

УДК 550.831

Способы учета интенсивных помех в гравиметрии на примере наледной съемки

Н.О. Медведев^а, Н.П. Сенчина^б, Л.М. Буданов^с, Г.В. Смук^д

^а Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского 199106, Санкт-Петербург, Средний проспект В.О., д. 74.

E-mail: Nikita_Medvedev@karpinskyinstitute.ru

^б Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2.

ООО Сервисная геолого-геофизическая компания «ДЖИ М Сервис»

195274, Санкт-Петербург, Проспект просвещения, д. 53, корп. 1, апш. 195.

E-mail: n_senchina@mail.ru

^с Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского 199106, Санкт-Петербург, Средний проспект В.О., д. 74.

E-mail: Leonid_Budanov@karpinskyinstitute.ru

^д Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2.

E-mail: georgii.smuk@gmail.com

(Статья поступила в редакцию 17.03.2025)

В работе рассматриваются особенности полевых наблюдений и обработки данных наледной гравиметрической съемки, способствующие снижению уровня помех и достижению высокой точности измерений силы тяжести. Систематизируются рекомендации по проведению наледных съемок, включая сокращение длительности рейса, использование вариационной станции, применение сейсмических датчиков для учета помех в постобработке данных и др. Выполненные экспериментальные наблюдения с помощью современных высокоточных относительных цифровых гравиметров Scintrex CG-5 и CG-6 позволяют сравнить эффективность различных способов борьбы с помехами, связанными с неустойчивостью ледового покрова, на котором расположен гравиметр. Разработан авторский алгоритм обработки временных рядов гравиметров Scintrex CG-5, Scintrex CG-6, включающий разбиение данных по пикетам, сортировку значений с датчика силы тяжести по времени, введение поправок в мГал за температуру, наклон и лунно-суточное влияние, последующую фильтрацию данных и экспорт данных в формате *.dat файла. Обработка временных рядов данных гравиметров позволила значительно улучшить качество гравиметрических наблюдений.

Ключевые слова: *гравиразведка, гравиметрия, наледная гравиразведка, лед, палеодолины, помехи.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 24.3.243

Введение

Наземные гравиметрические съемки с использованием современных гравиметров позволяют достигать точности определения поля силы тяжести в первые десятки мГал. При этом чаще всего применяется стандартный граф обработки полевых материалов (Пугин, 2019). Однако в случае высокого уровня помех, например при съемке на льду, покрывающем водоем, стандартная методика

обработки гравиметрических данных не позволяет получить столь высокие точности (Медведев и др., 2024а).

Первые гравиметрические съемки на акваториях в СССР были проведены в 1933–1935 гг. Сорокиным Л.В. (Серкеров, Левицкая, 2003). Маятниковые наблюдения проводились на морях и океанах в подводных лодках. Конструкцию аппаратуры и методику наблюдений разработал Ф.А. Венинг-Мейнес. До определений Венинг-Мейнеса никакой

© Медведев Н.О., Сенчина Н.П., Буданов Л.М., Смук Г.В., 2025



Работа лицензирована в соответствии с CC BY 4.0. Чтобы просмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

информации об интенсивности гравитационного поля на акваториях не было. Он проложил маршруты через Атлантический, Тихий и Индийский океаны, а между Индонезийскими островами впервые провел площадную съемку на акватории. Вскоре по его методике провел определения силы тяжести на Черном, а затем на Охотском море Л.В. Соколин. На Каспийском море, устанавливая прибор на барже, наблюдения проводил В.В. Федынский. В Северном Ледовитом океане наблюдения проводились на дрейфующих судах и льдах. Аномалии при морских определениях получены с ошибками в 5–10 мГал (Пугин, 2019), что на несколько порядков выше погрешностей, получаемых при наземных измерениях.

Наряду с морскими съемками в СССР проводились также и съемки на льду. Были изданы руководящие документы для съемки на льду (Руководящий технический материал..., 1982). Однако в связи с относительно низкой точностью гравиметров тех времен в данном руководстве рассматриваются только съемки масштаба 1:100 000 и мельче. Сечение изоаномал для съемки масштаба 1:100 000 – 1 мГал.

С появлением гравиметров, позволяющих проводить съемки с микрогальной точностью, актуальность исследований на льду резко возросла. Наледная гравиметрия позволяет решать инженерные и поисковые задачи в транзитных зонах (Широкова и др., 2020; Шклярчук и др., 2025). Однако в перечисленных публикациях авторы проводили съемку и обработку практически по стандартной методике. В таком случае точность съемки очень сильно зависит от погодных, в первую очередь ветровых, условий. При этом время наблюдения на точке может достигать 30 мин. и более.

Гравиметры Scintrex CG-5 и Scintrex CG-6 позволяют записывать «сырые» данные – временные ряды наблюдений силы тяжести с частотой 6 Гц для CG-5 и 10 Гц для CG-6. Использование и обработка этих данных дают возможность отфильтровать большую часть сейсмических помех, характерных для съемки на льду, тем самым улучшив качество материалов.

Обработка «сырых» данных используется в основном в долговременных мониторинго-

вых наблюдениях. Коллегами из ИФЗ РАН проведены долговременные наблюдения на гравиметрическом пункте 1-го класса с оценкой воздействия микросейсм на показания гравиметра (Дробышев и др., 2021). Кроме того, проведен ряд опытно-методических работ по гравиметрическому мониторингу газовых месторождений на пунктах, расположенных на льду (Меньшиков и др., 2022). В указанных работах авторы демонстрируют теоретическую возможность получить точность порядка 0,005 мГал в условиях сильных сейсмических помех при долговременных наблюдениях по специальной методике. Кроме того, показана возможность улучшить качество гравиметрических данных в постобработке при помощи совместных непрерывных GPS-наблюдений на льду (Веселов и др., 2019), а также при помощи синхронной регистрации сейсмических колебаний (Andreev, Muhamadiev, 2018; Дробышев и др., 2021; Андреев и др., 2023; Меньшиков и др., 2024).

Авторы учли опыт коллег в методике проведения наледных гравиметрических исследований (Веселов и др., 2019; Широкова и др., 2020; Шклярчук и др., 2020), а также опробовали различные подходы к обработке «сырых» данных в полевой наледной съемке. Это позволило значительно ускорить проведение работ без дополнительных временных и трудовых затрат на проведение съемки, а также улучшить качество данных. В 2023 и 2024 гг. авторами были выполнены профильные гравиметрические измерения на Сестрорецком разливе, а также в береговой зоне в восточной части Финского залива (Медведев и др., 2024в). Съемка проводилась со льда в зимнее время при различных погодных, в первую очередь ветровых, условиях (Медведев и др., 2024б; 2024в). В ходе проведения наблюдений были опробованы различные методики повышения качества получаемых материалов, которые могут быть разделены на две категории:

- 1) методика проведения съемки;
- 2) методика обработки гравиметрических данных.

