

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШТОРМОВЫХ МИКРОСЕЙСМ НА ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

© 2024 г. М. Н. Дробышев^{1,2, *}, Д. В. Абрамов¹, В. Н. Конешов^{1,2, **}, Д. А. Малышева²

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

²Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия

*E-mail: Drmika88@gmail.com

**E-mail: slavakoneshov@hotmail.com

Поступила в редакцию 03.04.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

В данной работе была проведена оценка уровня влияния штормовых микросейсм на долговременные гравиметрические измерения. Гравиметрические измерения выполнялись в пунктах “Запольское”, “Обнинск” и “Мурманск” относительными гравиметрами CG-5 Autograv. Сейсмические измерения выполнялись параллельно с гравиметрическими в пункте “Запольское”, на основании анализа которых была показана возможность применения сейсмической информации в качестве контрольной для оценки высокочастотной шумовой составляющей гравиметрических данных. Дополнительная сейсмическая информация была взята с сервисов Incorporated Research Institutions for Seismology, по которой было выявлено соответствие затухания шумовой составляющей гравиметрических измерений и данных смоделированного чувствительного элемента гравиметра, использующего сейсмические ряды в качестве входной информации. Была получена первая характеристика фонового шума гравиметрических измерений, вызванного штормами, в пункте г. Мурманск. Также была уточнена возможность прогнозирования погрешности измерений на основе метеорологического прогноза, что может быть полезно при планировании гравиметрических работ.

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

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724010139>, EDN: DRPSXK

ВВЕДЕНИЕ

Выполнение наземной гравиметрической съемки разделяется на два равно необходимых этапа – это выполнение полевых и опорных измерений. При этом точность опорных измерений в значительной степени важна для качества получения данных в полевых условиях, в связи с чем в ИФЗ РАН проводятся исследования по оценке влияния внешних факторов на гравиметрические измерения в условиях геофизических обсерваторий.

Ранее были определены особенности построения и использования наземного сейсмогравиметрического комплекса [Абрамов и др., 2010]. Долговременные измерения, выполняемые с помощью данного комплекса, лежат в основе

дальнейших исследований по комплексной обработке геофизической информации.

При проведении долговременных гравиметрических наблюдений на комплекс влияет множество различных внешних факторов. Наиболее значительное воздействие на гравиметрические измерения оказывают приливные, сейсмические и метеорологические явления. В ходе проведенных ранее исследований определен уровень влияния землетрясений и метеорологических факторов, в том числе сезонных [Абрамов и др., 2013б; Дробышев 2014; Малышева и др., 2018; Конешов и др., 2023]. Оценен вклад в погрешность измерений неполного или ошибочного учета приливного и сейсмического воздействия по работам [Абрамов и др., 2013а; Дробышев, Конешов, 2013; 2014]. Оценена степень

возможного учета сейсмического воздействия, рассмотрена возможность использования сейсмических станций для оценки степени пригодности точек наблюдений к проведению высокоточных гравиметрических измерений и т.д. [Абрамов и др., 2016; Дробышев и др., 2021; 2022] Результаты полученные в ходе исследований могут быть использованы в практической гравиметрии, при мониторинге нефтегазовых месторождений, объектов промышленности и проведении разведывательных экспедиций [Кривицкий, 2012; Грушинский, 1981].

Оценка влияния штормовых микросейсм на долговременные гравиметрические измерения является развитием идеи использования сейсмических станций для оценки степени пригодности пунктов к гравиметрическим наблюдениям. Штормовые микросейсм представляют особый интерес для исследований проводимых относительно гравиметрами, поскольку они вызваны процессами, имеющими повторяемость и разграничения по силе вызывающих их явлений [Рыкунов, 1967; Любушин, 2014; Соболев и др., 2008; Соболев, 2014; Arduin et al., 2011; Friedrich, 1998; Rhee, Romanowicz, 2006].

Целью данной работы является определение уровня влияния штормовых микросейсм на долговременные гравиметрические измерения, выполняемые на различной удаленности от источника, с помощью сейсмометрических данных. Также, учитывая наличие метеорологического прогноза, оценить возможность прогнозирования погрешности гравиметрических измерений на его основе.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Взаимосвязь данных наземной гравиметрии и сейсмометрии является следствием того, что гравиметр и сейсмометр, действующие на одних физических принципах, устанавливаются на земной поверхности и регистрируют реакцию опоры, каждый в своей полосе пропускания. Сейсмические эффекты, попадающие в полосу пропускания гравиметра, являются помехой для гравиметрических измерений, причем иногда настолько значительной, что встроенная программная и аппаратная системы фильтрации не помогают полностью исключить их влияния [Дробышев и др., 2021; Voddice et al., 2018].

