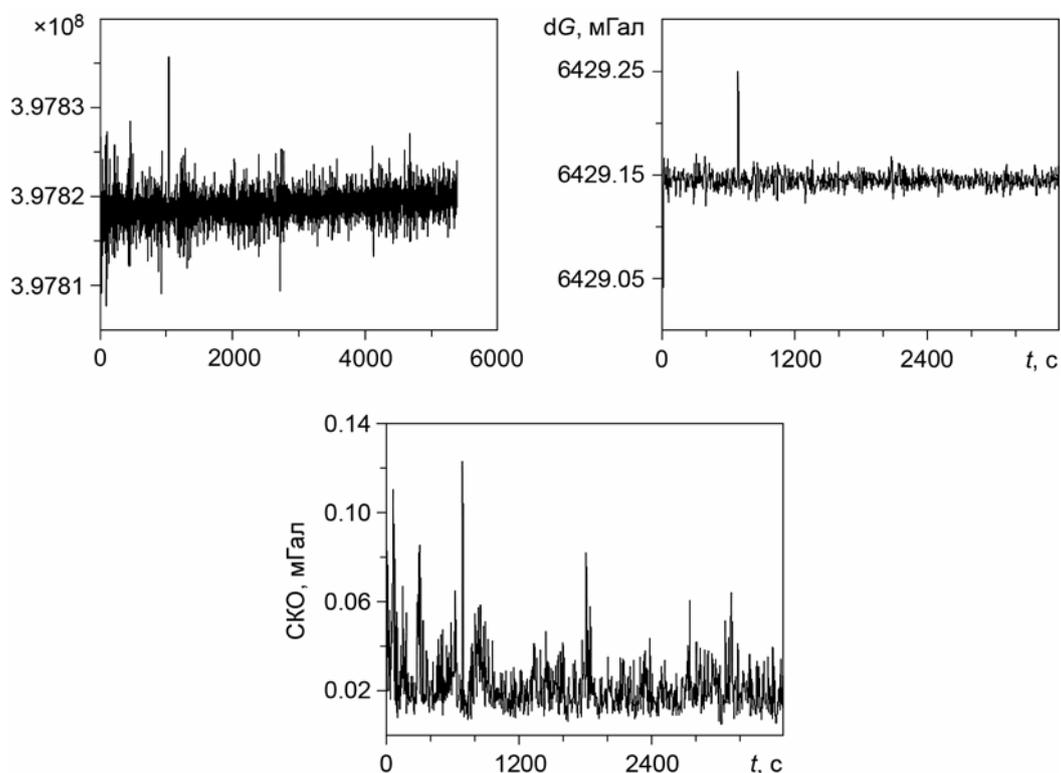


Рис. 3. Те же величины, что представлены на рис. 1, но с учетом сейсмического воздействия

Fig. 3. The same values as shown in Fig. 1, but taking into account the seismic impact

В результате обработки амплитуда фоновой зашумленности шестигерцовых данных снижена примерно в два раза, а четырехсекундных гравиметрических отсчетов – в четыре-пять раз.

Минимальная частота регистрируемого гравиметром сигнала определяется частотой дискретизации, задаваемой оператором. Используемый в расчетах минимальный период регистрации равен 4 с. В этом случае максимальное значение частоты среза гравиметра равно 0.125 Гц, что находится на границе частоты пропускания сейсмометра.

Применение моделирования сигнала чувствительного элемента к шестигерцовым данным снижает необходимость использования широкополосных сейсмометров, так как для оценки информативности высокочастотных гравиметрических данных, достаточен диапазон частот 1–6 Гц.

Математическая модель гравиметра, применяемая на коротком отрезке измерений шестигерцовых данных, может позволить получить сейсмическую поправку к длинному гравиметрическому ряду с периодом регистрации более 4 с (рис. 4).