Основные методические особенности проведения и обработки наледных гравиметрических съемок описаны в предыдущих статьях авторов (Медведев и др., 2023;

2024а; 2024б; 2024в). Цель представленной работы – объединить и систематизировать информацию по повышению качества гравиметрических съемок на льду.

Уровень сейсмических помех, вызванных колебаниями ледовой толщи, а также ветровым воздействием на гравиметр, ледовую и водную поверхность водоема, кратно превышает уровень помех в классической наземной гравиметрии. Методика проведения наледной гравиметрической съемки должна быть подобрана таким образом, чтобы минимизировать все возможные помехи, и должна включать в себя:

- **сокращенную длительность гравиметрического рейса** для минимизации влияния нелинейного смещения нуля-пункта гравиметра;

- **повышенное количество контрольных наблюдений.** Повторные наблюдения необходимы для оценки качества гравиметрической съемки. В условиях повышенного уровня сейсмических помех особенно важно получить большой набор данных на каждом пикете. В зависимости от погодных условий в некоторых случаях необходимо проведение съемки по методике со 100 %-м повторением измерений. Для акваторий с сильными приливо-отливными воздействиями проведение контрольных измерений желательно осуществлять в другой фазе прилива (отлива);

- **измерение группой гравиметров.** Одновременные измерения группой из нескольких приборов позволяют получить большую выборку значений, что критически важно при последующей обработке данных;

- **циклы измерений по 120 сек., не менее 5 циклов наблюдений на точке.** Сейсмические помехи при измерениях на льду имеют ярко выраженные отличающиеся низкочастотные и высокочастотные составляющие. Низкочастотные колебания авторы связывают с движением ледовой толщи под воздействием ветра и волн. Период этих колебаний, в зависимости от водоема и погодных условий, меняется в широких пределах: от десятков секунд, до десяти и более часов. Высокочастотные колебания, вероятно, могут быть связаны с воздействием резких порывов ветра на гравиметры, операторов и ледовую толщу, а также с тресканием льда.

Наибольшая длительность единичного измерения, доступная в настройках гравиметра Scintrex CG-6, составляет 120 сек. Для корректного осреднения гравиметром значений поля силы тяжести необходимо накопление как можно большего числа гармоник. Измерение нескольких циклов позволяет получить более надежные данные. В случае, если период сейсмической волны значительно больше цикла измерения, осредненные гравиметром значения будут плавно увеличиваться или уменьшаться, не позволяя оценить реальное среднее. Кроме того, на этот эффект будут накладываться высокочастотные ветровые помехи, которые могут случайным образом влиять на осредненное значение, осложняя обработку по стандартной методике. В качестве примера приведем данные из *.dat файла гравиметра CG-5, полученные во время съемки на пикете № 3 18.02.23 на льду Сестрорецкого разлива (рис. 1), где были зарегистрированы наиболее интенсивные помехи. Максимальная величина относительного значения GRAV на данном пикете равнялась 7859,269 мГал, минимальная – 7855,455 мГал, разница составляет 3,814 мГал при максимальных SD (среднеквадратических отклонениях внутри цикла измерения) 17,596 мГал. Измерения длились 15 мин., использование таких данных для последующей обработки по стандартному графу невозможно;

- **запись «сырых данных» гравиметрических наблюдений.** Наиболее действенным способом учета сейсмических помех при проведении наледной гравиметрической съемки на данный момент является запись «сырых данных» («raw data») с их последующей обработкой по специальному графу. «Сырые данные» представляют собой набор значений с датчиков силы тяжести, записанных с частотой 6 и 10 Гц для гравиметров CG-5 и CG-6 соответственно (Operation Manual CG-5, 2012; Operation Manual CG-6, 2020). Также в файле присутствуют данные с датчиков углов наклона и температуры, записанные с частотой 6 (CG-5) и 1 (CG-6) Гц. При использовании специального графа обработки «сырых данных» возможна фильтрация сейсмических помех, которая позволяет существенно улучшить качество данных;

- **защита гравиметра от ветра; использование специальных подставок.** При околонулевых температурах окружающей среды тренога гравиметра будет неизбежно плавить лед, вызывая наклон гравиметра. Оптимальным является измерение с наклонами по направлениям X и Y, не превышающими 10 угловых секунд, поэтому значимо даже небольшое таяние льда под ножками стандартной треноги гравиметра. Для мини-

мизации данного воздействия на гравиметр возможно использование специальных подставок, ввинчиваемых в лед (Andreev, Muhamadiev, 2018; Медведев и др., 2024а). Для уменьшения воздействия высокочастотных ветровых помех возможно использование специального оборудования – коробов, палаток или других ветрозащитных сооружений (Andreev, Muhamadiev, 2018; Меньшиков и др., 2022);

```

/      DriftDate Start:      18.02.2023
/
/      CG-5 OPTIONS
/      Tide Correction:      YES
/      Cont. Tilt:           YES
/      Auto Rejection:       YES
/      Terrain Corr.:        NO
/      Seismic Filter:       YES
/      Raw Data:             YES
Line   0.000s
LINE-STATION---ALT.---GRAV.---SD.---TILT---TILTY---TEMP---TIDE---DUR---REJ---TIME---
1      3      0.12    7857.683  3.147  -20.4  -6.3  0.36  0.008  30  0  13:50:46
1      3      0.12    7856.428  8.183  -27    -25.2 0.36  0.008  30  0  13:51:22
1      3      0.12    7856.373  4.65   -18.7  -25.9 0.36  0.009  30  0  13:51:56
1      3      0.12    7857.004  3.674  -36.3  -34.6 0.35  0.009  30  0  13:52:30
1      3      0.12    7855.713  5.582  -12.3  -28.8 0.35  0.009  30  0  13:53:05
1      3      0.12    7856.468  5.912  -5     -6.4  0.34  0.011  30  0  13:54:47
1      3      0.12    7856.773  5.026  2.6   -17.9 0.34  0.011  30  0  13:55:23
1      3      0.12    7856.745  6.667  -19.8 -39.5 0.33  0.011  30  0  13:55:57
1      3      0.12    7855.963  7.917  -28   -14.2 0.33  0.011  30  0  13:56:31
1      3      0.12    7858.333  8.889  -17.2 -20.8 0.32  0.012  30  0  13:57:06
1      3      0.12    7856.817  14.295 -25.3 -37.7 0.32  0.012  30  0  13:57:52
1      3      0.12    7855.455  13.287 -20   -39.2 0.31  0.012  30  0  13:58:28
1      3      0.12    7857.63   4.983  -14.4 -43.7 0.31  0.013  30  0  13:59:02
1      3      0.12    7859.269  7.647  -11   -41.2 0.31  0.013  30  0  13:59:36
1      3      0.12    7857.22   5.181  -9.1  -35.4 0.3   0.013  30  0  14:00:11
1      3      0.12    7857.548  5.461  3.5   -52.5 0.29  0.015  30  0  14:02:51
1      3      0.12    7857.754  4.674  -3.3  -60.7 0.29  0.015  30  0  14:03:27
1      3      0.12    7857.681  8.566  11.9  -60.4 0.29  0.016  30  0  14:04:01
1      3      0.12    7858.064  17.596 -2.6  -73   0.28  0.016  30  0  14:04:35
1      3      0.12    7856.083  7.028  6.9   -70.1 0.28  0.016  30  0  14:05:10