Ранее была предложена концепция математической модели чувствительного элемента гравиметра, использующей в качестве входных данных информацию, полученную с сейсмической

станции, которая позволила в значительной мере снизить эффект, оказываемый сейсмическими событиями на гравиметрические измерения [Дробышев, Конешов, 2014]. Реализация математической модели заключается в решении дифференциального уравнения колебательного звена с предварительным подбором коэффициента затухания и частоты собственного колебания маятника, максимально соответствующих данному прибору [Солодовников и др., 1993]. Далее по алгоритму, аналогичному алгоритму гравиметра, по полученным данным рассчитывается модельное значение сейсмической поправки и среднеквадратического отклонения (СКО) [Дробышев, Конешов, 2014]. По тексту статьи под сейсмическими данными будет пониматься именно СКО результатов математического моделирования чувствительного элемента гравиметра с различными сейсмометрическими измерениями в качестве входного сигнала.

В работе использовались данные, полученные одним из наиболее распространенных наземных относительных гравиметров Scintrex CG-5 Autograv, сейсмической станцией UGRA с тремя однокомпонентными датчиками CM3-OC и сейсмометрами Streckeisen STS-1 [Цифровая..., 2005; Относительный..., 2008; Manual 1986]. Гравиметрические измерения выполнялись в геофизической обсерватории "Запольское" во Владимирской области на постаменте гравиметрического пункта первого класса [ГОСТ РВ 1.1-96; Seigel, 1995].

Гравиметр регистрирует приращение силы тяжести и значение СКО, рассчитанное за время, указанное оператором, таким образом, СКО характеризует погрешность полученного единичного отсчета. Совместно с гравиметром велась запись сейсмической станцией UGRA. Приборы были установлены на одном постаменте, что позволяет считать зарегистрированные инерционные помехи идентичными по происхождению. На рис. 1 представлены ряды СКО гравиметрических данных и СКО рассчитанного по сейсмометрическим измерениям.

Использование разработанной модели чувствительного элемента гравиметра позволяет по величине сейсмического воздействия оценить значение СКО гравиметрических наблюдений. Сейсмические данные имеют техногенное или природное происхождение, последние можно разделить на сейсмические события и микросейсмический шум. В данной работе рассматриваем влияние на гравиметрические измерения микросейсмического шума природного

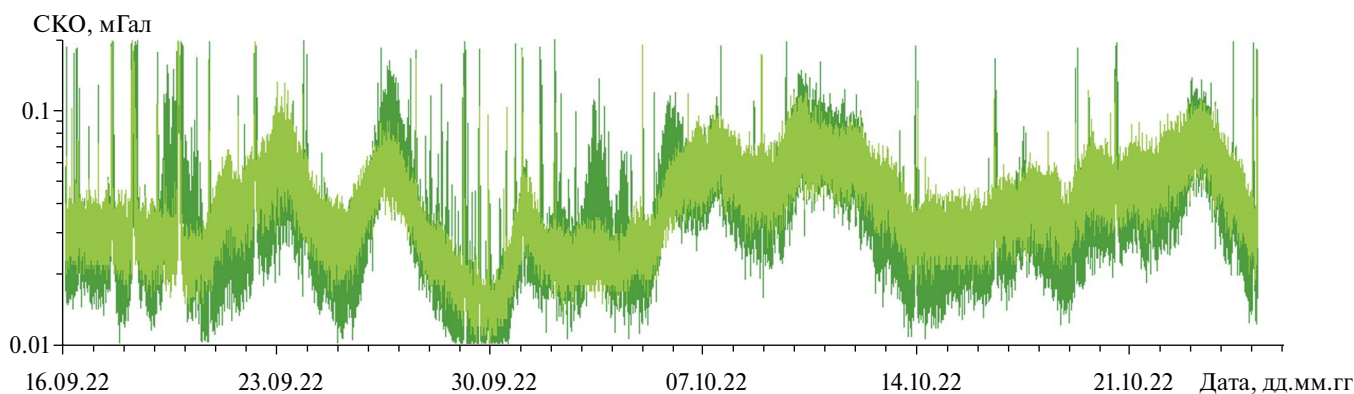


Рис. 1. Ряд СКО гравиметрических данных, полученный с прибора (светло-зеленый) и ряд СКО, рассчитанный по сейсмометрическим измерениям (темно-зеленый).

