

схему участка между двумя антарктическими станциями: п/б Молодежная и «Гора Вечерняя», а также уточнить последовательности деформаций метаморфических комплексов.

Данная задача может быть решена только при совместной интерпретации геологических и геофизических данных, именно поэтому крайне важно было выполнить совместный комплекс геолого-геофизических исследований.

Однако научный потенциал собранного геологического материала выходит за рамки локального структурного картирования. Породы оазиса, представленные преимущественно гнейсами Рейнерского комплекса протерозойского возраста, прорванными интрузиями раннепалеозойских гранитов и пегматитов, структурно принадлежат к Вегенер-Моусонскому подвижному поясу (Каменев Е. Н., Шулятин О.Г., Михайлов В.М. и др. Состав, структура и условия образования архейского нейпирского метаморфического комплекса Земли Эндерби (Восточная Антарктида) // Региональная геология и металлогения. 2017. № 71. С. 53–66). Эта колоссальная структура окаймляет архейский Нейпирский блок и прослеживается в Восточной Антарктиде более чем на 4000 километров. Известно, что протолиты рейнерских гнейсов сформировались около 2 млрд лет назад за счет переработки более древних осадочных и вулканогенных толщ Нейпирского комплекса. За свою долгую геологическую историю породы Рейнерского комплекса пережили серию глобальных тектоно-термальных событий, охвативших площади более 100 000 км²: от первичной кристаллизации магм до гранулитового метаморфизма (около 1000–900 млн лет назад) и мощного тектоно-термального события в раннем палеозое (550–500 млн лет

назад). Высокоточное изотопное датирование отобранных в ходе сезона интрузивных образований поможет установить точное время финальных деформаций этого подвижного пояса, синхронных с окончательной сборкой суперконтинента Гондвана.

Особый научный интерес представляют обнаруженные в структуре гнейсовых толщ зажатые тектонические пластины (будины) пироксенитов. Установление их абсолютного возраста, термодинамических параметров образования и геохимический анализ дадут возможность ответить на вопрос об их происхождении (являются ли они мантийными реликтами или фрагментами древней океанической коры). Это в свою очередь позволит провести прямые межрегиональные корреляции тектонических событий Земли Эндерби с другими ключевыми геологическими узлами Восточной Антарктиды, такими как кратонный блок оазиса Вестфолль и полиметаморфические комплексы Холмов Ларсеманн (район станции Прогресс), где также масштабно проявлены следы панафриканской тектонической активизации.

Выявление подобных корреляционных связей носит ключевой характер для расшифровки последовательности древних тектоно-магматических эпох и расширяет наши представления об истории образования и развития Земли.

Геолого-геофизические исследования выполнены ФГБУ «Институт Карпинского» в рамках Договора с ФГБУ «АНИИ» №71 Р/16/2025/11 согласно программе работ, утвержденной Росгидрометом.

*Н.О. Медведев, Д.С. Фатеев
(ФГБУ «Институт Карпинского»).*
Фото авторов

АБСОЛЮТНЫЕ ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА НЭС «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС»: ПЕРВЫЙ ОПЫТ, ТРУДНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Гравиметрия — это раздел науки (на стыке геофизики и геодезии), который занимается измерением силы тяжести и изучением гравитационного поля Земли.

Гравитационное поле Земли (ГПЗ) является фундаментальной физической характеристикой планеты, определяющей ее фигуру (геоид), динамику литосферы и процессы в мантии. Точные знания о распределении ускорения свободного падения критически важны для построения глобальных геодезических референц-систем, высокоточного позиционирования в высоких широтах, а также для глубинного геологического картирования и поиска полезных ископаемых.

Главной характеристикой ГПЗ является ускорение свободного падения, оно обозначается буквой *g*. Среднее значение ускорения свободного падения на поверхности Земли составляет: $g \approx 9,81 \text{ м/с}^2$. Единицами измерения ускорения в геофизике являются Гал (назван в честь Г. Галилея) ($1 \text{ Гал} = 0,01 \text{ м/с}^2$) и производные величины — мГал, мкГал.

Геоид (модель формы Земли) — это реальная физическая форма Земли. Это не поверхность суши, а поверхность уровня океана в спокойном состоянии, мысленно продолженная под материи (рис. 1).

Перечислим *главные задачи гравиметрии*:

— геодезические: построение точной модели формы Земли (геоида) для решения фундаментальных задач и позиционирования;

— геологические: картирование границ блоков земной коры разного типа, поиск и разведка месторождений полезных ископаемых;

— оперативные, связанные с обороной и навигацией, — для точной работы ракетных систем и позиционирования подводных лодок.

Особую актуальность этим исследованиям придает стремительно меняющаяся геополитическая обстановка в Арктике. Регион, еще недавно воспринимавшийся как «зона мира» и международного сотрудничества, сегодня превращается в арену острой конкуренции между ведущими мировыми державами. Как отметил министр иностранных дел России С.В. Лавров, страны НАТО «ведут дело к милитаризации региона, созданию там очагов международной напряженности», фактически стремясь превратить Арктику в «новый фронт противостояния» для сдерживания развития России и ее союзников (<https://tass.ru/politika/28059057?ysclid=mth3jfojvn193163895>). На этом фоне точное знание гравитационного поля Земли

