

Абсолютные гравиметрические измерения на ЛСП «Северный полюс»

Первый опыт, трудности и перспективы

Д. К. Дронов¹, Д.А. Носов², Н.П. Сенчина¹, А.С. Калишин¹, Ю. Г. Турбин¹, И.С. Сизиков²

1 — Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург,

2 — Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

Гравиметрия – общие понятия

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

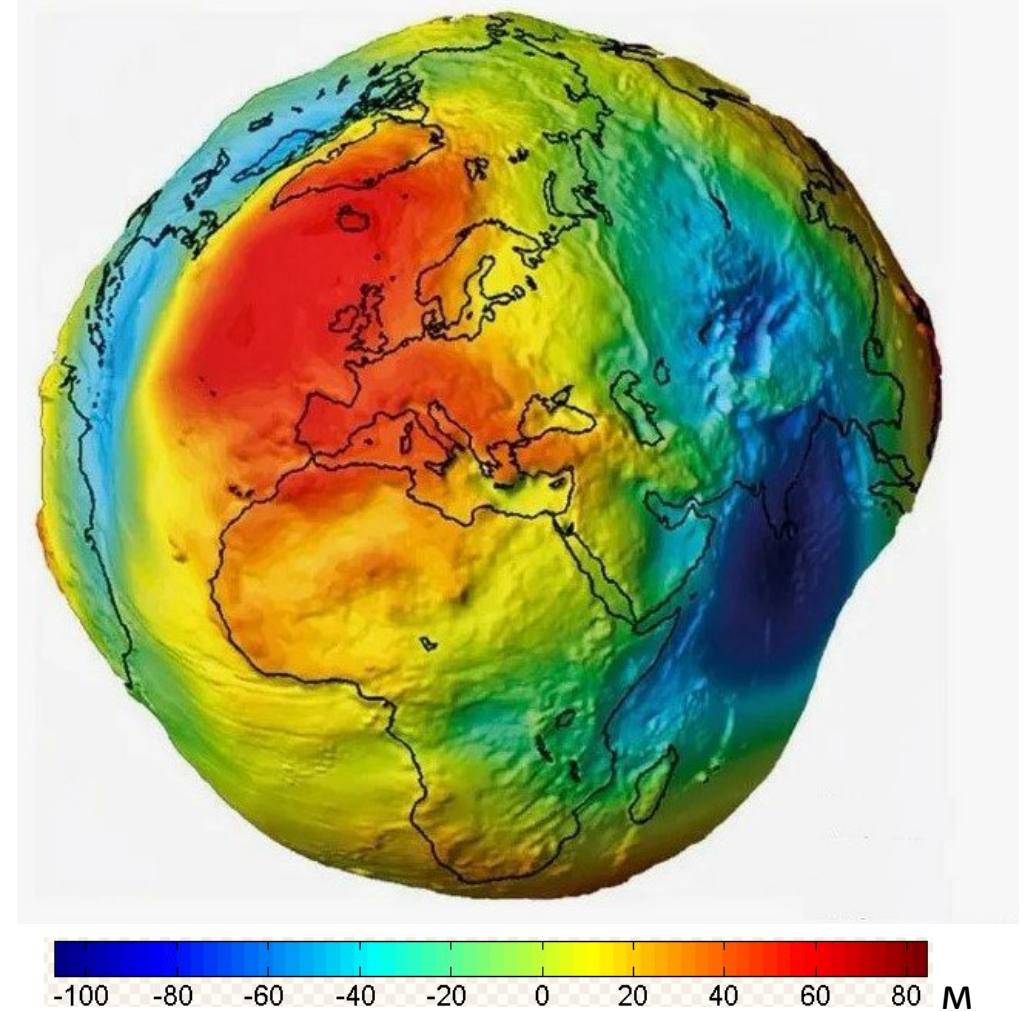
Главная характеристика: ускорение свободного падения (обозначается буквой g).

Среднее значение на поверхности Земли $g \approx 9.81 \text{ м/с}^2$.

В геофизике используют **Гал** (в честь Галилея) ($1 \text{ Гал} = 0.01 \text{ м/с}^2$) и производные величины – **мГал**, **мкГал**.