```

Рис. 1. Фрагмент *.dat файла гравиметра Scintrex CG-5 18.02.23 г (Медведев и др., 2025б)

- **учет вертикальных смещений льда. Непрерывные GPS-наблюдения во время измерений гравиметром.** Во время записи гравиметрических данных происходят вертикальные смещения ледовой толщи. Учет этих смещений может иметь решающее значение для точности съемки, особенно для регионов с сильными приливно-отливными течениями (Andreev, Muhamadiev, 2018). Однако даже в условиях малоглубинных акваторий без сильных приливно-отливных воздействий необходимо учитывать изменение положения пункта наблюдения в пространстве. При непрерывной записи точных координат точек наблюдений в процессе обработки гравиметрических «сырых данных» возможен учет помех за изменение высоты (Веселов и др., 2019);

- **измерение толщины льда и глубины водоема.** Для корректного расчета аномалий Буге необходимо учитывать водно-ледовый слой, который имеет плотность порядка 1 г/см^3 . Измерения необходимо проводить на каждом пикете, особенно в акваториях с расчлененным рельефом дна. Авторы использовали для измерения толщины льда и глубины водоема ледобур, лот, а также рулетку, однако в зависимости от условий съемки возможно использование эхолота или георадара;

- **если есть возможность, съемка должна проводиться в благоприятных погодных условиях.** Качество наблюдений в условиях сильного ветра остается пониженным. Необходимо проводить оценку качества получаемых данных как непосредствен-

но во время измерений, так и в процессе обработки. Для различных акваторий и в зависимости от требований к точности проводимой съемки конкретные погодные условия, при которых качество данных остается удовлетворительным, может существенно различаться;

- **использование сейсмических датчиков для учета помех в постобработке.** Эксперимент по учету сейсмических помех в данных наледной гравиметрии был описан авторами ранее (Медведев и др., 2024в). Подобные эксперименты проводились и нашими коллегами в лабораторных и полевых условиях (Дробышев и др., 2021; Андреев и др., 2023; Меньшиков и др., 2024). По полевым материалам авторов, наилучший полученный коэффициент корреляции между гравиметрическими и обработанными сейсмическими данными на данный момент со-

ставляет 0,64 (Медведев и др., 2024в). Авторы продолжают исследования в этой области и провели ряд дополнительных полевых экспериментов, результаты которых на данный момент обрабатываются;

- **использование гравиметрической «вариационной станции».** Гравиметр – вариационная станция, используемая в режиме непрерывной записи «сырых данных». Он располагается на льду водоема, на участке работ и позволяет оценить колебания ледовой толщи во времени, а также исключить эти колебания из показаний второго гравиметра, перемещаемого по рядовым пикетам. По результатам полевого эксперимента, проведенного авторами в феврале 2024 г., был сделан вывод о перспективности данного направления (Медведев и др., 2025а) с ощутимой корреляцией в сигналах гравиметров на льду при расстоянии между ними около 500 м.

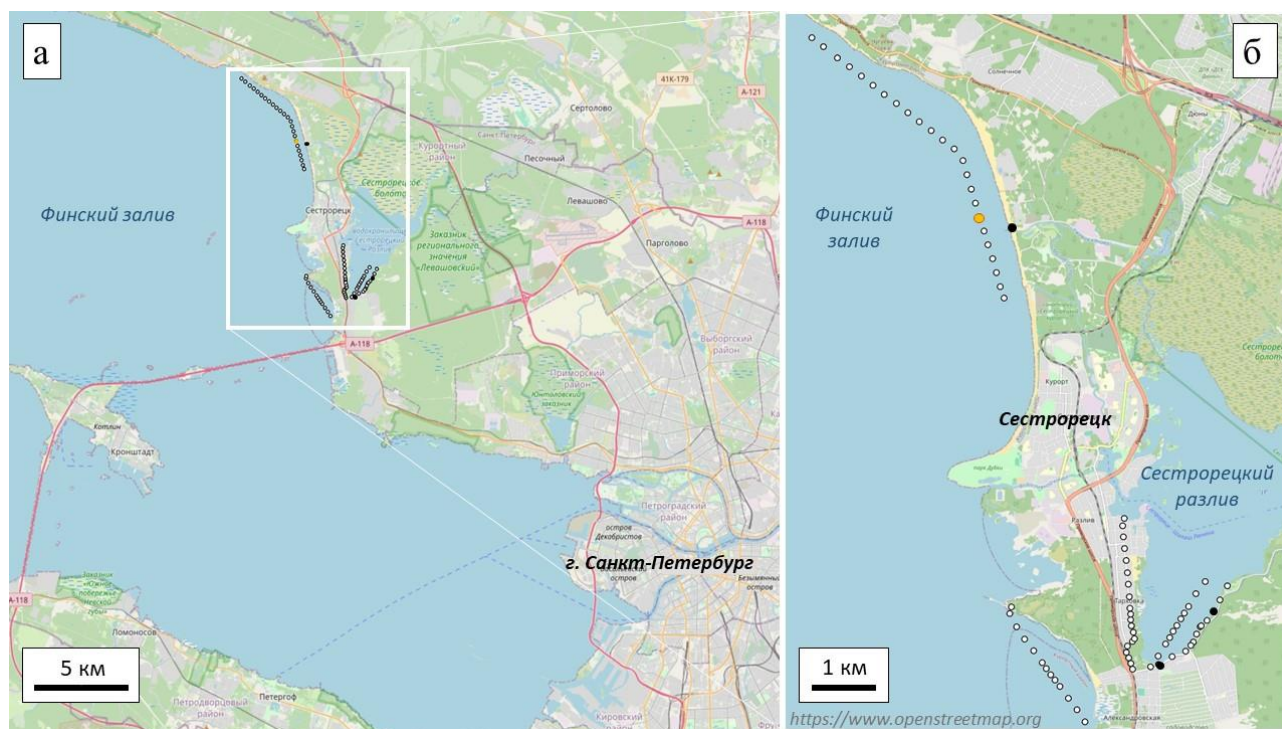


Рис. 2. Схема расположения участков выполнения наледных гравиметрических работ: а – обзорная схема относительно Санкт-Петербурга, б – врезка с отметкой точек съемки. Белые точки – пункты наблюдений, черные – ОГП (опорные гравиметрические пункты), оранжевая – пикет № 2000 (рис. 3, 4)