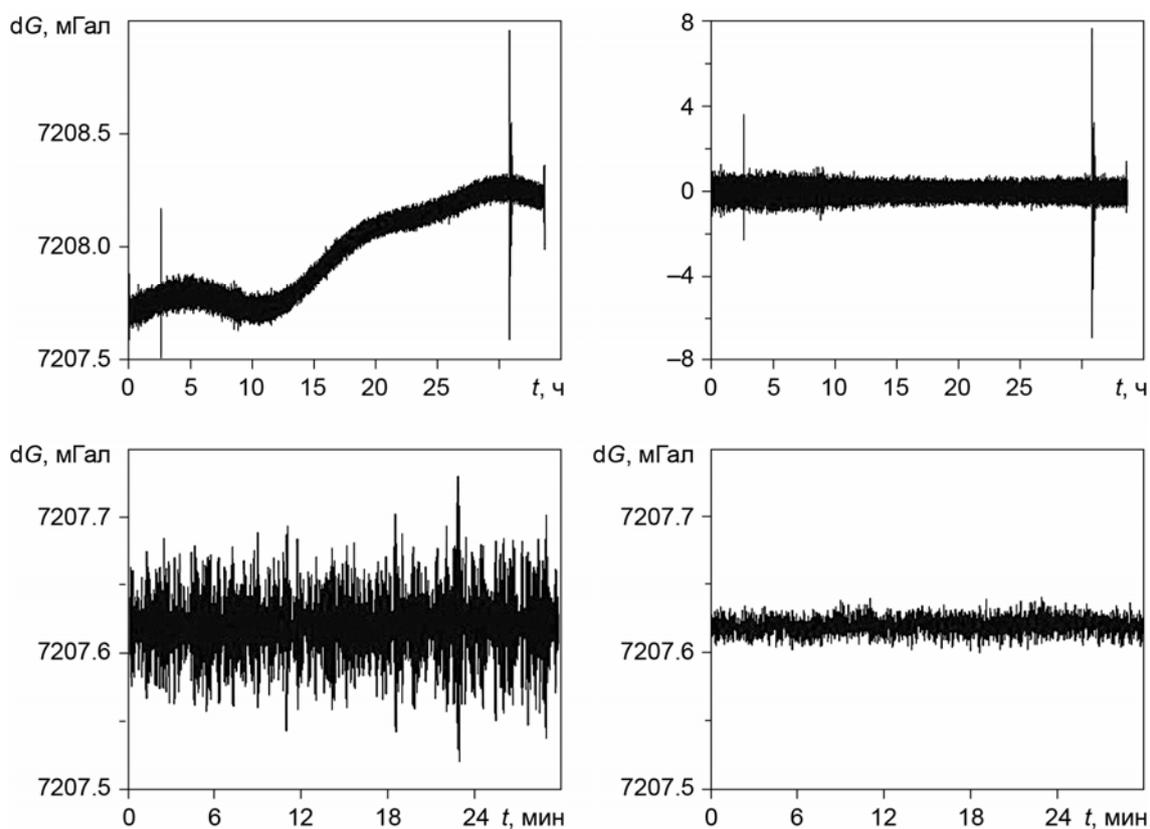


Рис. 4. Шестигерцовые данные: гравиметрические отсчеты за 33 ч измерений (*вверху слева*); смоделированные данные (33-часовой ряд, *вверху справа*); гравиметрические отсчеты за 30 мин измерений (*внизу слева*); то же с учетом сейсмического воздействия (*внизу справа*)

Fig. 4. Data (6Hz): gravimetric samples for 33 hours of measurements (*above on the left*); simulated data (33-hour row, *above on the right*); gravimetric samples for 30 minutes of measurements (*below on the left*); the same, taking into account the seismic impact (*below on the right*)

Учитывая полученный результат, можно сделать вывод, что амплитудно-частотная характеристика сейсмической станции, используемой для расчета гравиметрической поправки, должна попадать в диапазон 1–6 Гц.

Выводы

1. СКО гравиметрических отсчетов характеризует влияние микросейсмических шумов на чувствительный элемент гравиметра.

2. СКО смоделированных данных на основе сейсмических измерений коррелирует с СКО гравиметрических данных с коэффициентом корреляции не ниже 0.9.

3. Рассчитав СКО гравиметрических отсчетов по сейсмическим данным, можно оценить степень пригодности пункта измерений для проведения высокоточной гравиметрической съемки.

4. Для оценки информативности высокочастотных гравиметрических данных применение широкополосных сейсмометров необязательно, так как достаточен диапазон частот 1–6 Гц.

5. Применение моделирования чувствительного элемента гравиметра с сейсмическими данными в качестве входной информации в значительной степени позволяет отделить гравиметрические измерения от инерциального воздействия.

