

Способы повышения качества результатов налёдных гравиметрических исследований (на примере изучения палеодолин Санкт-Петербурга)

- Медведев Н.О., Буданов Л.М., Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. Карпинского А.П., г. Санкт-Петербург.
- Сенчина Н.П., Горелик Г.Д., Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург.

Аннотация. В статье представлены результаты опытно-методических налёдных гравиметрических исследований, выполненных на акваториях Сестрорецкого разлива и Финского залива, направленных на изучение погребённых палеорусел. Полученные результаты наглядно иллюстрируют проблему снижения информативности гравиметрии, связанную с понижением качества полевых данных при стандартной методике измерений. Опробовано несколько различных способов съёмки и обработки, позволяющих повысить качество полевых материалов. По полученным материалам построены графики аномалий поля силы тяжести по нескольким профилям на суше и на льду. Выявлены отрицательные локальные аномалии поля силы тяжести U-образной формы, которые, вероятно, связаны с погребёнными палеодолинами.

Ключевые слова: гравиметрия на льду, налёдная гравиразведка, гравиметр, сейсмометрия, палеодолина.

Гравиметрия является одним из классических методов геофизики, позволяющих решать как фундаментальные, так и прикладные задачи. В методе анализируются характеристики гравитационного поля Земли, измеряемые с микрогальной точностью (погрешности составляют до $5 \cdot 10^{-9}$ от измеряемой величины – 5 мкГал при абсолютной величине изучаемого параметра, равной примерно 9.81 м/с^2 (981000 мГал)). При этом оцениваются плотностные неоднородности недр, благодаря чему метод показывает высокую геологическую информативность при поисках руд, месторождений нефти и газа, при решении инженерных задач, а также при выполнении геологического картирования. Гравиметрические материалы являются обязательным компонентом опережающих геофизических основ для Государственных геологических карт.

Поисково-разведочная гравиметрическая съёмка может выполняться различными способами: наземным, морским, авиационным, шахтным, скважинным. Промежуточное положение между наземной и морской занимает налёдная гравиметрическая съёмка, которая обычно выполняется по методике, практически идентичной наземной съёмке, но реализуется на акваториях [4]. Зачастую исследуются при этом зоны, недоступные для изучения другими способами. Например, транзитная зона или мелководная акватория, которые не подходят ни для наземной, ни для морской гравиметрической съёмки. Аэросъёмка с пилотируемыми воздушными судами не позволяет добиться высокой пространственной разрешающей способности и сопоставимой с наземной съёмкой точности. Съёмка с использованием беспилотных летатель-