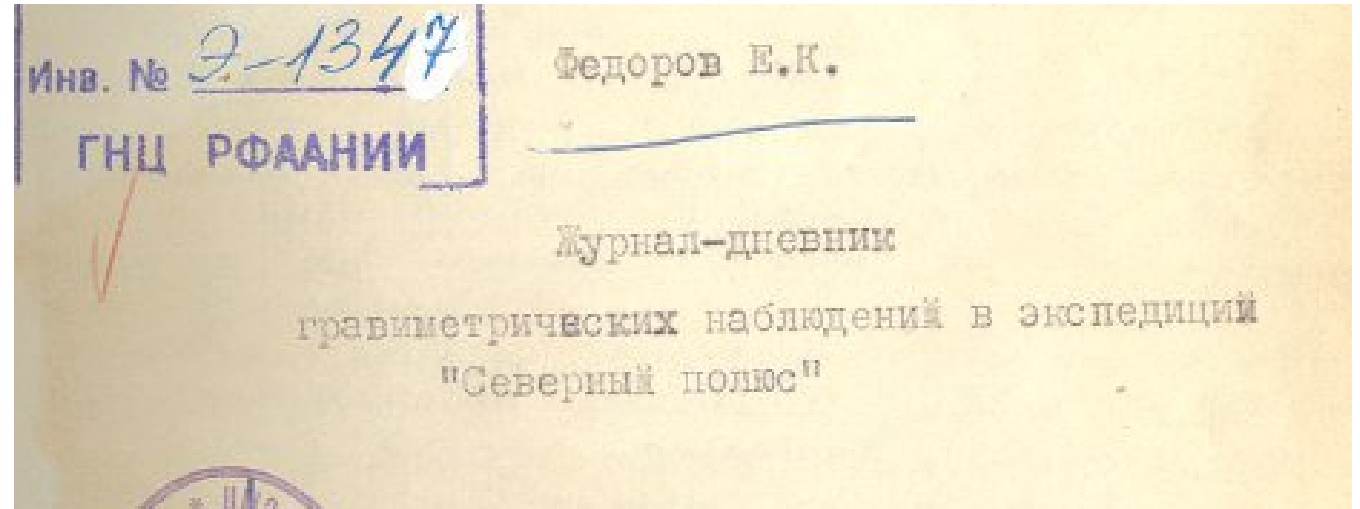
Главные задачи гравиметрии:

- **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.
- **задачи, связанные с обороной и навигацией:** для точной работы ракетных систем и позиционирования подводных лодок.



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

Первые измерения в СЛО в дрейфе, 1937 г.



Вычисления g 04 18

g по среднему периоду				Z	S	ΔS	Δg
St	Sp	Sd					
4384	- 271	- 807	- 30	1308	3072		
4485	- 488	- 904	- 30	1422	3063	6586	98 1 899
4236	- 220	- 915	- 30	1165	3071	3069	3467 1,380
							98 3,279
g по Гейтсбергу		983.2098		Δg 0,069			
g по мез. п.		983.214		Δg 0,065			

Экспедиции «Север» и «Северный полюс»



Наблюдения на гравиметрах перед вылетом в рейс на дрейфующем опорном пункте на базе ВВЭ "Север-14", 1962 г. На переднем плане - съёмочные гравиметры, слева - два стационарных гравиметра, в палатке - маятниковый прибор ММП-П

[https://world.lib.ru/l/litinskij_w_a/proval-6.shtml]

Гравиметрические наблюдения на дрейфующих станциях в пределах Северного ледовитого океана (СЛО) выполняются с 1937 г в ходе экспедиций «Север» и «Северный полюс».

Это измерения на льдинах, выполненные либо в процессе долгосрочных экспедиций в дрейфе, либо в ходе краткосрочных экспедиций при перемещении к точкам съёмки на самолете.

Вплоть до 1990-х годов измерения поля силы тяжести осуществлялись преимущественно в процессе авиадесантных, налёдных (ледовых) и набортных морских гравиметрических съёмок. После 2000-х разработка алгоритмов обработки альтиметрических спутниковых данных позволила получить сведения о гравитационном поле в СЛО.

Относительные измерения были реализованы с помощью гравиметров «Чекан-АМ» в рамках экспедиций «Арктика-2014», «Арктика-2019» и «Арктика-2020»