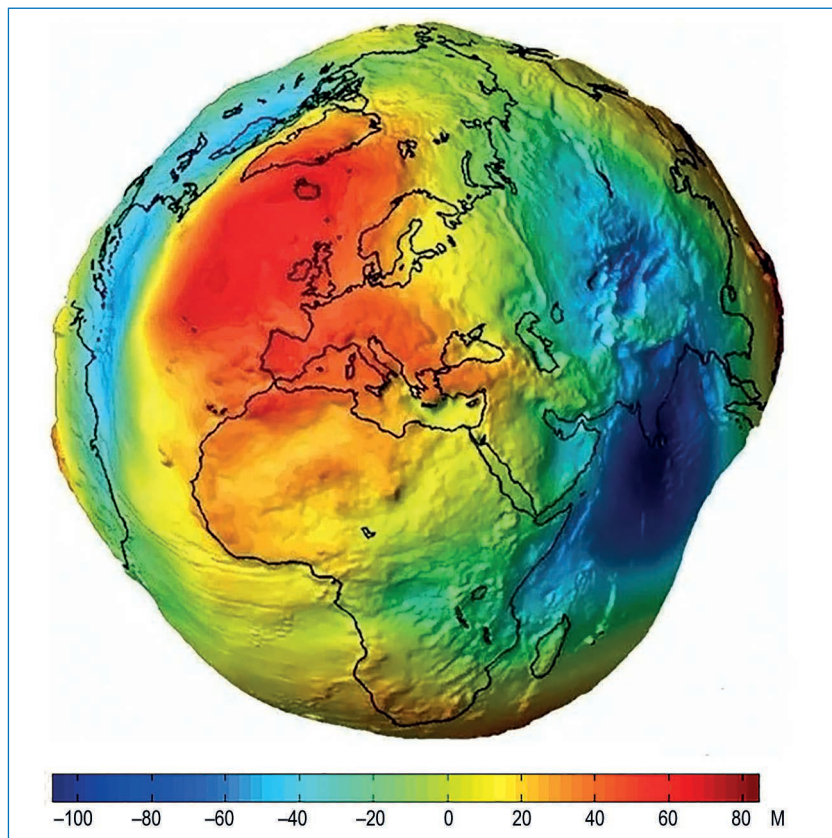


Рис. 1. Форма геоида

приобретает не только научное, но и стратегическое значение. Таким образом, абсолютные гравиметрические измерения в районе Северного полюса, о которых идет речь в данной статье, являются не только фундаментальным научным достижением, но и вкладом в укрепление национальной безопасности и технологического суверенитета России в Арктике — регионе, где противостояние сверхдержав уже становится реальностью.

Исторические предпосылки: от маятника Нансена к баллистическому гравиметру на НЭС «Северный полюс»

Развитие гравиметрических исследований в Арктике охватывает более чем 130-летний период, в течение которого менялись технические средства, методология и организационные формы работ. Этот путь — от единичных героических экспериментов до планомерных высокоточных наблюдений — наглядно демонстрирует эволюцию научно-технической мысли и позволяет оценить уникальность современных достижений на ледостойкой платформе «Северный полюс».

Первый шаг: экспедиция Ф. Нансена на «Фраме» (1893–1896). Отправной точкой арктической гравиметрии по праву считаются работы, выполненные в ходе знаменитого дрейфа судна «Фрам» под руководством Фритьофа Нансена (рис. 2). В рамках подготовки к экспедиции Нансен приобрел маятниковый прибор системы Sterneck с двумя маятниками, предполагая использовать его для измерений на суше в случае обнаружения неизвестных земель. Однако уникальность экспедиции — длительный дрейф на замороженном во льды судне — позволила предпринять попытку гравиметрических наблюдений непосредственно на борту.

Исполнителем измерений выступил Сигурд Скотт-Хансен (штурман и метеоролог экспедиции), а научное руководство и калибровку прибора обеспечивал профессор Оскар Эмиль Шиэтц из Университета Осло, который обработал полученные данные и опубликовал их анализ в 1901 году.

Несмотря на то, что точность этих измерений была невысокой (порядка 10–15 мГал) из-за остаточных вибраций и невозможности абсолютной привязки, они имели эпохальное значение:

- это были первые в мире гравиметрические определения, выполненные в открытом море;

- данные, полученные в высоких широтах, позволили уточнить параметры полярного сжатия Земли и внесли вклад в построение Потсдамской гравиметрической системы;

- опыт Нансена показал принципиальную возможность проведения гравиметрических наблюдений на дрейфующей ледовой основе, хотя технические ограничения того времени не позволяли достичь высокой точности.

Первые измерения на дрейфующих льдах: СП-1 (1937–1938). Следующий качественный скачок произошел спустя более чем 40 лет, когда в ходе героической экспедиции на станции «Северный полюс-1» (СП-1) были впервые выполнены систематические

гравиметрические измерения.



Рис. 2. Дрейфующий «Фрам», март 1894 года.
Фото Ф. Нансена из книги "Farthest North" (London, 1897)



Рис. 3. Журнал и записи результатов гравиметрических наблюдений, выполненных Е.К. Федоровым. Фонды ААНИИ

гравиметрические наблюдения непосредственно на дрейфующей льдине. Эти работы проводились с использованием маятникового прибора, а измерения ускорения свободного падения осуществлял геофизик экспедиции Евгений Константинович Федоров — один из легендарной четверки папанинцев (рис. 3).

В обязанности Е.К. Федорова входило проведение комплекса геофизических наблюдений: гравиметрические и магнитные измерения, а также астрономическое определение координат дрейфующего лагеря. Его самоотверженный труд в условиях полярной ночи и постоянной угрозы разломов и трещин позволил впервые получить связанную сетку гравиметрических данных в центральной части Северного Ледовитого океана.

Значение этих работ выходило далеко за рамки собственно гравиметрии: они продемонстрировали, что дрейфующие станции могут служить полноценными научными обсерваториями, а сам Е.К. Федоров в 1938 году был удостоен звания Героя Советского Союза. Опыт СП-1 стал методической основой для всех последующих гравиметрических экспедиций на дрейфующих льдах вплоть до конца XX века.

Систематический этап: Северная гидрографическая экспедиция (СГЭ) и Воздушные высокоширотные экспедиции (ВВШЭ) «Север» (1961–1992). Настоящий прорыв в изучении гравитационного поля Арктики связан с деятельностью СГЭ. Начиная с 1961 года, сначала с использованием инфраструктуры Высокоширотных воздушных экспедиций (ВВЭ) «Север-13» и «Север-14», организованных ААНИИ, а с 1963 года самостоятельно проводились ВВШЭ «Север» (рис. 4). Вплоть до распада СССР силами СГЭ с привлечением геофизиков из НИИ геологии Арктики в ходе ВВШЭ были проведены масштабные комплексные океанографические и геофизические исследования на дрейфующем льду.