Вышеперечисленные особенности гравиметрических наледных измерений позволяют получить качественные первичные данные. Однако при стандартном графе обработки этого может быть недостаточно. Как было показано ранее на рис. 1, в условиях сильных

помех значения, осредняемые гравиметром на одном и том же пикете, могут отличаться на величину более 1 мГал. В таком виде данные съемки непригодны для геологической интерпретации. Один из поисковых объектов – палеодолина, расположенная в пределах

акватории Сестрорецкого разлива. Она дает отрицательную аномалию менее 0,2 мГал (Медведев и др., 2024а). Для картирования такого объекта необходимо получение гравиметрических данных высокого качества.

Далее продемонстрируем возможность улучшения качества гравиметрических данных в условиях сильных помех. Наиболее практичным и действенным решением для понижения погрешности наледных гравиметрических данных, получаемых с использованием современных высокоточных гравиметров Scintrex CG-5 и Scintrex CG-6, является обработка «сырых данных» («raw data») гравиметров. Авторы использовали следующий подход в обработке временных рядов данных гравиметров: выполнялся пересчет значений с датчика силы тяжести, записанных с частотой 10 Гц из единиц АЦП (аналого-цифрового преобразователя) в мГал (Operation Manual CG-6, 2020). Полученные значения (RawGrav) осреднялись с предварительной отбраковкой пиковых значений. При отбраковке применен следующий подход:

- 1) данные сортируются от меньшего значения к большему по столбцу RawGrav (значение с датчика силы тяжести без учета поправок за температуру, наклон, дрейф и лунно-суточные вариации);
- 2) производится визуальная оценка наклона полученного графика. В большинстве случаев график имеет 3 ярко выраженные линейные части, отличающиеся по углу наклона;
- 3) удаляются участки аномальных значений слева и справа с некоторым запасом на основе опыта обработчика (рис. 3) (запланирована отбраковка на основе статистической или спектрально-корреляционной фильтрации);
- 4) из оставшихся значений RawGrav вычисляется среднее арифметическое;
- 5) полученное значение вносится в *.dat файл, далее обработка идет по стандартному графу.

При анализе полученных результатов было выявлено, что данные съемки в ветреный день можно значительно улучшить, используя анализ временных рядов гравиметра Scintrex CG-6, однако требуется пересмотр подхода к введению поправок в значения RawGrav и автоматизация процесса.

Модифицированная методика обработки «сырых данных» на примере гравиметра Scintrex CG-6, предлагаемая авторами, состоит из нескольких шагов:

- текстовый файл с расширением *.tsf открывается в одной из программ для работы с электронными таблицами;
- данные сортируются в соответствии с временем наблюдения (с учетом того, что сохраняется последовательно 10 значений измерений силы тяжести за секунду с ежесекундными временными отсечками);
- в данные вводятся поправки, записанные в *.tsf файле: за угол наклона прибора, температуру датчика и лунно-суточные вариации. Кроме того, вводится поправка за дрейф нуля-пункта гравиметра из *.dat файла (Operation Manual CG-6, 2020);
- данные разбиваются на пикеты по времени наблюдения;
- для каждого пикета строится график, где по вертикальной оси откладывается значение наблюдаемого поля силы тяжести с введенными поправками за температуру, лунно-суточные вариации и угол наклона в мГал (CorrGrav), по горизонтальной оси – время наблюдения из столбца Time;
- для каждого пикета проводится фильтрация данных с последующим осреднением;
- для каждого пикета записываются значения всех столбцов из *.dat файла гравиметра;
- формируется новый *.dat файл, пригодный для дальнейшей обработки данных по стандартной методике.

В настоящее время авторами разрабатывается программное обеспечение для автоматизации процесса обработки временных рядов современных цифровых гравиметров, позволяющее существенно повысить производительность труда при обработке «сырых» данных. Кроме того, ведется работа по сравнению результатов фильтрации «сырых» данных различными методами.

Результаты обработки данных гравиметра Scintrex CG-6, полученных на пикете 2000 в Финском заливе (положение пикета см. рис. 2) по авторскому графу, схематично представлены на рис. 3. Рассмотрим его подробнее. Натурные исследования были выполнены вечером 14 февраля 2024 г., погодные условия можно охарактеризовать как

неблагоприятные из-за сильных порывов ветра со снегом. Наблюдения проведены на 4-х наледных пикетах группой из двух гравиметров (Scintrex CG-5 и Scintrex CG-6). На каждом пикете измерена толщина льда и глубина дна водоема. Наблюдения на каждом из пикетов повторены на следующий день с более благоприятными погодными условиями. На приведенном рисунке синим цветом показаны (рис. 3а) данные с датчика силы тяжести гравиметра Scintrex CG-6 в ветреный день, при этом диапазон значений силы тяжести изменяется в пределах 7,5 мГал при времени наблюдения на пикете порядка 12 мин.

Оранжевым цветом (рис. 3а, б) нанесены осредненные гравиметром Scintrex CG-6 значения силы тяжести, которые зарегистрировал бы оператор в случае стандартной методики съемки и обработки. В масштабе рисунка кажется, что данные значения укладываются в практически ровную линию, однако, как видно из рис. 3б, разница между минимальным и максимальным осредненными значениями достигает практически 3 мГал. Среднее значение по показаниям гравиметра показано на рис. 3б красным цветом и составляет 6001,670 мГал, среднее по значениям «сырых данных» выше на 0,219 мГал. Такая разница критична при проведении высокоточных гравиразведочных работ. В частности, палеодолины, являющиеся объектом поиска в данном исследовании, могут отражаться в поле силы тяжести как локальные аномалии U-образной формы величиной всего в -0.2 мГал (Медведев и др., 2024а). Соответственно, при использовании стандартного графа обработки гравиметрических данных (Пугин, 2019), даже при отбраковке части значений, эти данные малопригодны или непригодны для дальнейшей обработки и интерпретации.