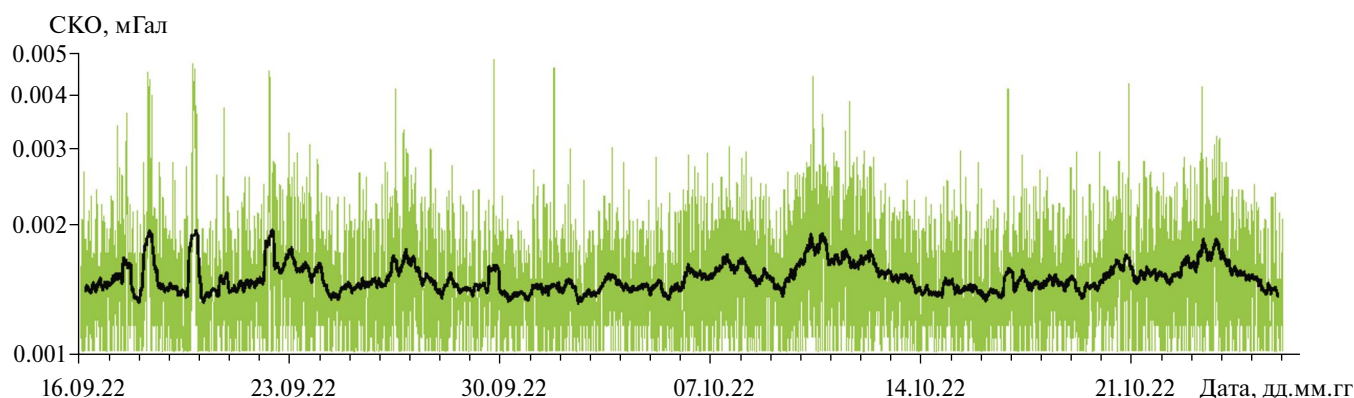


Рис. 2. Пятиминутное СКО, рассчитанное по минутным гравиметрическим отсчетам (светло-зеленый); трех-часовое среднее (черный).

происхождения, а именно штормовых микро-сейсм, не углубляясь в причины их вызывающие.

В современных гравиметрах предусмотрена система сейсмической фильтрации, но, несмотря на это, наблюдается остаточная зашумленность, вызванная тем, что в гравиметре микро-сейсмические воздействия устраняются простым осреднением [Voddice et al., 2018]. Для оценки зашумленности гравиметрического ряда было рассчитано СКО по 5-минутным отрезкам гравиметрических данных, а затем проведено осреднение скользящим 3-х часовым окном (рис. 2).

Частичное совпадение характера изменения графиков на рис. 1 и рис. 2 говорит о неполной компенсации сейсмической зашумленности математическим аппаратом гравиметра. Амплитудные отклонения отсчетов достигают 2 мГал, что в целом незначительно, но это с учетом того, что измерения проводились в сейсмически тихом месте, вдалеке от источников шума.

При мониторинге нефтегазовых месторождений, объектов промышленности и проведении разведывательных экспедиций зачастую требуется точность до 5 мГал и такая неточность уже ощутима, не говоря про то, что при приближении к источнику ошибка также будет возрастать [Кривицкий 2012; Грушинский, 1981].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа взаимосвязи повышенного значения СКО гравиметрических данных и штормов в северных морях использовался открытый сервис Ventusky.com, который также дает прогноз погодных условий на неделю вперед. Измеренное гравиметром СКО было условно разделено по интенсивности на 4 группы, которым соответствовала различная высота волн в указанных акваториях. Для 1 группы – это 1–2 м (практически штиль), для 2 группы – 2–3 м, для 3 группы – 4–5 м, а для 4 группы высота волн достигает 5 м и выше (рис. 3).

Зафиксированный микросейсмический шум, мог быть вызван различными явлениями, но корреляция наблюдается прежде всего с высотой волн во время штормов у побережья Норвегии и севера России [Табулевич, 1986; Монахов, 1977; Рыкунов, 1967].