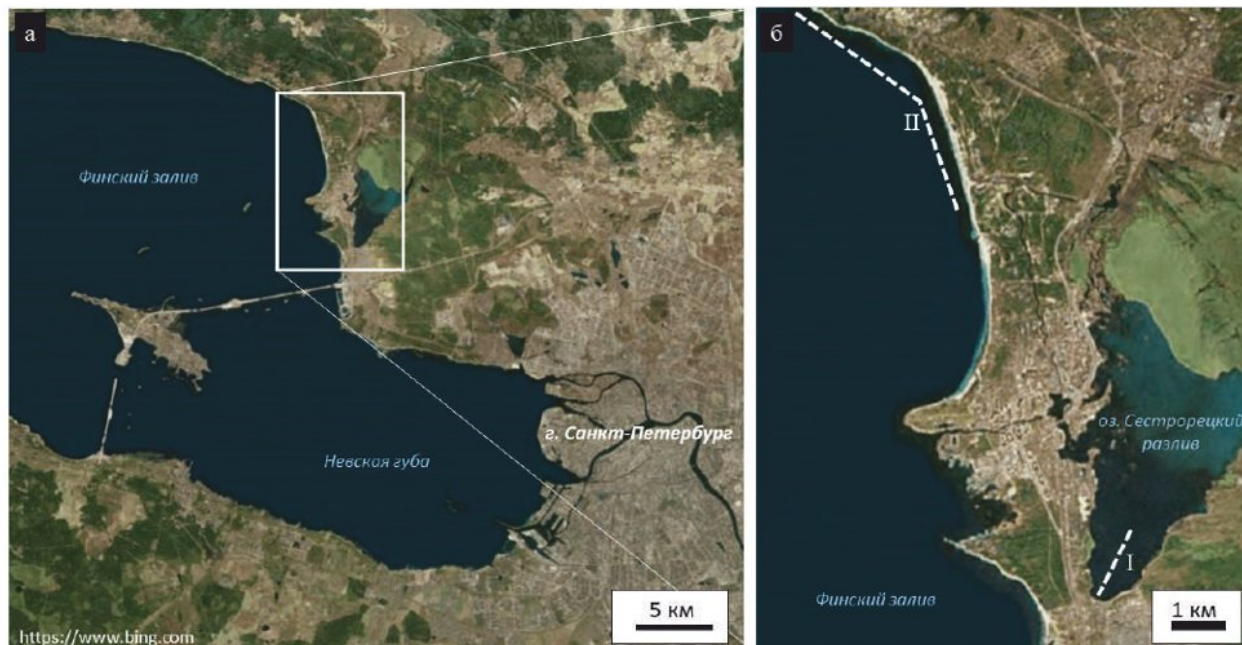
ных аппаратов, хорошо зарекомендовавшая себя в других направлениях геофизических исследований, на данный момент также сильно уступает в точности другим вариантам измерений [9]. Таким образом, зоны выполнения налёдных гравиметрических исследований недоступны другим способам съёмки, если требуется высокая пространственная разрешённость и низкая погрешность измерений [11]. Налёдная съёмка может позволить достичь сопоставимых с наземной съёмкой погрешностей, однако для этого, по мнению авторов, требуется модифицировать методику измерений и обработки. Адаптация методики наземной съёмки необходима в связи с особенностями ледовой толщи, которая испытывает колебания в зависимости от погодных (особенно ветровых) условий, течения вод, приливов, формирования трещин во льду. Это затрудняет съёмку и при стандартном способе измерений и обработки приводит к понижению точности регистрируемых данных [18].

При этом существует большое количество задач, где необходимо привлечение данных высокоточной гравиразведки. Например, в представленном исследовании геологическая задача связана с изучением конфигурации погребенных палеодолин, широко развитых в пределах Санкт-Петербурга. Изучение акватории с помощью гравиметрии особенно актуально, так как на суше сеть погребенных врезов изучена с высокой детальностью бурением, геофизическими исследованиями и составлена схема их конфигурации [5]. На акватории имеются лишь единичные скважины с достаточной глубиной. Объём геофизических исследований на мелководье и в транзитной зоне также очень мал, что не позволяет составить достоверную карту положения палеоврезов в пределах озер

региона и на Финском заливе [13]. Локализация погребенных палеодолин важна для строительства, которое в Санкт-Петербурге ведётся в том числе на намывных территориях. В других регионах картирование палеорусел значимо при поисках месторождений золота, алмазов, урана и т.д. [10, 12, 17, 19, 20], а также для оценки запасов и обеспечения населения водными ресурсами [22].

В представленной работе авторами выполнены опытно-методические исследования на льду озера Сестрорецкий разлив и на льду Финского залива (рис. 1). Целью работы являлось повышение качества гравиметрической съёмки при наледных измерениях. Задачи исследования: опробование различных способов съёмки и обработки собранных данных, позволяющих повысить качество результатов налёдной гравиметрии: модификация методики полевых измерений, использование дополнительных средств стабилизации, выполнение записи шумовой составляющей с помощью сейсмических датчиков и гравиметра – «вариационной станции». Профили съёмки пересекают предположительное положение погребённых врезов и сопровождаются измерениями на побережье. Моделирование, выполненное на основе априорной информации [2, 13] и уточнённое по результатам первых исследований авторов [14] позволяет ожидать наличие отрицательных гравиметрических аномалий амплитудой от 10 мкГал до 1.5 мГал в зависимости от типа среза и глубины залегания тальвега.

В ходе опытно-методических налёдных работ в 2023 году были выполнены измерения на 11 точках на Сестрорецком разливе, в 2024 году исследования были продолжены и проведены наблюдения на 24 точках на льду Финского залива.



▲ Рис. 1. Схема расположения участков выполнения налёдных гравиметрических работ: а – обзорная схема относительно региона исследований, б – схема с отметкой участков съёмки: I – профиль налёдной съёмки на оз. Сестрорецкий разлив, 2023 г., II – профиль налёдной съёмки на Финском заливе, 2024 г (профили сопровождающих береговых измерений не показаны).