Однако в «сырых данных» присутствуют многочисленные отскоки – пиковые значения, вызванные как колебаниями ледовой толщи, так и ветровым воздействием на гравиметры и операторов. При простом осреднении они могут значительно влиять на среднее значение. Поэтому следующий шаг, предпринимаемый авторами, это фильтрация данных. В идеальных условиях в результате фильтрации получается горизонтальная прямая, отражающая значение поля силы тяже-

сти в данной точке, однако в связи с высоким уровнем помех это практически невозможно. Авторами ведется работа по поиску оптимальных алгоритмов фильтрации для задач наледной гравиметрии. В данном случае была применена описанная выше сортировка с последующим удалением пиковых значений и осреднением. В результате сортировки значений по возрастанию мы получаем кривую с тремя интервалами с различными преобладающими углами наклона (рис. 3в). Авторы исключили заведомо большее количество пиковых значений из выборки, в данном случае 30 % от всех значений. Красными прямоугольниками выделены зоны, не участвующие в последующем осреднении (рис. 3в). В результате полученное значение поля силы тяжести на пикете № 1 составило 6001,907 мГал.

Для проверки результатов обработки, а также заверки результатов натурных исследований наблюдения на 4-х пикетах (№ 1750, 2000, 2250, 2500, нумерация возрастает с юга на север) были проведены повторно в день с благоприятными погодными условиями. Рассмотрим данные по пикету № 2000 (рис. 4).

В связи с практически полным отсутствием ветра и его порывов результаты, полученные 15.02.2024, можно было бы использовать для интерпретации гравиметрических данных даже по стандартному графу обработки. Однако для сравнения результатов измерений в ветреный и безветренный день данные от 15.02.2024 обработаны по приведенному выше авторскому графу обработки. Как видно из рис. 4а, диапазон значений «сырых данных», показанных синим цветом, сильно сузился. На рисунке 4б видно, что минимальные и максимальные осредненные гравиметром Scintrex CG-6 значения отличаются менее чем на 0,1 мГал. Гравиметрические наблюдения более чем на порядок превосходят по точности данные от 14.02.2024 на этом же пикете. Более того, как видно из рис. 4б, значения, осредненные гравиметром Scintrex CG-6 автоматически и осредненные авторами по «сырым данным», различаются лишь на 0,006 мГал. Для полноты картины, авторами удалены пиковые значения (рис. 4в), после чего рассчитано среднее арифметическое, равное 6001,891 мГал.

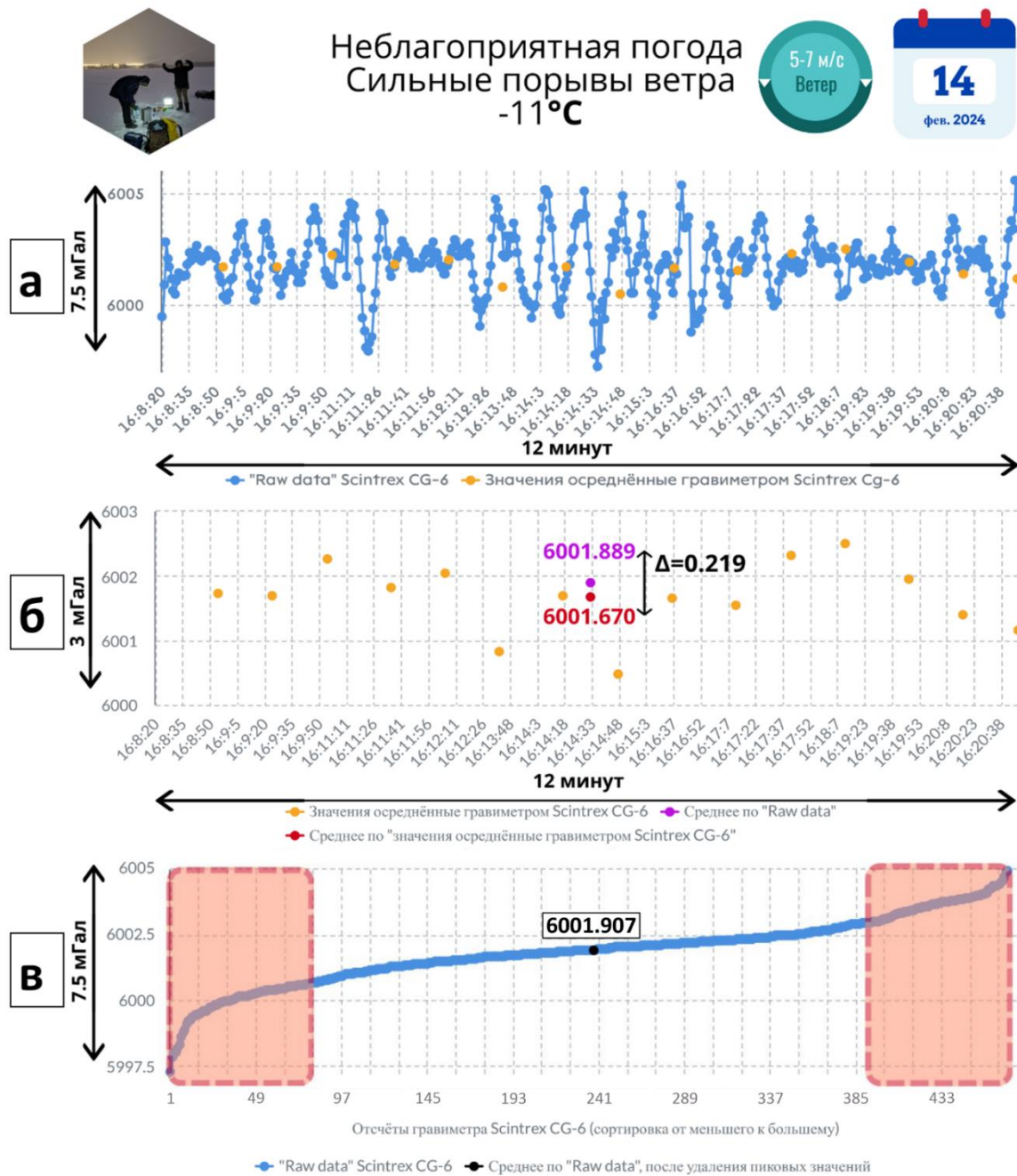


Рис. 3. Процесс обработки «сырых данных» гравиметра Scintrex CG-6. Пикет № 2000, 14.02.2024. Пояснения в тексте