Для оценки степени затухания шумового воздействия на гравиметрические измерения рассмотрим величину помех на проведенных ранее синхронных измерениях в Мурманске и Обнинске [Абрамов и др., 2020]. СКО измерений в Обнинске разделено по интенсивности, аналогичной измерениям во Владимире (рис. 4). У берегов Норвегии 18.03.2018 г. зафиксирован шторм с высотой волн, превышающей 7 м, направленных в сторону берега. Далее наблюдается синхронное снижение зашумленности, до вечера 24 марта, когда в Обнинске происходит повышение СКО, вероятно связанное с прохождением антициклона, вызвавшего увеличение атмосферного давления примерно на 10 мБар.

На примере шторма 18.03.2018 г. хорошо видно увеличение уровня зашумленности данных при приближении к эпицентру событий. СКО в Мурманске достигает 0.6 мГал, в то время как в Обнинске этот же шторм вызвал повышение до 0.2 мГал.

Основываясь на полученных ранее результатах математического моделирования, которые подтверждают общую идентичность свойств СКО модельного и гравиметрических рядов, была проведена оценка уровня зашумленности в пунктах на различной удаленности от береговой линии по сейсмометрическим измерениям. Для оценки влияния прибойных волн на пунктах наблюдений использовалась сейсмометрическая информация, взятая в базе данных международной организации Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS). В пунктах были расположены идентичные сейсмометры Streckeisen STS-1 [Manual..., 1986].

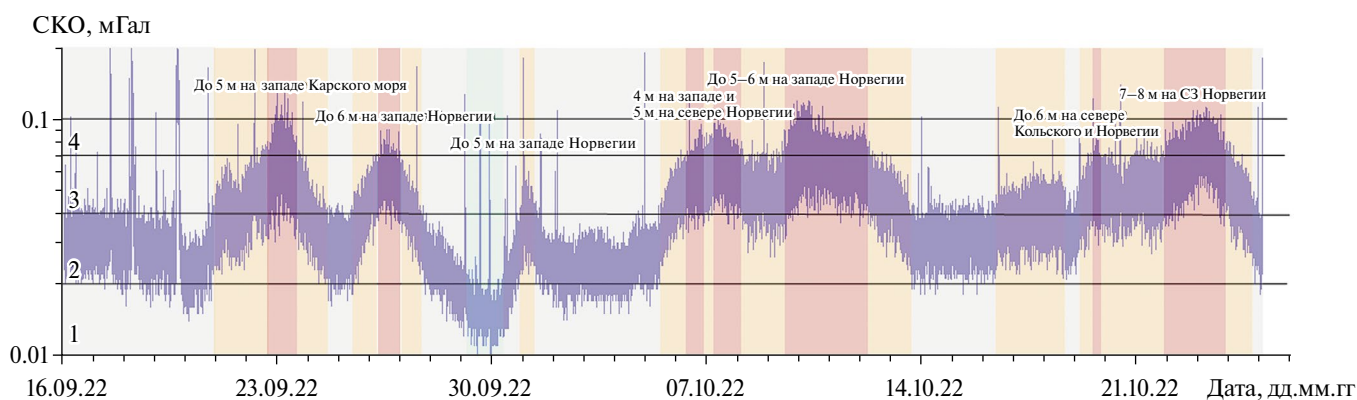


Рис. 3. Измеренное гравиметром СКО, разделенное на группы по интенсивности (горизонтальные черные линии); для 4 группы интенсивности указана высота волн и примерное место штормов.