Исследования выполнены гравиметрами Scintrex Autograv CG-5 и CG-6. Методика съёмки соответствует несколько модифицированной методике наземных измерений. Использован опорный гравиметрический пункт (ОГП) на берегу. Время исследований на каждом пикете составляло от 3 до 15 циклов длительностью от 30 до 120 секунд для оценки погрешностей и выбора оптимального варианта измерения. Кроме того, в качестве опытно-методических исследований опробованы измерения с сейсмическими датчиками – полевыми модулями ТЕЛСС-403 (10 Гц) с одноименной сейсмостанцией и РС-803 (4.5 Гц) (сейсмостанция DAQlink-4), опробованы измерения с гравиметром – вариационной станцией, измерения на опоре – «подставке», защита от ветра, динамический анализ высот в ходе наблюдений, запись сырых данных. Геодезическое сопровождение обеспечивалось аппаратурой Jawad Triumph 2 с погрешностью определения высотных координат не больше 5 см. На каждой

точке с помощью лота выполнялись измерения мощности льда и глубины дна для последующего введения поправок.

Существенное влияние на измерения оказывают погодные условия. Было предположено, что в зависимости от типа акватории – небольшой закрытый полностью покрывающийся льдом водоём (озеро Сестрорецкий разлив, площадь 10,6 км²) или открытый водоём (Финский залив, общая площадь 30 000 км²) погодные условия влияют по-разному. В дни измерений температура менялась от -1 до -9°C, ветер изменялся от легкого до сильного с порывами до 17 м/с; сведения о погоде приведены в таблице 1.

Дисперсия или разброс регистрируемых отсчётов гравиметра закономерно вырастали при ухудшении погодных условий. Однако при этом существенной разницы в качестве измерений на Финском заливе и на Сестрорецком разливе не выявлено, не смотря на различия в глубине и площади водоемов. Средние



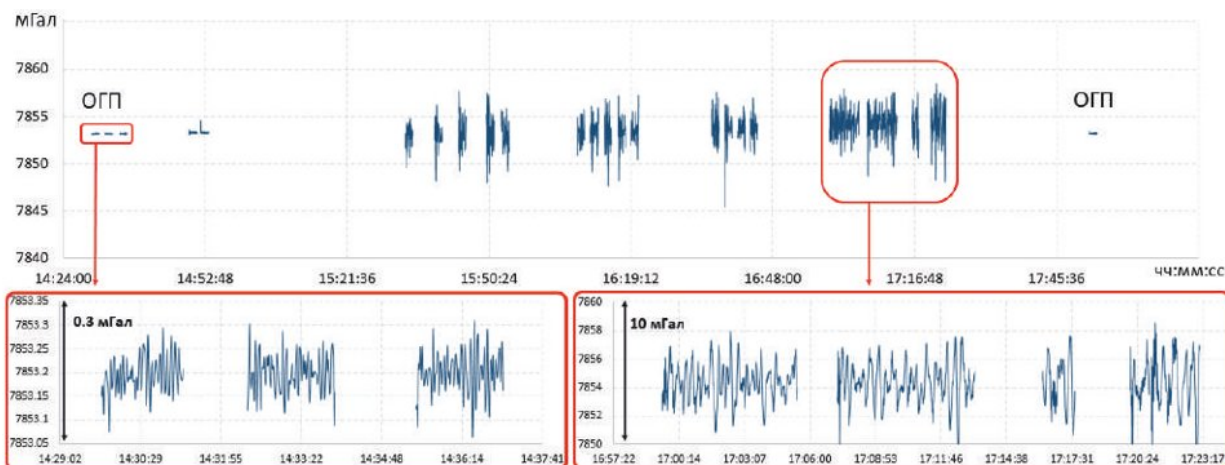
Рис. 2. Ход работ:
а, б – 2023 г., оз. Сестрорецкий разлив;
в, г – 2024 г., Финский залив.
На фотографиях видны гравиметры Scintrex Autograv CG-5 и CG-6, GNSS приёмник Jawad Triumph 2, полевые модули ТЕЛСС-403, геофон РС-803. Сейсмостанция DAQlink-4 расположена на «ватрушке».