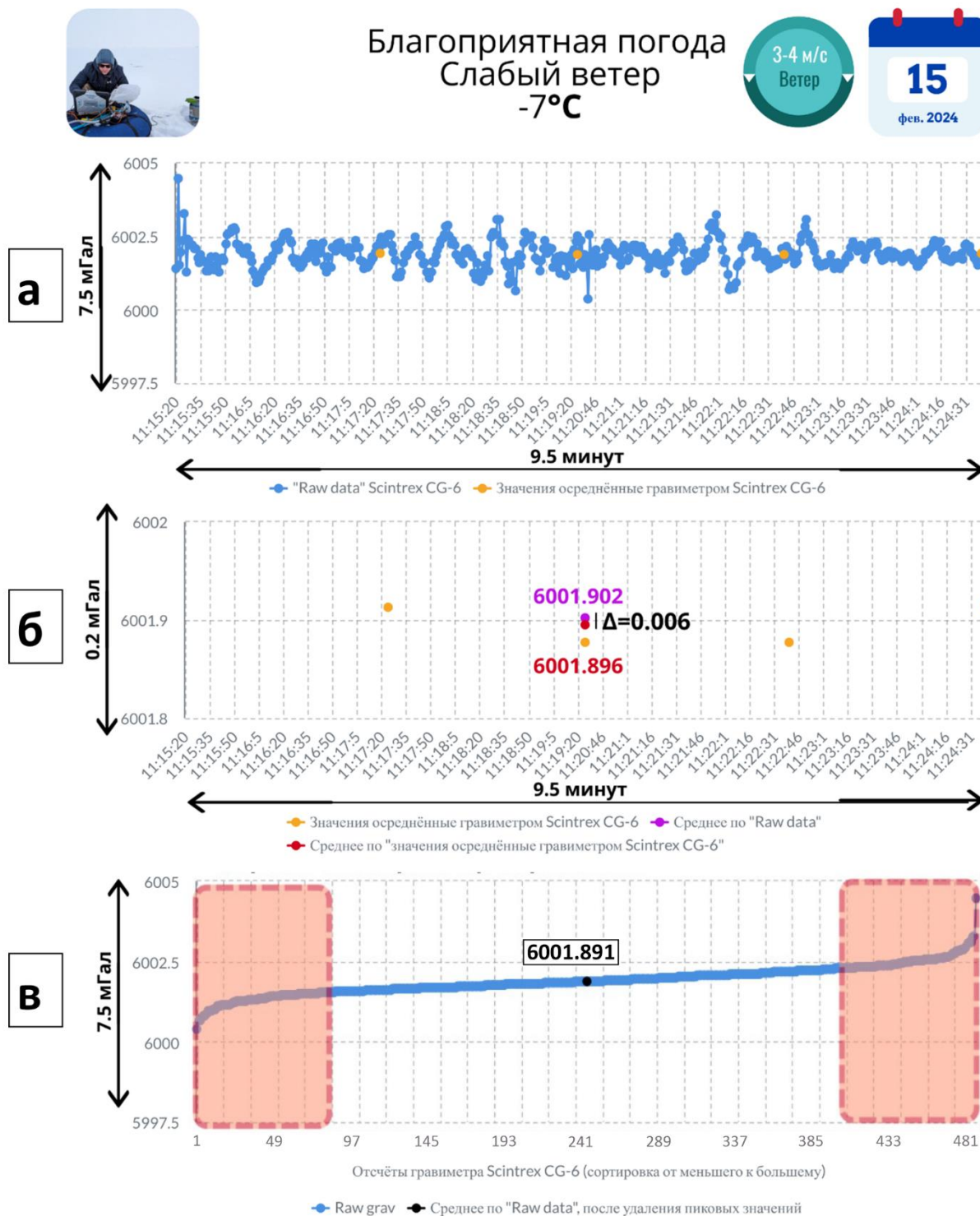


Рис. 4. Процесс обработки «сырых данных» гравиметра Scintrex CG-6. Пикет № 2000, 15.02.2024. Пояснения в тексте

Разница значений силы тяжести по повторным наблюдениям на пикете № 1, полученных с использованием авторского графа обработки 14 и 15 февраля 2024 г., составляет 0,016 мГал. Погрешность единичного измерения, согласно ИГ-80 (Инструкция по гравиразведке, 1980), составляет

$\pm 0,008$ мГал, что позволяет использовать результаты съемки для геологической интерпретации. Погрешность единичного измерения, вычисленная по стандартному графу обработки, равняется $\pm 0,113$ мГал и не позволяет использовать такие данные для геологической интерпретации.

Выводы

При проведении площадной или профильной гравиметрической съемки на льду необходимо найти баланс между качеством получаемых данных и временными и трудовыми затратами на ее проведение. В связи с ограниченным периодом присутствия ледового покрова на акваториях время на проведение наледной съемки естественным образом ограничено. Оптимальное решение авторы видят в специализированной обработке временных рядов данных гравиметров с незначительной модификацией методики полевых измерений без использования дополнительных средств измерений. Решение выработано на основе многократных наблюдений с опробованием различных вариантов модификации полевых наблюдений и графа обработки.

Рассмотренные в статье методика проведения гравиметрической наледной съемки и авторский граф обработки гравиметрических данных позволяют значительно улучшить качество получаемых результатов гравиметрических данных, осложненных сильными сейсмическими помехами. В результате обработки «сырых данных» гравиметра Scintrex CG-6 авторам удалось снизить погрешность наблюденных значений силы тяжести более чем на порядок. Предлагаемая методика может быть использована как для наледных гравиметрических наблюдений, так и для съемок с существенным влиянием помех, в том числе антропогенного происхождения (археологические и другие изыскания в черте города, изыскания на действующих месторождениях и пр.).

Исследования были выполнены в рамках работы над диссертационным исследованием Н.О. Медведева на тему: «Картирование палеодолин в восточной части Финского залива методом наледной гравиметрии».

Библиографический список

Андреев Д.С., Касьяненко А.А., Михайлов С.А., Филобоков Е.И., Хасанянов Р.Р., Чернов М.Л. Патент № 2819344 С1 РФ, Способ гравиметрических измерений в районах, для которых характерен повышенный сейсмический фон, связанный с техногенной нагруженностью: Заявка № 2023117055. 27.06.2023.

Буданов Л.М., Глазунов В.В., Сергеев А.Ю., Ефимова Н.Н. Применение методов гидроэлектроразведки для картирования форм палеорельефа акватории «Сестрорецкий разлив», Естественные и технические науки. 2017. № 3. С. 52–57. EDN: YJTODZ

Веселов А.К., Каширских М.Ф., Смирнова И.А. Способ гравиметрической съемки Патент на изобретение RU 2679643 С1. 12.02.2019. 3. № 2018113707, 16.04.2018.

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. DOI: 10.21455/gr2021.3-2 EDN: IXPKRT

Инструкция по гравиразведке. М., 1980. 80 с.