Рис. 4. Наблюдения на гравиметрах перед вылетом в рейс на дрейфующем опорном пункте ВВШЭ «Север-14», 1962 год. На переднем плане — съемочные гравиметры, слева — два стационарных гравиметра, в палатке — маятниковый прибор ММП-П. Фонды ААНИИ

В этот период:

- выполнялись гравиметрические наблюдения как на льду (с использованием сначала маятниковых приборов ММП-П и АМП-1, а затем и кварцевых гравиметров), так и с борта самолетов и вертолетов при авиадесантных съемках;
- были заложены сотни опорных точек, охвативших практически всю акваторию Советского сектора Арктики;
- гравиметрические данные начали систематически увязываться с навигационными и батиметрическими измерениями, что позволило строить первые региональные карты аномалий силы тяжести.

Организационную и научную координацию этих работ обеспечивали такие выдающиеся гидрографы, как начальник СГЭ Сергей Константинович Немилов, внедривший геофизические методы в комплексные исследования океана. Вклад СГЭ в изучение Арктики был настолько значителен, что одна из высочайших вершин Новой Земли была названа горой СГЭ.



Рис. 5. Д.К. Дронов у НЭС «Северный полюс» в начале дрейфа СП-41. Октябрь 2022 года. Фото Д.К. Дронова

Подробная история этого этапа нашла отражение в фундаментальном труде О.Ю. Корнеева «Гидрографическая экспедиция Северного флота. Век в Арктике (1924–2024). Малоизвестные факты», который является авторитетным документальным источником по данной теме.

Эпоха высокоточных морских съемок: экспедиции «Арктика-2014», «Арктика-2019» и «Арктика-2020». Следующий этап связан с комплексными экспедициями на научно-экспедиционном судне (НЭС) «Академик Федоров», которые проводились для сбора геофизических данных в обоснование границ российского континентального шельфа в Арктике.

Экспедиция «Арктика-2014» стала первой в мире, выполнившей комплекс геофизических исследований в районе Северного полюса. Общая протяженность маршрутов составила 10 000 км, получено более 70 000 гравиметрических точек с использованием двух гравиметров: «Чекан-АМ» и «Шельф-Э». Калибровочные измерения проводились в опорном пункте в Наантали (Финляндия) до и после рейса.

«Арктика-2019» (известная также как «Шельф-2019») была сосредоточена на получении дополнительных данных о строении земной коры в районе хребта Гаккеля и прилегающих котловин. Протяженность гравиметрических профилей составила 4296 линейных километров.

«Арктика-2020» стала наиболее масштабной: протяженность съемки достигла 14 851 линейных км, подготовлен каталог из 81 896 независимых измерений. Использовались гравиметры «Чекан-АМ» и «Попугай-ГК».

Все три экспедиции сталкивались с типичными для высоких широт сложностями: работа в условиях сплошного льда, ограниченное маневрирование, длительная изоляция от опорных пунктов. Однако именно эти работы создали обширный массив относительных гравиметрических данных, который впоследствии требовал абсолютной привязки.

Все же и на этом этапе измерения оставались относительными — они проводились от опорных гравиметрических пунктов, которые могли находиться на тысячи километров от района работ. Дрейф нуля прибора, особенно при длительных автономных экспедициях, оставался серьезной проблемой, и его коррекция выполнялась лишь приближенно, на основе экстраполяции линейных трендов.

Современность: НЭС «Северный полюс» и абсолютные измерения. Завершающее звено этой исторической цепи — ввод в эксплуатацию НЭС «Северный полюс» (ледостойкой самодвижущейся платформы, ЛСП), работа на этом судне использовала преимущества предыдущих подходов и открыла принципиально новые возможности (рис. 5).

Недостатки имеющихся сведений о гравитационном поле в Арктике

В отличие от умеренных и экваториальных широт, Арктический регион остается «белым пятном» на карте точности ГПЗ. Современные спутниковые модели (например, EGM2008, EIGEN-6C4) в этом районе имеют погрешность на порядок выше, чем в средних широтах, что обусловлено совокупностью естественных, технических и методических факторов.

Основные причины пониженной точности связаны, во-первых, со сложностью измерений с морскими гравиметрами в условиях ледокольной проводки исследовательских судов (такое судно ограничено в маневре и следует за идущим впереди ледоколом, последний при этом может идти, неравномерно меняя курс и скорость или даже обходя трудные участки); во-вторых, с пониженной точностью спутниковой альтиметрии в случае покрытия вод льдом. Поясним, что основной источник погрешности альтиметрических наблюдений в Арктике — искажение сигнала при отражении от поверхности льда. Разные участки Арктики неравномерно покрыты льдом, и погрешности наблюдений меняются в зависимости от района. Проникновение радарного сигнала в снежный

покров зависит от свойств снега и погодных условий, что вносит дополнительную неопределенность в измерения высоты морской поверхности. Наконец, третья причина пониженной точности — невозможность полного учета и компенсации инерциальных ускорений, возникающих при классических измерениях на подвижном носителе (самолете, вертолете, судне). При измерениях на подвижном основании (судно, самолет) показания гравиметра искажаются инерциальными ускорениями и наклонами основания, влияние которых может достигать сотен и тысяч миллигал. Разделение гравитационного сигнала и инерционных помех представляет собой сложную научно-техническую задачу, для решения которой требуются высокая точность систем позиционирования (GPS ГЛО-НАСС) и сложные алгоритмы обработки данных.

Ввод в эксплуатацию НЭС «Северный полюс» принципиально изменил ситуацию. Это судно — платформа, вмороженная в многолетний лед, — обеспечивает беспрецедентно стабильное основание на протяжении всего дрейфа (до двух лет). Это позволило впервые поставить вопрос о проведении абсолютных баллистических измерений непосредственно в высокоширотной акватории СЛО.