значения стандартных отклонений ("StdDev") для налёдной съёмки варьируются от 0.2 до 11.2 мГал (Табл. 1).

Для сравнения, на наземных пунктах в эти же дни съёмки данный параметр изменяется от 0.007 до 0.03 мГал (рис. 3).

Табл. 1. Погодные условия и сводная характеристика погрешности налёдных гравиметрических измерений

Дата	Погодные условия	Акватория	Осредненные значения стандартных отклонений ("StdDev") налёдных измерений, мГал
18.02.2023	Умеренный ветер, дующий с востоко-юго-востока (5-10 м/с, резкие порывы ветра до 17 м/с). Температура около -5 °С.	оз. Сестрорецкий разлив, глубина на профиле наблюдений до 2 м	11.2
24.02.2023	Штиль, безветрие, легкий ветер (до 2 м/с). Температура около -6 °С.		0.204
25.02.2023	Слабый ветер, дующий с северо-востока (3-5 м/с). Температура около -5 °С.		0.985
14.02.2024	Умеренный ветер, дующий с востоко-юго-востока (5-8 м/с, с порывами), снег. Температура около -9 °С.	Финский залив, глубина на профиле наблюдений до 6 м	1.200
15.02.2024	Слабый ветер, дующий с юго-востока ветер (3-4 м/с). Температура около -6 °С.		0.484
16.02.2024	Умеренный ветер, дующий с востоко-юго-востока (5-8 м/с, с порывами). Температура около -2 °С.		3.854

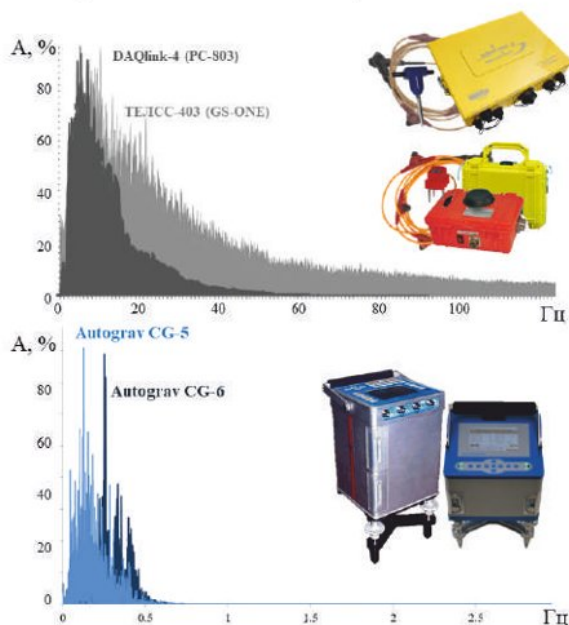


▲ Рис. 3. Пример полной записи данных гравиметра («raw data») за 14.02.2024 г (до осреднения в пределах цикла измерения). Видна разница в разбросе наблюдаемых значений поля силы тяжести на наземных точках (ОГП) и на наледных точках измерения.

Это однозначно указывает на пониженное качество регистрируемых данных при наледной съемке по сравнению с наземной, при равных прочих условиях.

Анализ вспомогательной сейсмической информации выполнялся и на Финском заливе, и на Сестрорецком разливе, однако использовалась различная аппаратура – Телеметрическая сейсморазведочная система ТЕЛСС-403 с трехкомпонентными полевыми модулями с геофо-

▼ Рис. 4. Сопоставление спектров сейсмических и гравиметрических сигналов, полученных в наледных условиях.



нами GS-ONE (10 Гц) (Сестрорецкий разлив, 2023 г.) и сейсмостанция DAQlink-4 с вертикальными геофонами PC-803 (4.5 Гц) (Финский залив, 2024 г.). Идея совместных измерений сейсмическим и гравиметрическим датчиками заключается в расчёте поправки по данным сейсмометрии для учёта её в процессе обработки гравиметрических данных. Авторы предполагают целесообразность таких измерений на основе работ коллег из Казани [1, 21] и Москвы [8].

Анализ полученных результатов позволил увидеть наличие различий в частотных характеристиках записей сейсмометра и гравиметра, и необходимость фильтрации и математических преобразований для корректного учёта сейсмической информации [15].