Медведев Н.О., Сенчина Н.П., Буданов Л.М., Асосков А.Е., Хлыстов В.А. Опробование методики измерения гравитационного поля с применением вариационной станции в наледных условиях // Геофизика. 2025а. № 1. С. 57–64. DOI: 10.34926/geo.2025.21.87.009 EDN: VOPEFJ

Медведев Н.О., Сенчина Н.П., Буданов Л.М., Горелик Г.Д., Триколиди Г.Ю. Особенности методики наледных гравиметрических наблюдений при изучении палеодолин окрестностей Санкт-Петербурга: материалы конференции Инженерная и рудная геофизика 2024. Казань, 2024а. EDN: GPKXZA

Медведев Н.О., Сенчина Н.П., Горелик Г.Д., Буданов Л.М. Способы повышения качества результатов наледных гравиметрических исследований (на примере изучения палеодолин Санкт-Петербурга) // Приборы и системы разведочной геофизики. 2024б. № 2. С. 34–43. EDN: ПUIWT

Медведев Н.О., Сенчина Н.П., Горелик Г.Д., Буданов Л.М., Порохина Е.А. Сопоставление результатов гравиметрических и сейсмометрических измерений на льду Сестрорецкого разлива (Санкт-Петербург) // Геофизические исследования. 2024в. Т. 25, № 3. С. 87–103. DOI: 10.21455/gr2024.3-6 EDN: GPUXTR

Медведев Н.О., Сенчина Н.П., Буданов Л.М., Триколиди Г.Ю. Некоторые методические особенности проведения наледных гравиметрических съёмок: материалы 51-й сессии Международного научного семинара Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Пермь, 27–31 января 2025 года. 2025б. С. 180–183. EDN: FTKTZC

Меньшиков С.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Рыбальченко В.В., Афанасьев П.Р. Двадцать лет путем инноваций (от материка до шельфа) // Газовая промышленность. 2024. № 2 (861). С. 22–27. EDN: RAZISZ

Меньшиков С.Н., Ахмедсафин С.К., Кирсанов С.А., Афанасьев П.Р. Гравиметрический мониторинг разработки месторождений газа на арктическом шельфе. Первые шаги // Газовая промышленность. 2022. № S1 (829). С. 50–54. EDN: BAWBGC

Серкеров С.А., Левицкая З.Н. Профессор Леонид Васильевич Сорокин. (1886–1954) // Серия «Выдающиеся ученые РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина». М.: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. Вып. 53. 52 с.

Пугин А.В. Гравиразведка: учеб. пособие в 2 ч. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2019. Ч. 2. 110 с. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/pugin-graviravezdka-ch-1.pdf>

Руководящий технический материал, гравиметрическая съемка со льда. М.: ЦНИИГАиК, 1982. 54 с.

Широкова Т.П., Лыгин И.В., Токарев М.Ю., Золотая Л.А., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Фадеев А.А., Арутюнян Д.А., Любичская А.В., Шклярчук А.Д. Комплексирование наледных гравиметрических и магнитометрических наблюдений и

морской сейсморазведки в Кандалакшском заливе Белого моря // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)»: сборник статей. Москва, 26–30 октября 2020 года. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС». 2020. Т. 3 (III). С. 425–428.

Шклярчук А.Д., Кузнецов К.М., Арутюнян Д.А., Лыгин И.В. Особенности измерений относительными гравиметрами на неустойчивых основаниях: материалы 47-й сессии международного научного семинара Д.Г. Успенского – В.Н. Страхова «Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей». Воронеж, 27–30 января 2020 года. 2020. С. 302–304. EDN: CFXXPF

Andreev D., Muhamadiev D. Perspective ways to improve the accuracy of measurements in modern gravity prospection // GeoBaikal 2018. 2018. DOI: 10.3997/2214-4609.201802064 EDN: BTFBOE

Operation Manual CG-5 Scintrex Autograv System, Toronto, Canada, Scintrex Ltd., 2012. 312 p.

Operation Manual CG-6 Scintrex Autograv System, Toronto, Canada, Scintrex Ltd., 2020. 71 p.

Methods of High Level Noise Reducing in Gravity Surveys on the Example of On-Ice Measurements

N.O. Medvedev^a, N.P. Senchina^b, L.M. Budanov^c, G.V. Smuk^d

^aA.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute. 74 Sredniy Ave. V.I., St. Petersburg 199106, Russia. E-mail: Nikita_Medvedev@karpinskyinstitute.ru

^bEmpress Catherine II St. Petersburg Mining University. 2 21st Line, St. Petersburg 199106, Russia. GM-Service Ltd., 53 Prosveshcheniya Ave., Bldg. 1, app. 195, St. Petersburg 195274, Russia. E-mail: n_senchina@inbox.ru

^c A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute. 74, Sredniy Ave. V.I., St. Petersburg, 199106, Russia. E-mail: Leonid_Budanov@karpinskyinstitute.ru

^dEmpress Catherine II St. Petersburg Mining University. 2, 21st Line, St. Petersburg, 199106, Russia. E-mail: georgii.smuk@gmail.com

The paper considers the specifics of field observations and data processing techniques for on-ice gravity surveys that help reduce the level of noise and achieve high accuracy of gravity measurements. The study systematizes recommendations for on-ice surveys, including reducing base-to-base loop duration, using a variation station, using seismic sensors to account for interference in post-processing of data, etc. Experimental observations were carried out using modern high-precision relative digital gravity meters Scintrex CG-5 and CG-6, allowing to compare the effectiveness of various methods for combating interference associated with the instability of the ice cover on which the gravimeter is located. An original algorithm for time series processing of the Scintrex CG-5, Scintrex CG-6 gravity meters has been developed, including dividing data by pickets, sorting values from the gravity sensor by time, introducing corrections in mGals for temperature, tilt, and lunar-daily variation, subsequent data filtering and data export in *.dat file format. Processing of gravity meter time series has significantly improved the accuracy of gravimetric observations.