Особенностью судна является то, что оно вмораживается в лед и находится в дрейфе вместе со льдиной. Предполагается, что вмораживание в лед может достаточно жестко фиксировать судно и минимизировать или даже исключить внешние воздействия на гравиметр, такие как вертикальные ускорения и качка (рис. 6). Как

показал дальнейший опыт, на показания гравиметра влияла не качка, а нарастающий постоянный крен судна, который мог достигать нескольких градусов.

Современное гравиметрическое оборудование на НЭС «Северный полюс»

Гравиметрический комплекс НЭС «Северный полюс» представляет собой уникальное сочетание двух типов приборов — абсолютного и относительного гравиметров, работающих в интеграции для достижения максимальной точности и надежности измерений в условиях высоких широт (рис. 7).

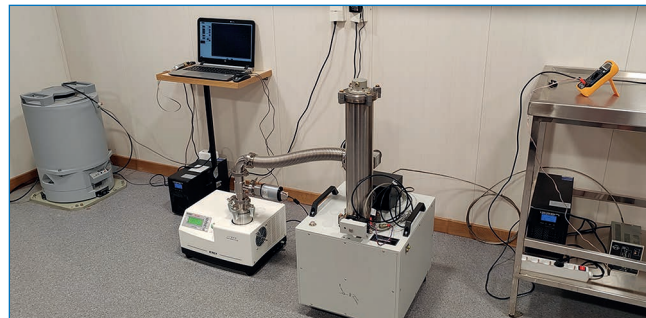


Рис. 7. Общий вид измерительного гравиметрического комплекса, включающего «Чекан-АМ» и ГАБЛ-ПМ, на НЭС «Северный полюс». Август 2024 года. Фото Д.К. Дронова

Относительный гравиметр «Чекан-АМ» (модель «Шельф») — это высокоточный морской гравиметрический комплекс, который быстро устанавливается на любом судне. Прибор состоит из гравиметрического датчика с двойной кварцевой упругой системой крутильного типа, помещенного на гиросtabilизированную платформу (рис. 8). Такое решение обеспечивает устойчивость к возмущающим ускорениям, по которой этот отечественный комплекс превосходит зарубежные аналоги.

Прибор имеет некоторые особенности:

— определения ускорения силы тяжести (УСТ) на маршруте производятся от известного опорного гравиметрического пункта (ОГП), который может находиться

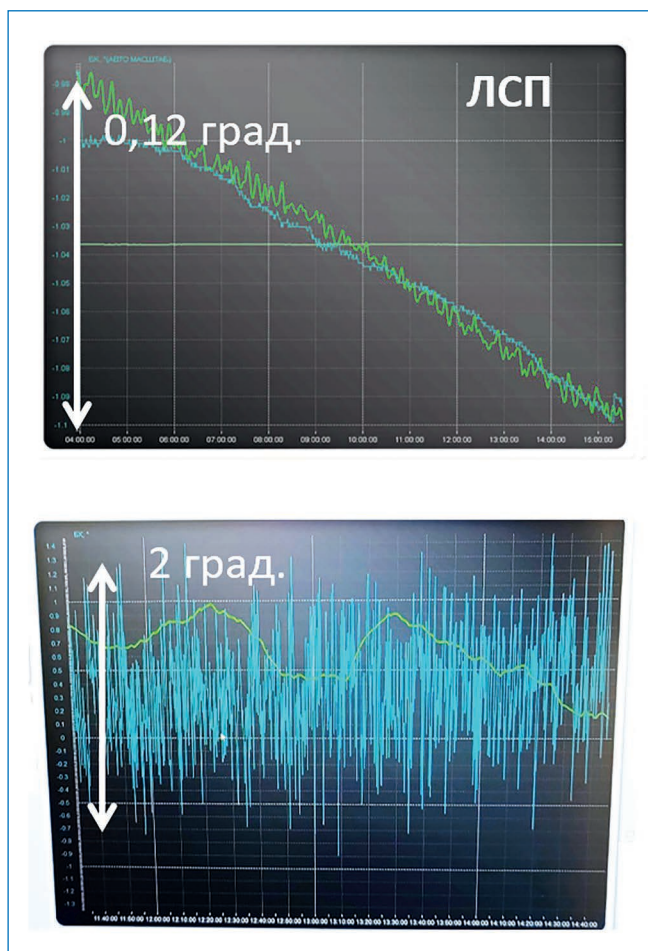


Рис. 6. Сравнение бортовой качки НЭС «Северный полюс» при вмораживании (вверху) и при волнении моря с высотой волны 2 м (внизу)

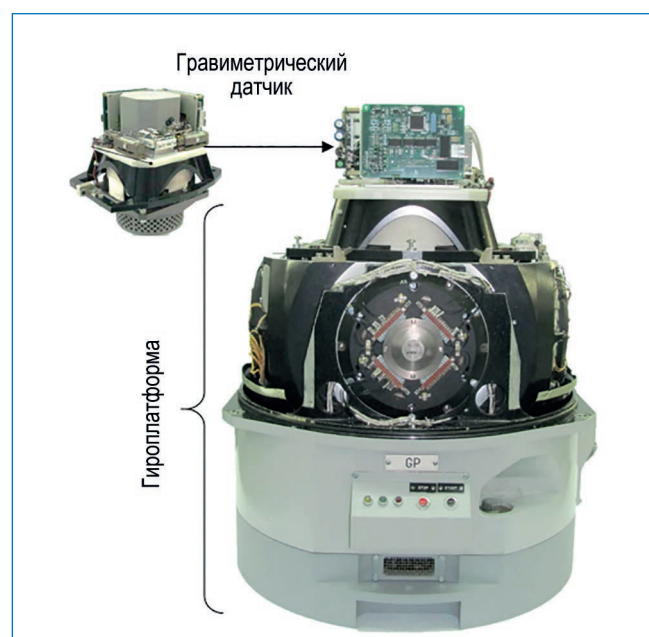


Рис. 8. Относительный гравиметр «Чекан-АМ» (модель «Шельф»)

на значительном удалении от пунктов проведения измерений;

— дрейф нуля-пункта или дрейф прибора — медленное изменение его показаний во времени из-за «усталости» упругой системы. Начальные опорные измерения показали 0,59 мГал в сут (рис. 9), а финальные опорные измерения — 0,79 мГал в сут, что говорит о нелинейности дрейфа и требует ее учета.