Недостатки имеющихся сведений о гравитационном поле в Арктике

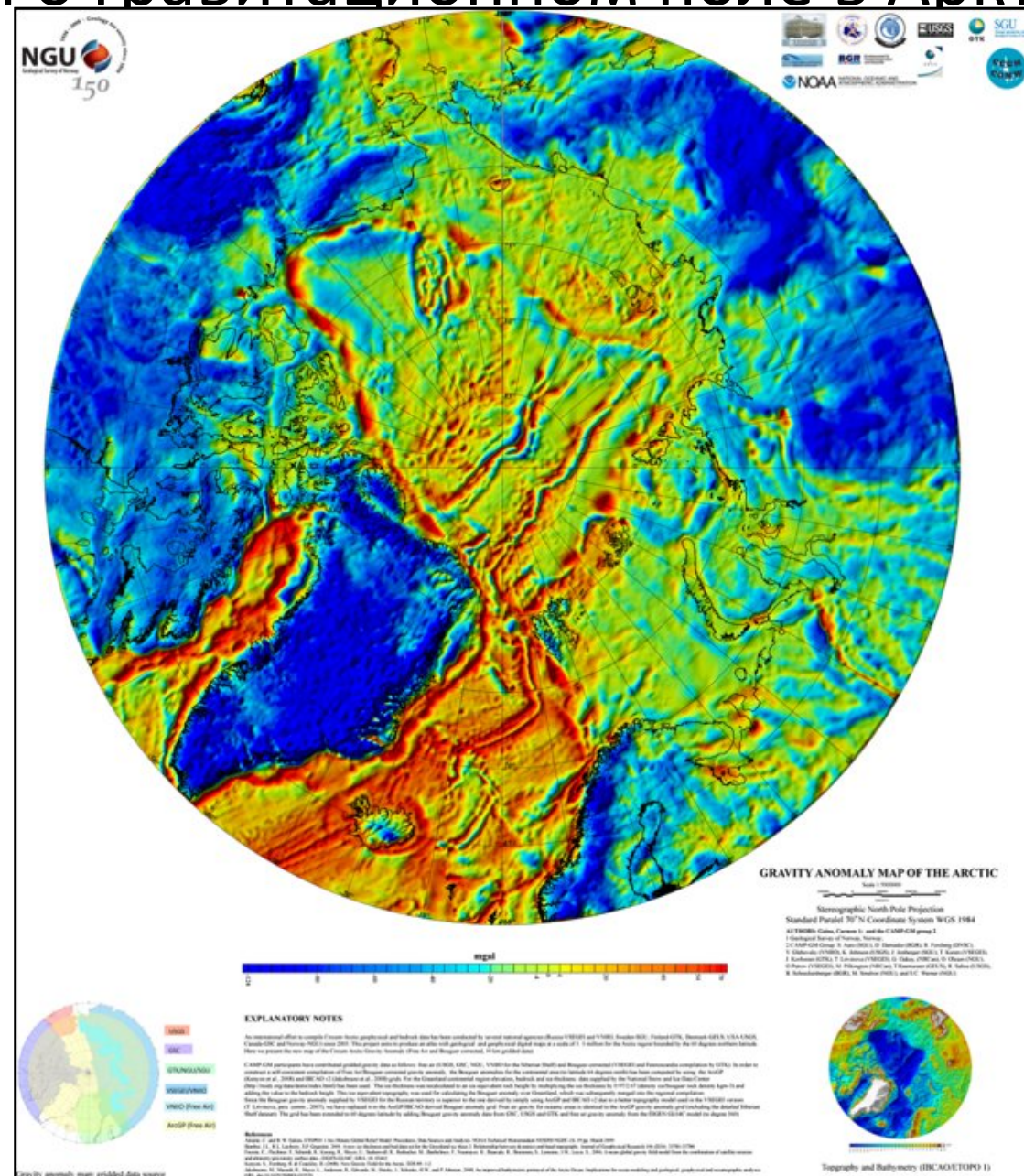
Точность современных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) в Арктическом регионе является недостаточной, примерно на порядок ниже точности моделей в средних и низких широтах.

Основные причины пониженной точности связаны:

- со сложностью измерений с морскими гравиметрами в условиях ледокольной проводки исследовательских судов,
- с пониженной точностью спутниковой альтиметрии в случае покрытия вод льдом;
- с невозможностью полного учета и компенсации инерциальных ускорений, возникающих при классических измерениях на подвижном носителе (самолете, вертолете, судне).

Отсутствие точных данных о ГПЗ в Арктике ограничивает возможности для геолого-геофизических исследований, навигации, а также для иных целей использования глобальных моделей Земли.

<https://doi.org/10.1144/M35.3>



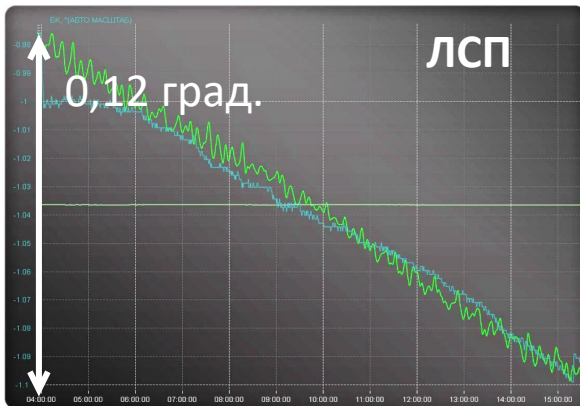
Ледостойкая платформа «Северный Полюс»



Ввод в эксплуатацию ледостойкой платформы и организация дрейфующих экспедиций «Северный полюс» позволили продолжить измерения гравитационного поля в удалённых частях акватории СЛО на более качественном уровне.