В качестве инструмента понижения частотного диапазона сейсмических датчиков [6, 7] была применена фильтрация, которая, как показано в условиях стендовых испытаний, слабо искажает низкочастотный сигнал при кратном уменьшении частоты. Предварительные результаты фильтрации позволяют получить кривые, сопоставимые по частотной характеристике с данными

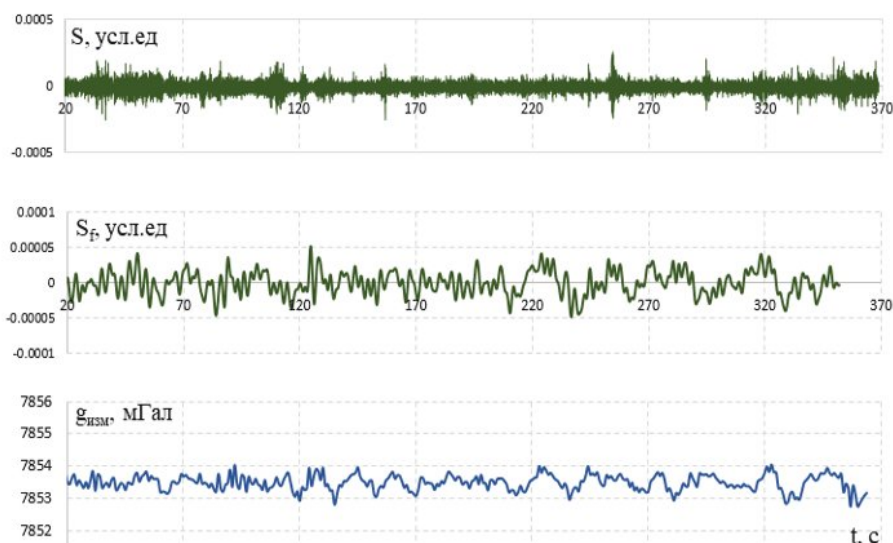


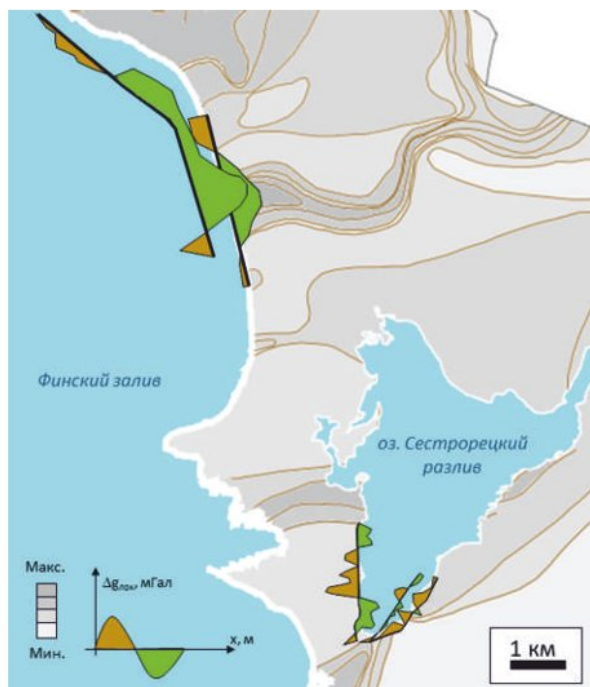
Рис. 5. Пример записей геофона и гравиметра, полученные в одно время 15.02.2024 г на Финском заливе. Вверху – исходная запись сейсмостанции (DAQlink-4, геофон PC-803), в центре – сейсмметрическая запись после применения фильтра низких частот от 3.5 с, внизу – запись данных гравиметра (Autograv CG-6).

гравиметрической съемки. По полевым материалам авторов наилучший полученный коэффициент корреляции составляет 0.64 [15], результаты других авторов по материалам лабораторных исследований говорят о возможности получения коэффициента корреляции около 0.9 [8].