Относительный гравиметр «Чекан-АМ» довольно надежен: его срок службы составляет 10 лет, а назначенный ресурс равен 50 000 часам. Рабочий температурный диапазон варьирует от +10 до +24 °С.

Абсолютный лазерный баллистический гравиметр ГАБЛ-ПМ. Принцип действия гравиметра ГАБЛ-ПМ основан на измерении интервалов времени, за которые свободно падающее тело проходит заданные интервалы пути. Вычисляемое по результатам измерений этих интервалов значение g определяет величину ускорения силы тяжести.

К особенностям этого абсолютного гравиметра относятся:

- возможность определения точного значения УСТ в конкретной точке;
- не требует калибровки относительно других точек, не нуждается в ОГП;
- измерения требуют точной стабилизации (неподвижное основание) и отсутствия любых внешних воздействий;
- это дорогостоящее оборудование, при работе с ним нужна высокая квалификация.

Срок службы ГАБЛ-ПМ при проведении регулярных профилактических работ также составляет 10 лет, а рабочий температурный диапазон находится в пределах от +10 до +30 °С.

Абсолютный гравиметр предназначен для высокоточного определения абсолютного значения ускорения силы тяжести на специальных наземных гравиметрических пунктах 1-го класса. Обычно для компенсации морской качки гравиметрический датчик устанавливается на гиростабилизированную платформу, как это реализовано у «Чекан-АМ». Поэтому было необходимо в сжатые сроки во время подготовки НЭС «Северный полюс» к отплытию определить возможность использования гравиметра без гиростабилизирования и выполнить ряд мер по его адаптации в ограниченных условиях. Прежде всего надо было оценить погрешность абсолютных измерений на ОГП на пирсах вблизи судна, затем — на судне при его вмораживании.

Опорные измерения на причале Санкт-Петербурга

Все работы по определению корректности работы гравиметра ГАБЛ-ПМ проводились в порту «Петролеспорт». Для этого первоначально измерения выполнялись на бетонном пирсе (причале), максимально близко к точке расположения прибора в лаборатории специальных исследований (рис. 10).

Был проведен сеанс измерений g , состоящий из трех серий по 100 единичных бросков. Получен следующий результат:

$$g_{\text{пирс}} = 14,501 + a \text{ мГал},$$

$$\text{среднеквадратичная ошибка (СКО): } 0,024 \text{ мГал},$$

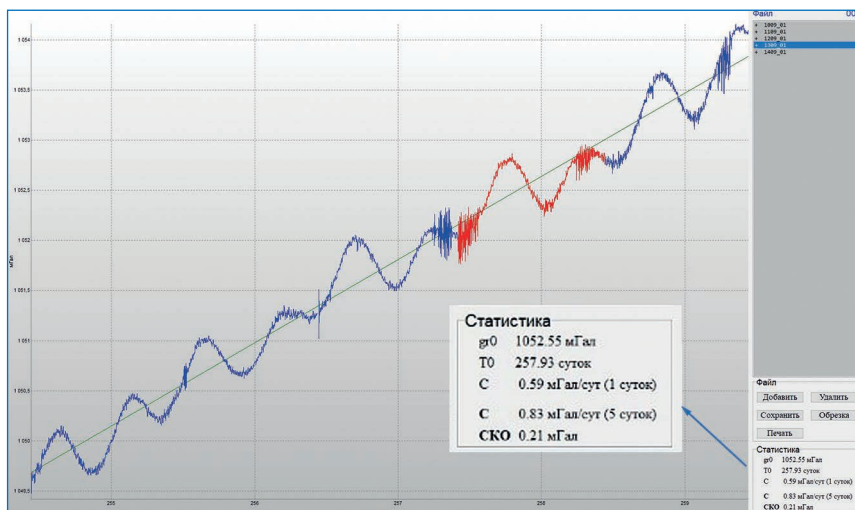


Рис. 9. График опорных измерений в порту Мурманска с явным дрейфом нуля-пункта

где a — произвольная константа (константы a , b , c вводятся из-за ограничения публикаций абсолютного значения ускорения силы тяжести с определенной точностью).

Такие результаты соответствуют заявленным паспортным значениям гравиметра ГАБЛ-ПМ для наземных стационарных пунктов 1-го класса. Но они недостижимы на борту судна, поэтому возникла необходимость адаптации абсолютного гравиметра к условиям дрейфа.



Рис. 10. Транспортный ящик, ПК, гравиметр и сервисное оборудование на причале «Петролеспорта» (Санкт-Петербург). Август 2024 года. Фото Д.К. Дронова



Рис. 11. Абсолютный гравиметр ГАБЛ-ПМ в лаборатории специальных исследований на борту НЭС «Северный полюс». Август 2024 года. Фото Д.К. Дронова