Финансирование

Данная работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Абрамов Д.В., Дорожков В.В., Конешов В.Н.* Особенности построения и использования наземного сейсмогравиметрического комплекса // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 4. С.5–13.
- Абрамов Д.В., Дробышев М.Н., Конешов В.Н.* Оценка влияния сейсмических и метеорологических факторов на точность измерений относительным гравиметром // Физика Земли. 2013. № 4. С.105–110.
- Абрамов Д.В., Конешов В.Н., Дробышев М.Н., Горожанцев С.В.* Комплексование долговременных измерений относительными гравиметрами с сейсмическими наблюдениями // Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории северной Евразии: Материалы международной конференции. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С.7.
- ГОСТ РВ 1.1-96. Государственная система стандартизации Российской Федерации. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. Основные положения. М.: Госстандарт России, 1996.
- Дробышев М.Н., Конешов В.Н.* Оценка предельной точности гравиметра CG-5 Autograv // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 2. С.39–43.
- Дробышев М.Н., Конешов В.Н.* Учет сейсмического воздействия на высокоточные измерения гравиметром CG-5 Autograv // Физика Земли. 2014. № 4. С.131–134.
- Относительный гравиметр CG-5. Система Scintrex Autograv: Руководство по эксплуатации. ред. 4. Онтарио: Scintrex, 2008. 156 с.
- Табулевич В.Н.* Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука, 1986. 149 с.

Цифровая трехкомпонентная сейсмическая станция Угра: Руководство по эксплуатации. Обнинск: ГС РАН, 2005. 57 с.

Boddice D., Atkins P., Rodgers A., Metje N., Goncharenko Y., Chapman D. A novel approach to reduce environmental noise in microgravity measurements using a Scintrex CG5 // *Journal of Applied Geophysics*. 2018. V. 152. P.221–235.

Bychkov S., Mityunina I.Y. Near-Surface Correction on Seismic and Gravity Data // *Journal of Earth Science*. 2015. V. 26, N 6. P.851–857.

Seigel H.O. A guide to high precision land gravimeter surveys. Ontario: Scintrex, 1995. 122 p.

Сведения об авторах

ДРОБЫШЕВ Михаил Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-24-41. E-mail: drmika88@gmail.com

КОНЕШОВ Вячеслав Николаевич – доктор технических наук, профессор, руководитель научного направления, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-23-345. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

АБРАМОВ Дмитрий Владимирович – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(496) 256-13-07. E-mail: mikrogal@yandex.ru

МАЛЫШЕВА Дарья Алексеевна – заведующая лабораториями кафедры Общей и прикладной физики, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. 600005, г. Владимир, ул. Горького, д. 87. Тел.: +7(492) 247-97-78. E-mail: dmalysheva.npa@gmail.com

IMPROVING THE ACCURACY OF GRAVIMETRIC OBSERVATIONS USING SEISMIC INFORMATION

M.N. Drobyshev¹, V.N. Koneshov¹, D.V. Abramov¹, D.A. Malysheva²

¹ *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov, Vladimir, Russia*

Corresponding author: V.N. Koneshov (e-mail: slavakoneshov@hotmail.com)

Abstract. Obtaining the most accurate and reliable gravimetric data has always been and remains the main task of gravimetry. One of the main obstacles during ground gravimetric measurements is seismic impact of both natural and technogenic origin.

The paper considers the seismic effect on high-precision gravimetric measurements as a removable interference, as well as the option of using seismic stations to assess the suitability of an observation point for conducting high-precision gravimetric measurements according to the calculated value of the root-mean-square deviation of measurements of the vertical channel. In order to obtain the necessary experimental data at the “Zapolskoye” test site, in the conditions of a geophysical observatory, gravimetric and seismometric measurements were carried out on the pedestal of a first-class gravimetric station with different recording duration and sampling frequency. To determine the level of seismic vibrations’ influence on high-precision gravimetric measurements, the signal of the gravimeter sensor was simulated using seismic information as input data and the obtained series were compared with gravimetric measurements. In the frequency range of $1.7 \cdot 10^{-2}$ –6.0 Hz, the value of the correlation coefficient between the series does not fall below 0.9.

Experimental results confirm the possibility of using seismometers as a source of additional information about inertial interference when conducting high-precision gravimetric measurements. At the same time, there is a significant decrease in the amplitude of the high-frequency background noise of the gravimetric data. The root-mean-square deviation of the gravimetric readings shows the noise level of the obtained data and is an important characteristic of the accuracy of the performed gravimetric measurements. The possibility of using seismic stations for assessing possible inertial interference at potential points of gravimetric measurements was also confirmed.