Другой подход заключался в использовании двух гравиметров, аналогично методике магнитометрической съёмки, когда один из приборов стационарен и выполняет роль вариационной станции, а второй перемещается по пикетам съёмки. Вариации вносят колебания ледовой толщи, которые, предположительно, могут распространяться на большие расстояния. Авторами такой способ реализован в пределах Финского залива на точках профиля, расположенного на расстоянии около 500 м от побережья. Толщина льда здесь составляла 30-50 см, глубина дна – около 6 м. Предварительный анализ говорит о том, что относительно высокочастотные (связанные с помехой) составляющие сигналов гравиметров, отдалённых друг от друга на льду на расстояние около 1500 м, удовлетворительно коррелируют по основным особенностям (пикам, интервалам повышенной дисперсии) кривых, однако

численный анализ еще предстоит выполнить.

Наиболее практичным и действенным решением для улучшения качества надёжных гравиметрических данных, получаемых с использованием современных высокоточных гравиметров Scintrex CG-5 и Scintrex CG-6, по мнению авторов, на текущий момент является обработка в ручном режиме «сырых данных» («raw data») гравиметров. «Сырые данные» представляют собой набор значений с датчиков силы тяжести, углов наклона и температуры, записанных с частотой 6 Гц и 1 Гц для гравиметров CG-5 и CG-6 соответственно. Для абсолютного большинства гравиметрических съёмок достаточно использования *.dat файлов, где данные замеров записываются с осреднением для, как правило, 30- или 60-секундного интервала съёмки. Такая форма обработки имеет преимущества, потому что даже при относительно спокойных погодных условиях данные, записанные в рамках одного цикла, неоднородны. Одиночный порыв ветра может значительно изменить среднее значение, полученное гравиметром автоматически, даже при активированном сейсмическом фильтре. Анализ «сырых данных» позволяет выделить



▲ Рис. 6. Схема результатов наземной и налёдной гравиметрической съемки (локальная компонента вдоль профилей) на фрагменте карты глубины расположения дочетвертичных образований [3].

участки с минимальным уровнем помех и вычислить среднее значение без учёта зашумлённых участков записи.

По результатам предварительной обработки данных, построены графики аномалий поля силы тяжести по нескольким профилям на суше и на льду. Выявлены отрицательные локальные аномалии поля силы тяжести U-образной формы, приуроченные к погребённым палеоврезам. Наличие корреляции графиков гравитационных аномалий, полученных на льду и на ближайших берегах, говорит о достоверности аномалий, выделенных в условиях осложненной налёдной съемки.

Основной результат работы заключается в опробовании различных способов повышения качества налёдных гравиметрических исследований. Предварительный анализ полученных материалов показал, что обработка «сырых данных» («raw data») гравиметров – наиболее

практичный, оперативный и эффективный способ улучшения качества гравиметрических данных в налёдных условиях.

Исследования выполнены в рамках подготовки диссертационной работы Медведева Н.О. на соискание ученой степени кандидата наук на тему: «Картирование палеодолин в восточной части Финского залива методом налёдной гравиметрии».

Литература

1. Андреев Д.С., Касьяненко А.А., Михайлов С.А., Филобоков Е.И., Хасанянов Р.Р., Чернов М.Л. Способ гравиметрических измерений в районах, для которых характерен повышенный сейсмический фон, связанный с техногенной нагруженностью. RU (11) 2 819 344 (13) С1. 2023.
2. Буданов Л.М., Сенчина Н.П., Шнюкова О.М., Горелик Г.Д. Исследование палеовреза с помощью гравиметрических наблюдений // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4, № 3. – С. 288-296
3. Геологический атлас Санкт-Петербурга. – СПб.: изд-во Комильфо. – 2009. – 57 с
4. Гравиметрическая съемка со льда. ГКИНП-04-151-82. Утвержден ГУГК 15.02.82. – М., ЦНИИГАиК, 1982.
5. Дашко Р.Э., Александрова О.Ю., Котюков П.В., Шидловская А.В. 2011. Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга // Развитие городов и геотехническое строительство. – 1. – С. 1–47. <http://www.urban-development.ru/2011/2.pdf>
6. Дергач П.А., Тубанов Ц.А., Юшин В.И., Дучков А.А. Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 22-34.
7. Дергач П.А., Дучков А.А., Юшин В.И. Использование геофонов в локальных

сетях сейсмологического мониторинга // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 140-146. – DOI 10.33764/2618-981X-2019-2-3-140-146.