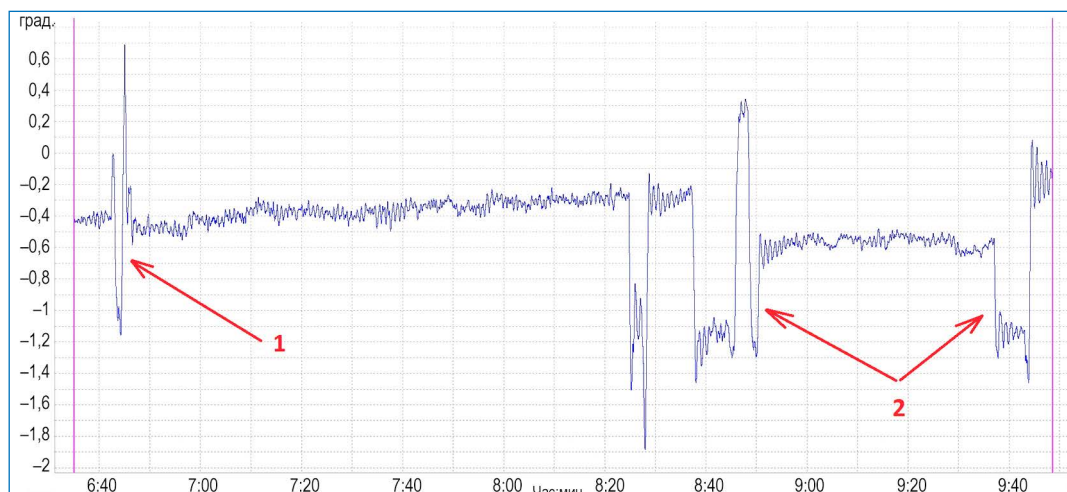


Рис. 12. Бортовая качка за трехчасовой период в ухудшенных погодных условиях. «Петролеспорт», 22 августа 2024 года

Определение параметров гравиметра и методики проведения измерений для возможного использования ГАБЛ-ПМ на борту НЭС «Северный полюс». После окончания измерений на пирсе гравиметр ГАБЛ-ПМ был установлен на судне в лаборатории специальных исследований (рис. 11).

Для анализа работы гравиметра ГАБЛ-ПМ брались данные из программы относительного гравиметра «Чекан-АМ», который был установлен рядом. Регистрирующая программа записывала в файл параметры качки судна и была синхронизирована по времени с точностью до 1 секунды с регистрирующей программой гравиметра ГАБЛ-ПМ.

Во время исследований выяснялось влияние качки на точность показаний прибора. Для частичной компенсации низкочастотной качки оператору приходилось постоянно вручную подстраивать вертикаль абсолютного гравиметра, анализируя при этом движение блика рабочего луча, полученного с ПЗС-матрицы скоростной камеры прибора в системе выставления вертикали, переводя процесс измерения в режим паузы.

Тестовые измерения проводились в течение нескольких дней, при этом резкие порывы ветра усиливали угол наклона судна (рис. 12, цифра 1).

Также на графике качки (рис. 12, цифра 2) отразилась работа крана, во время которой резко изменился крен судна, что в принципе могло привести к выходу из строя абсолютного гравиметра.

По результатам проведенных исследований в порту была разработана специальная методика по адаптации измерений абсолютным гравиметром на подвижном основании без использования гироплатформы. В дальнейшем, после перехода НЭС «Северный полюс» в порт Мурманск, были проведены повторные измерения с целью обучения участников экспедиции «Северный полюс-42» (СП-42). Результаты опытных работ с абсолютным баллистическим лазерным гравиметром ГАБЛ-ПМ на пирсе, в портах и на борту НЭС подробно описаны в большой статье, которая принята в печать и будет опубликована в конце 2026 года (Носов Д.А., Дронов Д.К., Турбин Ю.Г., Сизиков И.С. Первый опыт работы абсолютного лазерного баллистического гравиметра ГАБЛ-ПМ, установленного на борту ледостойкой платформы без гиросtabilизации // Геология и геофизика. 2026. Т. 67. № 11).

Предварительные результаты абсолютных измерений во время дрейфа СП-42

По окончании движения, после вмораживания НЭС «Северный полюс» в лед и начала дрейфа группой операторов абсолютный гравиметр ГАБЛ-ПМ был подготовлен к проведению измерений, согласно требованиям инструкции, составленных предварительно по итогам

Таблица

Результаты измерений, полученные во время дрейфа СП-42

№	Дрейф, км	Длительность проведения, ч	Ветер, м/с	Глубина, м	СКО, мГал
1	0,8	0,8	5	930	0,5
2	1,1	0,8	4	950	0,74
3	0,2	0,9	2	3300	0,89
4	0,7	0,9	9	2530	0,94
5	0,8	1,5	7	2840	0,37
6	0,6	1,5	6	3260	0,14
7	1,1	1,5	6	3223	0,1
8	0,1	1,5	5	2664	0,239
9	0,2	1,5	6	2529	0,143
10	0,5	1,4	6	2420	0,068
11	0,3	0,6	7	2005	0,083
12	0,4	1,5	2	3088	0,087
13	0,2	1,5	3	1691	0,054
14	0,2	1,5	4	3193	0,174
15	0,7	1,8	6	4345	0,228
16	0,5	1,6	6	4266	0,221
17	0,8	1,6	12	4266	0,351
18	1,2	1,8	8	4350	0,875
19	0,2	1,5	5	4354	0,278
21	0,9	1,7	7	4335	0,568
22	0,7	1,4	7	4319	0,2281
23	1,0	1,3	8	4337	0,411
24	0,1	1,4	6	4349	0,228
25	0,5	1,4	6	4324	0,331
26	0,1	1,4	4	4309	0,205
27	0,1	1,4	15	3967	0,189
28	0,3	1,3	6	2957	0,147
29	0,3	1,3	6	3341	0,235
30	0,4	1,2	10	3717	0,259
31	1,5	1,3	11	4043	0,161
32	0,2	1,3	12	3975	0,370