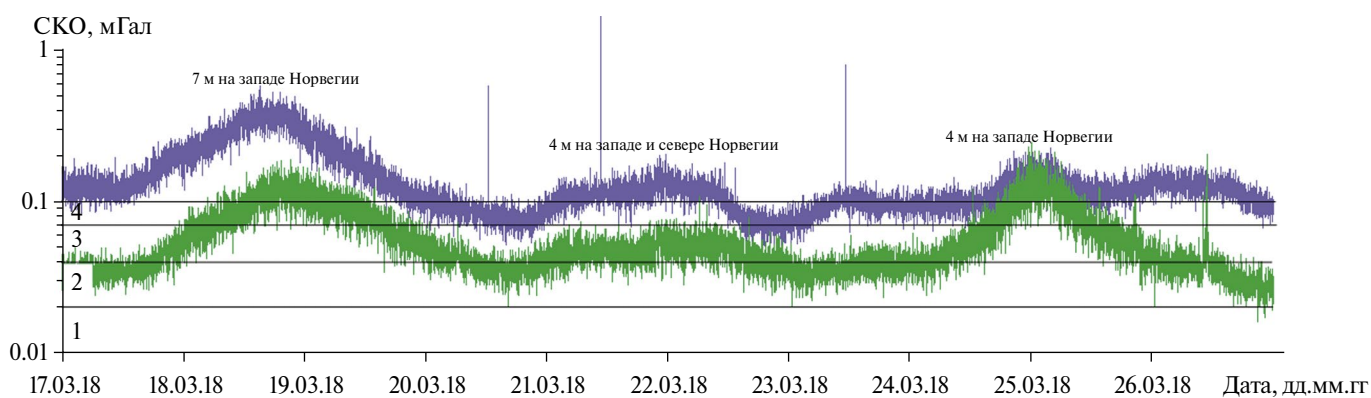


Рис. 4. СКО гравиметрических измерений в Мурманске (синий) и Обнинске (зеленый). Горизонтальными черными линиями показано деление на группы по интенсивности шумов в Обнинске.

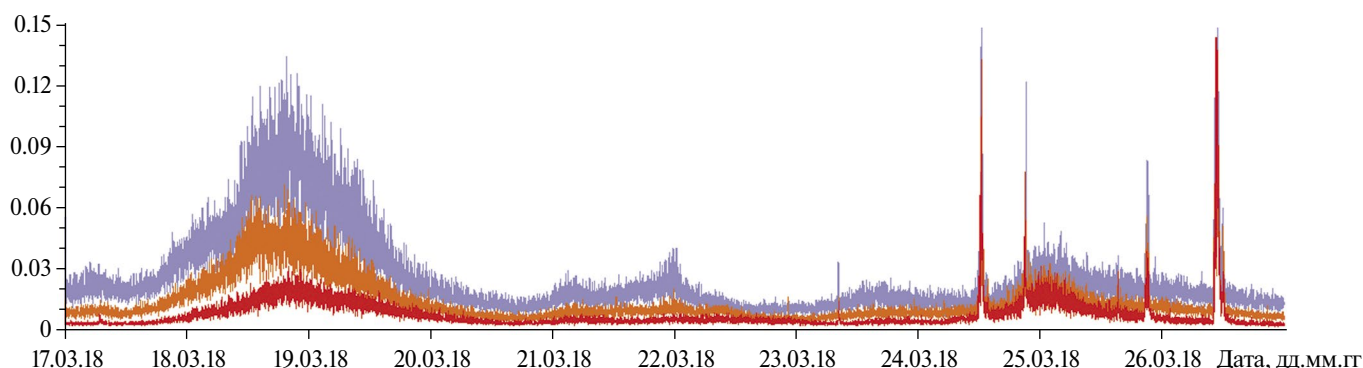


Рис. 5. СКО модельных данных сейсмических станций Обнинск (красный), Ловозеро (оранжевый) и Кево (синий).

На рис. 5 представлено СКО, рассчитанное по сейсмическим данным для трех исследуемых пунктов: Кево, Обнинск и Ловозеро. Из графиков видно, что СКО, зарегистрированное в Обнинске, достигает 0.03 (безразмерная величина) в пике шторма, в то время как в пункте Кево (Утсйоки, Финляндия), СКО достигает уже 0.13. Данные с пункта Ловозеро, находящегося на среднем расстоянии от источника, также расположены и на графике с максимумом СКО 0.06.

Интенсивность шума в пункте Кево, наиболее близком к береговой линии Норвегии, выше интенсивности шума в пункте Обнинск примерно в 4 раза. Отношение интенсивности шума гравиметрических измерений в пунктах Мурманск и Обнинск составило около 3, что меньше чем на сейсмических данных, но и Мурманск примерно на 260 км дальше от берега Норвегии, чем пункт Кево, в результате чего коэффициент соотношения можно считать заниженным, а результаты сопоставимыми. Для точного определения соотношения безусловно необходимо провести синхронные измерения не только гравиметрами, но и сейсмометрами, что является одним из планов будущих работ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Показана зависимость интенсивности шумовой составляющей гравиметрических измерений, проводимых на разном удалении от побережья. Кроме того, было замечено, что величина СКО гравиметрических измерений зависит не только от высоты волн, но и от их направленности относительно береговой линии. Максимум погрешность достигает при направлении волн, ортогональном берегу. На основе проведенных гравиметрических измерений в Мурманске была составлена таблица соответствия уровня

зашумленности от силы штормов, являющаяся первой характеристикой зашумленности пункта.