Key words: *gravity surveys, gravimetry, on-ice gravity, ice, noise.*

References

- Andreev D.S., Kasyanenko A.A., Mikhailov S.A., Filobokov E.I., Khasanyanov R.R., Chernov M.L. 2023. Sposob gravimetricheskikh izmereniy v rayonakh, dlya kotorykh kharakteren povyshennyi seismicheskiy fon, svyazannyi s tekhnogennoy nagruzhenostyu [Method of gravimetric measurements in areas characterized by increased seismic background associated with man-made load] Patent No. 2819344 C1 RF. No. 2023117055, June 27, 2023. (in Russian)
- Budanov L.M., Glazunov V.V., Sergeev A. Yu., Efimova N.N. 2017. Primenenie metodov gidroelektrozvedki dlya kartirovaniya form paleorelefa akvatorii «Sestroretskiy razliv» [Application of hydroelectric exploration methods for mapping paleo-relief forms of the Sestroretskiy Razliv water area]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 3:52-57. (in Russian)
- Veselov A.K., Kashirskikh M.F., Smirnova I.A. 2018. Sposob gravimetricheskoy syomki [Gravimetric survey method] Patent for invention RU 2679643 C1, 12.02.2019. No. 2018113707, 16.04.2018. (in Russian)
- Drobyshev M.N., Koneshov V.N., Abramov D.V., Malysheva D.A. 2021. Povyshenie tochnosti gravimetricheskikh nablyudeniy s pomoshch'yu seismicheskoy informatsii [Increasing the accuracy of gravimetric observations using seismic information]. *Geofizicheskie issledovaniya*. 22(3):26-34. doi: 10.21455/gr2021.3-2. (in Russian)
- Instruktsiya po gravirazvedke* [Instructions for gravity exploration]. Moscow, 1980, p. 80. (in Russian)
- Medvedev N.O., Senchina N.P., Budanov L.M., Asoskov A.E., Khlystov V.A. 2025a Oprobovanie metodiki izmereniya gravitatsionnogo polya s primeneniem variatsionnoy stantsii v nalyodnykh usloviyakh [Testing the Methodology for Measuring the Gravity Field Using a Variation Station in Icy Conditions]. *Geofizika*. 1:57-64. (in Russian)
- Medvedev N.O., Senchina N.P., Budanov L.M., Gorelik G.D., Trikolidi G.Yu. 2024a. Osobennosti metodiki nalyodnykh gravimetricheskikh nablyudeniy pri izuchenii paleodolin okrestnostey Sankt-Peterburga [Features of the Methodology of Ice Gravimetric Observations in the Study of Paleovalleys in the Vicinity of St. Petersburg]. In: *Inzhenernaya i rudnaya geofizika 2024*. Kazan. https://libgeo.ru/index.php?route=product/product&product_id=21145. (in Russian)
- Medvedev N.O., Senchina N.P., Gorelik G.D., Budanov L.M. 2024b. Sposoby povysheniya kachestva rezultatov nalyodnykh gravimetricheskikh issledovaniy (na primere izucheniya paleodolin Sankt-Peterburga) [Methods for improving the quality of results of on-ice gravimetric studies (using the study of paleovalleys of St. Petersburg as an example)]. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki*. 2: 34-43. (in Russian)
- Medvedev N.O., Senchina N.P., Gorelik G.D., Budanov L.M., Porokhina E.A. 2024v. Sopostavlenie rezultatov gravimetricheskikh i seismometricheskikh izmereniy na ldu Sestroreckogo razliva (Sankt-Peterburg) [Comparison of the results of gravimetric and seismometric measurements on the ice of the Sestroretskiy Razliv (St. Petersburg)]. *Geofizicheskie issledovaniya*. 25(3): 87-103. doi: 10.21455/gr2024.3-6. (in Russian)
- Medvedev N.O., Senchina N.P., Budanov L.M., Trikolidi G.Yu. 2025. Nekotorye metodicheskie osobennosti provedeniya nalyodnykh gravimetricheskikh syomok [Some methodological features of conducting ice gravimetric surveys]. In: *Voprosy teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh poley*. Perm, January 27–30, pp. 180–183. (in Russian)
- Menshikov S.N., Akhmedsafin S.K., Kirsanov S.A., Rybalchenko V.V., Afanasyev P.R. 2024. Dvadcat let putem innovatsiy (ot materika do shelfa) [Twenty years through innovation (from the continent to the shelf)]. *Gazovaya promyshlennost*. № 2(861):22-27. (in Russian)
- Menshikov S.N., Akhmedsafin S.K., Kirsanov S.A., Afanasyev P.R. 2022. Gravimetricheskii monitoring razrabotki mestorozhdeniy gaza na arkticheskoy shelfe. Pervye shagi [Gravimetric monitoring of gas field development on the Arctic shelf. First steps]. *Gazovaya promyshlennost*. S1 (829): 50-54. (in Russian)
- Serkerov S.A., Levitskaya Z.N. 2003. Professor Leonid Vasilyevich Sorokin. (1886-1954) [Professor Leonid Vasilievich Sorokin. (1886-1954)]. *Seriya Vydavushchiesya uchenye RGU nefi i gaza im. I.M. Gubkina*. Issue 53, Moscow, p. 52. (in Russian)
- Pugin A.V. 2019. Gravirazvedka [Gravity exploration]. Textbook: in 2 parts. Part 2. URL: <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/pugin-graviravezdka-ch-1.pdf> (date of access 23.06.2025) (in Russian)
- Rukovodyashchiy tekhnicheskiy material, gravimetricheskaya syomka so lda*. 1982. [Guiding technical material, gravimetric survey from ice]. Moscow, TsNIIGAiK, p. 54. (in Russian)
- Shirokova T.P., Lygin I.V., Tokarev M.Yu., Zolotaya L.A., Sokolova T.B., Kuznetsov K.M., Fadeev A.A., Arutyunyan D.A., Lyubitskaya A.V., Shklyaruk A.D. 2020. Kompleksirovanie nalednykh gravimetricheskikh i magnitometricheskikh nablyudeniy i morskoy seismorazvedki v Kandalakshskom zalive Belogo morya [Integration of ice gravi-

metric and magnetometric observations, and marine seismic exploration in the Kandalaksha Bay of the White Sea]. *In: Morskie issledovaniya i obrazovanie [Marine Research and Education (MARESEDU-2020). Moscow, October 26-30, 2020. Volume III (III). Tver. pp. 425-428. (in Russian)*

Shklyaruk A.D., Kuznetsov K.M., Arutyunyan D.A., Lygin I.V. 2020. Osobennosti izmereniy otnositelnymi gravimetrami na neustoychivyykh osnovaniyakh [Features of measurements with relative gravimeters on unstable foundations]. *In: Voprosy*

teorii i praktiki geologicheskoy interpretatsii geofizicheskikh poley. Voronezh, January 27-30, 2020. pp. 302–304. (in Russian)

Andreev D., Mukhamadiev D. 2018. Perspective ways to improve the accuracy of measurements in modern gravity prospection. *GeoBaikal.* 2018:1-6. doi: 10.3997/2214-4609.201802064

Operation Manual CG-5 Scintrex Autograv System, 2012. Toronto, Canada, Scintrex Ltd., p. 312.

Operation Manual CG-6 Scintrex Autograv System, 2020. Toronto, Canada, Scintrex Ltd., p. 71.