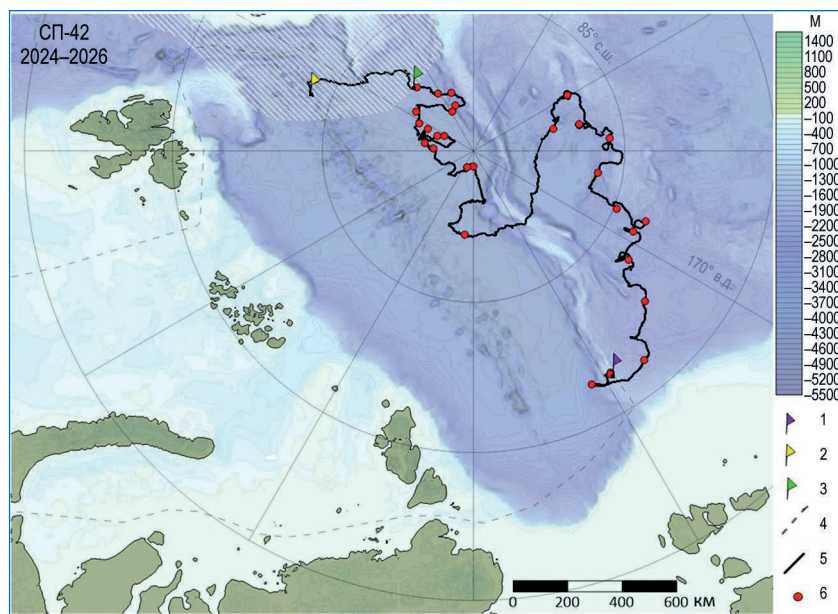


Рис. 13. Маршрут дрейфа СП-42 с указанием мест проведения абсолютных измерений гравитационного поля на карте рельефа суши и дна акваторий:

1 — старт дрейфа; 2 — завершение дрейфа; 3 — завершение научной программы в связи с вхождением в исключительную экономическую зону (ИЭЗ) Дании; 4 — маршрут НЭС до и после дрейфа (в направлении г. Мурманска); 5 — траектория дрейфа; 6 — положение пунктов измерения абсолютных значений гравитационного поля. Штриховка показывает ИЭЗ Дании

работ в портах Санкт-Петербурга и Мурманска. Основными требованиями этих инструкций являлись:

- выбор времени проведения измерений при минимуме вибраций (минимальная нагрузка на дизельные установки, отключенный лифт, минимальное передвижение персонала по палубам судна и др.);
- отсутствие работы кранов или других механизмов, которые влекут за собой бортовую качку;
- выбор времени проведения измерений при минимальном дрейфе льдины;
- анализ погодных условий, подбор дня измерений;
- корректировка вертикали прибора при необходимости.

28 сентября 2024 года в Севером Ледовитом океане в районе хребта Ломоносова впервые в истории было произведено первое измерение классическим баллистическим гравиметром.

Всего за время экспедиции было проведено 32 измерения. Условия проведения измерений и средне-

квадратическая ошибка (СКО), с которой они проводились, сведены в общую таблицу.

Маршрут экспедиции СП-42 на фоне карты рельефа суши и дна океана по данным глобальной модели с отмеченными точками проведения измерений представлен на рис. 13.

Коррекция нуля-пункта относительного гравиметра «Чекан-АМ»

Регистрация относительных данных велась непрерывно с использованием «Чекан-АМ». Относительный гравиметр подвержен дрейфу нуля-пункта — медленному изменению его показаний во времени, связанному с «усталостью» упругой системы чувствительного элемента. Эта поправка особенно значима при длительных автономных экспедициях, где отсутствует возможность частой калибровки на опорных гравиметрических пунктах.

На рис. 14 представлены результаты измерений с использованием двух гравиметров на борту НЭС «Северный полюс» в экспедиции СП-42. Здесь четко виден дрейф гравиметра «Чекан-АМ»,

который содержит значительную нелинейную компоненту и не может быть определен без использования абсолютного гравиметра.

Благодаря полученным абсолютным измерениям, можно скорректировать нелинейность ухода нуля-пункта гравиметра и получить высокоточные гравиметрические данные по всему маршруту дрейфа экспедиции.

Трудности: почему это не сделали раньше?

Проведение подобных исследований кажется несложным, однако прежде они не выполнялись по нескольким причинам. Во-первых, следует отметить хрупкость оборудования: абсолютный гравиметр — это чрезвычайно дорогостоящий и легко поддающийся повреждениям прибор. Он требует исключительно стабильных условий для корректной работы. В период работы традиционных дрейфующих станций специалисты не могли обеспечить доставку и эксплуатацию подобных приборов — ледяное поле нестабильно, подвижно и подвержено трещинообразованию.

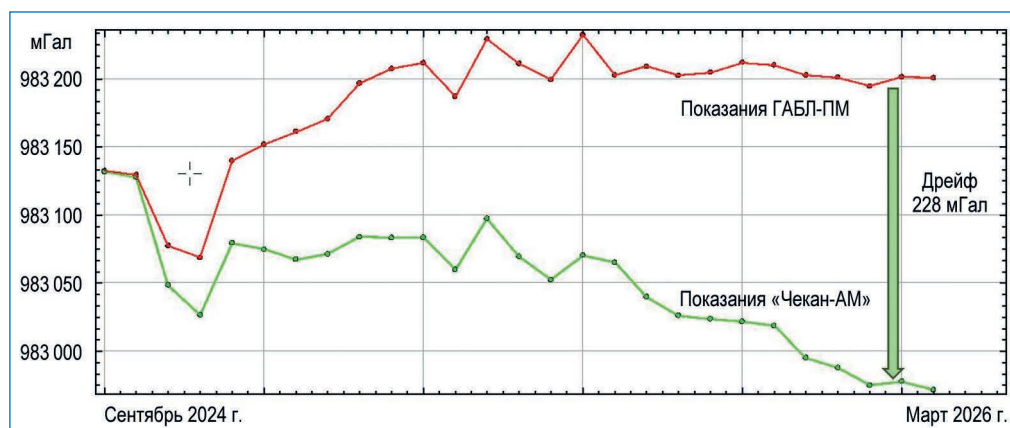


Рис. 14. Сопоставление показаний относительного и абсолютного гравиметров во время экспедиций СП-42