Расчет подобной характеристики на пункт опорных гравиметрических измерений для процесса мониторинга нефтегазовых месторождений, объектов промышленности и проведения разведывательных экспедиций даст объективное представление об интенсивности шумовой составляющей, в частности в осенне-зимний период, характеризующийся повышенной штормовой активностью.

Полученные зависимости являются первой характеристикой зашумленности гравиметрических измерений в пункте, которая может быть рассчитана без проведения долговременных измерений геофизическим комплексом.

Учитывая наличие недельного метеорологического прогноза на примере сервиса Ventusky.com в части силы штормов и направления ветра, можно с определенной вероятностью прогнозировать качество выполняемой высокоточной гравиметрической съемки. Проведенные недельные наблюдения показали, что точность прогноза может быть достаточной для внесения коррективов в процесс измерений, например, приближение штормовой волны к береговой линии, прогнозируемое на

Уровень зашумленности гравиметрических измерений в пункте Мурманск, разделенный по группам, в зависимости от силы штормов

Группа	Высота волн	СКО, мГал	dG , мкГал
1	2–3	До 0.1	До 0.005
2	3–4	0.1–0.2	0.005–0.015
3	4–5	0.2–0.3	0.015–0.02
4	5 и выше	0.3 и более	0.02 и более

7-й день в 18:00, произошло в итоге в 12:00, что говорит о том, что данные прогноза следует учитывать при долгосрочном планировании как один из факторов, способствующих повышению точности съемки.

ВЫВОДЫ

1. Подтверждено значительное влияние штормовых микросейсм на высокоточные гравиметрические измерения, величина погрешности составляет порядка первых десятков мкГал, что важно для процесса мониторинга нефтегазовых месторождений, объектов промышленности и проведения разведывательных экспедиций.

2. На примере штормовых микросейсм оценено соответствие изменения шумовой составляющей, вызванного удаленностью пункта наблюдений от акваторий подверженных штормам в модельных данных, полученных по сейсмометрическим измерениям выполненным различными сейсмометрами, и в гравиметрических отчетах, полученных идентичными поверенными приборами.

3. При наличии метеорологического прогноза в части силы штормов и направления ветра, можно запланировать возможное внесение коррективов в процесс выполнения полевых измерений и высокоточной гравиметрической съемки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, а также при финансовой поддержке РНФ в рамках гранта 22-17-20035.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абрамов Д.В., Бебнев А.С., Бычков С.Г., Горожанцев С.В., Герман В.И., Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Красилов С.А., Овчаренко А.В., Юшкин В.Д. Одна из возможных причин синхронных континентальных микросейсм Северной Евразии // *Физика Земли* 2020. № 4. С. 123–131.

Абрамов Д.В., Дорожков В.В., Конешов В.Н. Особенности построения и использования наземного сейсмометрического комплекса // *Сейсмические приборы*. 2010. Т. 46. № 4. С. 5–13.

Абрамов Д.В., Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Уточнение значений дельта-фактора на фундаментальном гравиметрическом пункте “Долгое Ледово” // *Физика Земли*. 2013а. № 1. С. 84–87.

Абрамов Д.В., Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Оценка влияния сейсмических и метеорологических факторов на точность измерений относительным гравиметром // *Физика Земли*. 2013б. № 4. С. 105–110.

Абрамов Д.В., Конешов В.Н., Чебров В.Н. Совершенство-вание методики долговременных наблюдений относительным гравиметром CG-5 // *Сейсмические приборы*. 2016. Т. 52. № 3. С. 20–26.

ГОСТ РВ 1.1-96. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. Основные положения. М.: Госстандарт России. 1996.

Грушинский Н.П., Сажина Н.Б. Гравитационная разведка, издание третье. М.: Недра. 1981.

Дробышев М.Н., Абрамов Д.В., Конешов В.Н., Малышева Д.А. Оценка влияния перепада температуры на гравиметрические измерения при смене пункта наблюдений // *Сейсмические приборы*. 2022. Т. 58. № 2. С. 75–84. DOI: 10.21455/si2022.2-4

Дробышев М.Н. Исследование динамики изменения углового положения гравиметрического постаменты с помощью комплекса геофизической аппаратуры // *Сейсмические приборы*. 2014. Т. 50. № 2. С. 70–76.

Дробышев М.Н., Конешов В.Н., Абрамов Д.В., Малышева Д.А. Повышение точности гравиметрических наблюдений с помощью сейсмической информации // *Геофизические исследования*. 2021. Т. 22. № 3. С. 26–34.