Keywords: high-precision gravimetric observations, microseismic vibrations, root-mean-square deviation, assessment of the effect of microseisms on long-term gravimetric measurements.

Funding

This work was carried out within the framework of the state assignment of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Abramov D.V., Dorozhkov V.V., Koneshov V.N., Features of the construction and use of a ground seismogravimetric complex, *Seismicheskie pribory* (Seismic Instruments), 2010, vol. 46, no. 4, pp. 5-13. [In Russian].
- Abramov D.V., Drobyshev M.N., Koneshov V.N., Estimating the influence of seismic and meteorological factors on the accuracy of measurements by relative gravimeters, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2013, vol. 49, no. 4, pp. 548-553.
- Abramov D.V., Koneshov V.N., Drobyshev M.N., Gorozhancev S.V., Integration of long-term measurements with relative gravimeters with seismic observations, in *Razvitie sistem seismologicheskogo i geofizicheskogo monitoringa prirodnykh i tekhnogennykh protsessov na territorii severnoi Evrazii: Materialy mezhdunarodnoi konferentsii* (Development of systems for seismological and geophysical monitoring of natural and man-made processes in the territory of northern Eurasia. Materials of the international conference), Obninsk: FITs EGS RAN, 2017, p. 7. [In Russian].
- Boddice D., Atkins P., Rodgers A., Metje N., Goncharenko Y., Chapman D., A novel approach to reduce environmental noise in microgravity measurements using a Scintrex CG5, *Journal of Applied Geophysics*, 2018, vol. 152, pp. 221-235.
- Bychkov S., Mityunina I.Y., Near-Surface Correction on Seismic and Gravity Data, *Journal of Earth Science*, 2015, vol. 26, no. 6, pp. 851-857.
- Drobyshev M.N., Koneshov V.N., Evaluation of the ultimate accuracy of the CG-5 Autograv, *Seismicheskie pribory* (Seismic Instruments), 2013, vol. 49, no. 2, pp. 39-43. [In Russian].
- Drobyshev M.N., Koneshov V.N., Allowance for seismic impact on high-frequency measurements by the Autograv CG-5 gravimeter, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 588-591.
- GOST RV 1.1-96. Gosudarstvennaya sistema standartizatsii Rossiiskoi Federatsii. Metrologicheskoe obespechenie vooruzheniya i voennoi tekhniki. Osnovnye polozheniya* (GOST RV 1.1-96. State system of standardization of the Russian Federation. Metrological support of weapons and military equipment. Basic provisions), Moscow: Gosstandart of Russia, 1996. [In Russian].
- Otnositel'nyi gravimetr CG-5. Sistema Scmtrex Autograv: Rukovodstvo po ekspluatatsii. red. 4* (Relative gravimeter CG-5. Scmtrex Autograv System: Operation Manual. ed. 4), Ontario: Scintrex, 2008, 156 p. [In Russian].
- Seigel H.O., *A guide to high precision land gravimeter surveys*, Ontario: Scintrex, 1995, 122 p.
- Tabulevich V.N., *Kompleksnye issledovaniya mikroseismicheskikh kolebaniy* (Integrated studies of microseismic vibrations), Novosibirsk: Science, 1986, 151p. [In Russian].
- Tsifrovaya trekhkomponentnaya seismicheskaya stantsiya Ugra: Rukovodstvo po ekspluatatsii* (Ugra digital three-component seismic station: operation manual), Obninsk: GS RAN, 2005, 57 p. [In Russian].

About the authors

DROBYSHEV Mikhail Nikolaevich – Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-24-41. E-mail: drnika88@gmail.com

KONESHOV Viatcheslav Nikolaevich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academic adviser, Head of the laboratory, Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(499) 254-23-45. E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

ABRAMOV Dmitriy Vladimirovich – Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences. Bolshaya Gruzinskaya str., 10-1, Moscow, 123242, Russia. Ph.: +7(496) 256-13-07. E-mail: mikrogal@yandex.ru

MALYSHEVA Daria Alekseevna – Head of laboratories of the department of General and Applied Physics. Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Gorkogo str., 87, Vladimir, 600005, Russia. Ph.: +7(492) 247-97-78. E-mail: dmalysheva.npa@gmail.com