8. 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

9. Зуденков И.А., Чаринцев К.А., Трусев А.А. Аэрогеофизика на беспилотных носителях: состояние и перспективы // В сборнике: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. 50-я юбилейная сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова. Москва. – 2024. – С. 167-170.

10. Кузнецова И.В., Демитиенко А.И. Типоморфные особенности самородного золота и минеральные ассоциации погребенных россыпей в палеодолинах бассейна Р. Зеи / Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: сборник докладов, Благовещенск, 02–04 октября 2018 года // Институт геологии и природопользования ДВО РАН. Том 1. – Благовещенск: Царское слово, 2018. – С. 118-121.

11. Лыгин И.В., Широкова Т.П., Токарев М.Ю., Золотая Л.А., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Фадеев А.А., Арутюнян Д.А., Любичкая А.В., Шклярчук А.Д. Комплексирование наледных гравиметрических и магнитометрических наблюдений и морской сейсморазведки в Кандалакшском заливе Белого моря // IX Международная научно-практическая конференция Морские исследования и образование. – 2020. – Т. 3. – С. 425-428.

12. Малов А.И. Эволюция изотопного

состава урана в песчано-глинистом водоносном горизонте палеодолины Северо-Двинской впадины // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 84. – С. 45-53.

13. Медведев Н.О., Сенчина Н.П., Буданов Л.М., Триколиди Г. Ю. Обоснование применимости наледной гравиметрии для поиска палеодолин в восточной части Финского залива. Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей // Материалы 49-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова. Екатеринбург. – 2023. – С. 234-236.

14. Медведев Н.О., Сенчина Н.П., Буданов Л.М., Триколиди Г.Ю. Результаты профильной гравиметрической съемки на льду Сестрорецкого разлива. В сборнике: Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. 50-я юбилейная сессия Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова. Москва. – 2024. – С. 227-231.

15. 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 // Геофизические исследования. – 2024. – №3. DOI:10.21455/gr2024.3-3 (в печати).

16. Меркулов А.В., Филобоков Е.И., Лохвицкая А.Г. Внедрение гравиметрического мониторинга с целью контроля разработки газовых месторождений мелководного шельфа арктических морей // Сборник материалов конференции «Геобайкал 2022 г.» Иркутск. 2022. – С. 85-88.

17. Осовецкий Б.М., Попов А.Г., Пактовский Ю.Г., Чуйко В.А. Источники питания и история формирования уральских россыпей алмазов // Проблемы минера-

логии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. – 2023. – № 26. – С. 196-206. – DOI 10.170072/chirvinsky.2023.196.

18. Порохина Е.А., Медведев Н.О., Сенчина Н.П. Первые результаты наледной гравиметрической съемки в Сестрорецком разливе // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. Материалы XXXIV Молодежной научной школы-конференции, посвященной памяти членкорреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова. Санкт-Петербург. – 2023. – С. 174-177.

19. Поцелуев А. А., Рихванов Л. П., Арбузов С. И. [и др.] Редкие элементы в отложениях юрских палеодолин Чулымо-Енисейской впадины (Малиновское месторождение урана) // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 6. – С. 891-899.

20. Савко А.Д., Шевырев Л. Т. Распределение тонкого золота в палеодолинных отложениях Воронежской антеклизы // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2009. – № 4. – С. 39-45.

21. 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

22. Reinhard K., Rumpel H.-M., Scheer W., Wiederhold H. Groundwater resources in buried valleys – a challenge for geosciences // Hannover: Leibniz Inst. for Applied Geosciences (GGA-Institut). – 2006. – 299 p.

Подробнее об авторах



**Медведев
Никита Олегович**

геофизик 1 категории,
Всероссийский научно-
исследовательский
геологический институт
им. А.П. Карпинского



**Буданов
Леонид Михайлович**

научный сотрудник,
кандидат географических
наук. Всероссийский
научно-исследовательский
геологический институт
им. А.П. Карпинского



**Сенчина
Наталья Петровна**

доцент кафедры
геофизики, кандидат
геолого-минералогических
наук, Санкт-Петербургский
горный университет
императрицы
Екатерины II



**Горелик
Глеб Дмитриевич**

доцент кафедры
геофизики, кандидат
технических наук,
Санкт-Петербургский
горный университет
императрицы
Екатерины II