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.

Конешов В.Н., Абрамов Д.В., Дробышев Н.В., Малышева Д.А. Оценка влияния влажности на долговременные высокоточные измерения гравиметром CG-5 Autograv // *Геофизические исследования*. 2023. Т. 24. № 2. С. 84–91.

Кривицкий Г.Е., Андреев О.П., Кобылкин Д.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Безматерных Е.Ф. Гравиметрический контроль разработки газовых и газоконденсатных месторождений. ООО Газпром добыча Ямбург. 2012. 126 с.

Любушин А.А. Анализ когерентности глобального сейсмического шума, 1997–2012 // *Физика Земли*. 2014. № 3. С. 18–27.

Малышева Д.А., Абрамов Д.В., Дробышев М.Н., Конешов В.Н. Влияние метеофакторов на уровень микросейсмического фона при долговременных гравиметрических наблюдениях с погрешностью порядка первых микрогал // *Сейсмические приборы*. 2018. Т. 54. № 1. С. 19–28. DOI: 10.21455/si2018.1-2

Монахов Ф.И. Низкочастотный сейсмический шум Земли. М.: Наука. 1977. 94 с.

Относительный гравиметр CG-5. Система Scintrex Autograv: руководство по эксплуатации, ред. 4. 2008. 156 с.

- Рыкунов Л.Н. Микросейсмы. Экспериментальные характеристики естественных микровибраций грунта в диапазоне периодов 0.07–8 сек. М.: Наука. 1967. 86 с.
- Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А. Асимметричные импульсы, периодичности и синхронизация низкочастотных микросейсм // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 135–152.
- Соболев Г.А. Сейсмический шум. М.: ООО “Наука и образование”. 2014. 272 с.
- Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1993. 493 с.
- Табулевич В.Н. Комплексные исследования микросейсмических колебаний. Новосибирск: Наука. 1986. 151 с.
- Цифровая трехкомпонентная сейсмическая станция Угра: руководство по эксплуатации. Обнинск. 2005. 57 с.
- Ardhuin F., Stutzmann E., Schimmel M., Mangeney A., Ocean wave sources of seismic noise // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C09004.
- 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.
- Friedrich A., Krüger F., Klinge K. Ocean-generated microseismic noise located with the Gräfenberg array // J. Seismol. 1998. V. 2 (1). P. 47–64.
- Rhie J., Romanowicz B. A study of the relation between ocean storms and the Earth’s hum, *Geochem // Geophys. Geosyst.* 2006. V. 7 (10). <https://doi.org/10.1029/2006GC001274>
- Seigel H.O. A guide to high precision land gravimeter surveys. 1995. V. 122.
- Very-broad-band feedback seismometers STS-1V/VBB and STS-1H/VBB. Manual. 08-Jul-1986. 86 p.

Estimate of the Impact of Storm Microseisms on Long-Term Gravimetric Measurements

M. N. Drobyshev^{a,b, *}, D. V. Abramov^a, V. N. Koneshov^{a,b, **}, and D. A. Malysheva^b

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^b*Vladimir State University, Vladimir, 600000 Russia*

**e-mail: Drmika88@gmail.com*

***e-mail: slavakoneshov@hotmail.com*

Received April 3, 2023

revised July 6, 2023

accepted July 11, 2023

Abstract – This study estimates the impact level of storm microseisms on long-term gravimetric measurements. Gravimetric measurements were conducted at the Zapolskoe, Obninsk, and Murmansk sites using CG-5 Autograv relative gravity meters. Seismic measurements were carried out concurrently with gravimetric measurements at Zapolskoe. The analysis of these measurements demonstrates the feasibility of utilizing seismic data as control information to estimate the high-frequency noise component of gravimetric data. Based on the additional seismic information from the services of the Incorporated Research Institutions for Seismology, the correspondence between the attenuation of the noise component in gravimetric measurements and the data from the modeled sensitive element of the gravimeter, which utilizes seismic series as an input, is identified. The first characterization of the storm-induced background noise of gravimetric measurements at the Murmansk site is obtained. Furthermore, the possibility of predicting measurement errors based on meteorological forecasts is refined, which can aid in the planning of gravimetric work.

Keywords: high-precision gravimetric observations, microseismic oscillations, standard deviation, estimate of microseism impact on long-term gravimetric measurements