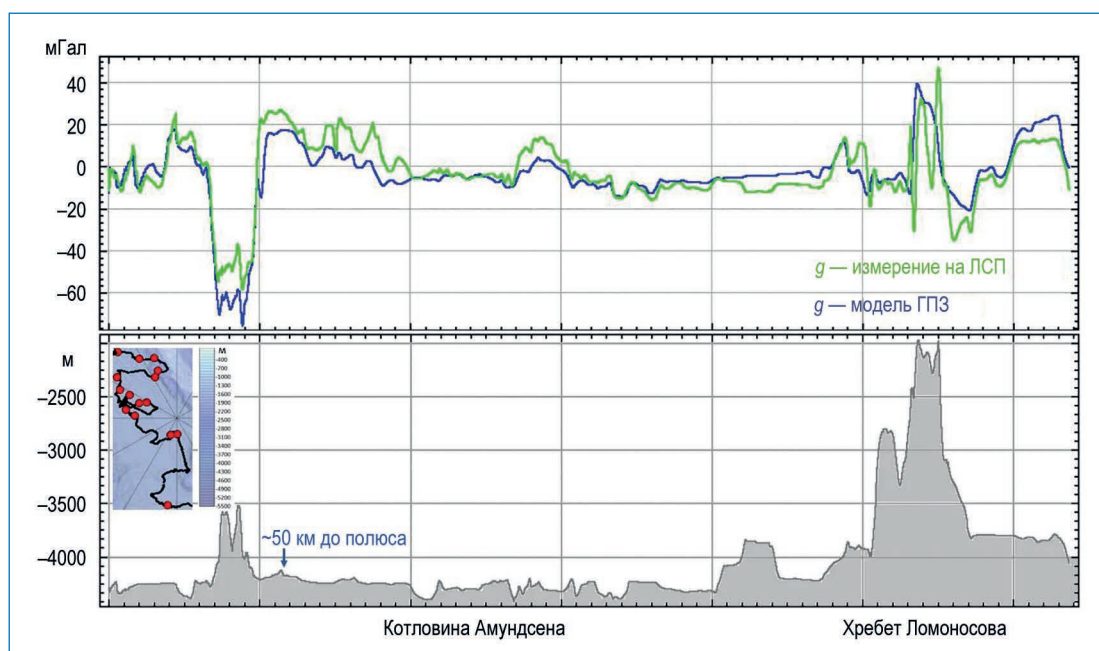


Рис. 15. Сравнение графиков ГПЗ с данными, полученными в ходе дрейфа СП-42

Во-вторых, сохраняется проблема качки и вибраций: даже на НЭС «Северный полюс», несмотря на то что судно вморожено в лед, имеются микровибрация и остаточная подвижность. Гравиметр ГАБЛ-ПМ изначально создавался для работы на наземных пунктах, а не на борту движущегося (пусть и дрейфующего) судна. Геофизикам — участникам СП-42 пришлось решать сложную задачу: адаптировать прибор к работе без использования гиросtabilизированной платформы.

В-третьих, необходима специальная подготовка технических сотрудников. Сложность в обслуживании гравиметрического оборудования требует тренировки и «наметанности глаза» для проведения измерений, так как необходимо вручную решать проблемы стабилизации гравиметра, а также вручную контролировать броски и выставления вертикали.

Применение полученных данных

Подобные исследования являются в наше время необходимыми. Они позволяют повысить точность моделей ГПЗ в Арктическом регионе, что имеет критическое значение для фундаментальных и прикладных исследований. В геофизике и геологии точные данные о ГПЗ необходимы для построения комплексных геолого-геофизических разрезов, изучения строения земной коры и мантии. В сфере навигации и безопасности уточнение моделей ГПЗ позволит повысить точность спутниковых навигационных систем в высоких широтах, что необходимо для развития судоходства и авиации.

Полученные и обработанные данные с СП-42 были сопоставлены с данными моделей гравитационного поля Земли. На рис. 15 представлено сравнение графиков ГПЗ в редукции в свободном воздухе, полученного по результатам измерений на НЭС «Северный полюс», и снятого с модели ГПЗ за весь период дрейфа, а также данные батиметрии вдоль траектории дрейфа СП-42. Видно, что на отдельных участках отклонение значений аномалий силы тяжести, полученных по материалам гравиметрической съемки, от модельных значений составляет до 20–40 мГал.

Перспективы: что дальше?

Гравитационная сеть высшего уровня в настоящее время активно развивается. Она очень неравномерна по территории и по точностям определений значений. Благодаря проведению экспедиций СП на НЭС «Северный полюс» эти «белые пятна» будут постепенно заполняться высокоточными данными. Таким образом, можно говорить о расширении гравиметрической сети России.

Формат проведения экспедиций на НЭС «Северный полюс» позволяет собирать огромный массив гравиметрических данных на протяжении всего многомесячного дрейфа (до двух лет). Это дает возможность изучать временные вариации гравитационного поля, связанные с геодинамическими процессами, т. е. осуществлять *долгосрочный мониторинг*.

Ресурс НЭС «Северный полюс» обеспечивает возможность продолжения программы исследований на годы вперед. Наблюдения не ограничатся одной экспедицией. Работы планируется продолжить в ходе СП-43, СП-44 и далее. Каждая новая дрейфующая станция будет накапливать уникальный массив абсолютных гравиметрических данных, создавая основу для фундаментальных научных открытий.

Полученный опыт будет использован при дальнейшей работе и для создания морского гравиметрического комплекса, включающего абсолютный гравиметр ГАБЛ-ПМ и относительный гравиметр «Чекан-АМ», объединенных общей вычислительной базой. Этот комплекс планируется установить на строящееся НЭС «Иван Фролов». Будет произведена оценка необходимости и потенциальной возможности уточнения глобальных моделей гравитационного поля Земли в высоких широтах для целей навигации и решения геологических задач изучения Арктики.

Д.К. Дронов, Н.П. Сенчина (ААНИИ),
Д.А. Носов, И.С. Сизиков
(Институт автоматики и электрометрии СО РАН),
А.С. Калишин, Ю.Г. Турбин (ААНИИ)