Особенностью ледостойкой платформы является то, что она вмораживается в лёд и находится в дрейфе вместе со льдиной. Предполагается, что вмораживание ЛСП в лёд может жёстко фиксировать судно и минимизировать, или даже исключить внешние воздействия на гравиметр, такие как вертикальные ускорения и качка. Гравиметр – прибор, наиболее чувствительный к таким воздействиям.

Целью проведения работ является выполнение высокоточных измерений гравитационного поля в высоких широтах .

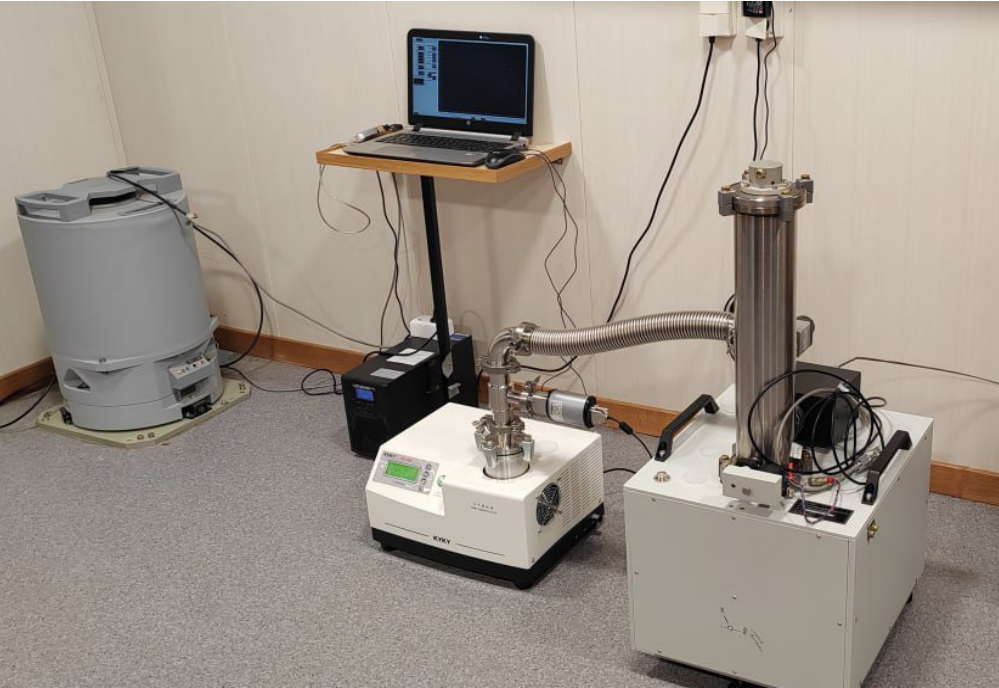


Сравнение крена судна на ЛСП и при классической морской гравиметрии


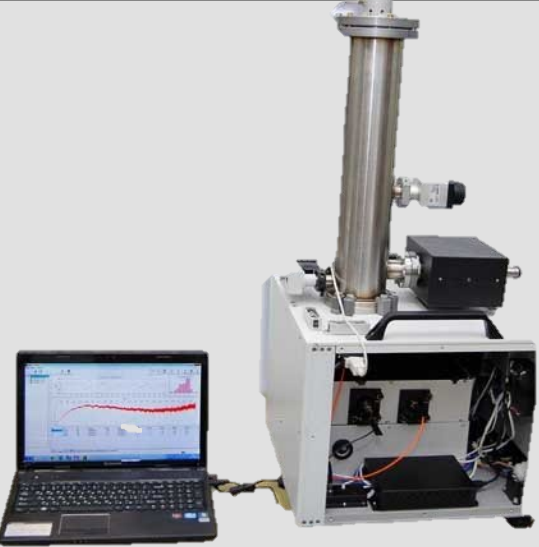
Современное гравиметрическое оборудование на ЛСП

Экспедиция «Северный полюс – 41» («СП-41») проходила в 2022-2024 гг с измерениями гравитационного поля с помощью относительного гравиметра Чекан-АМ.

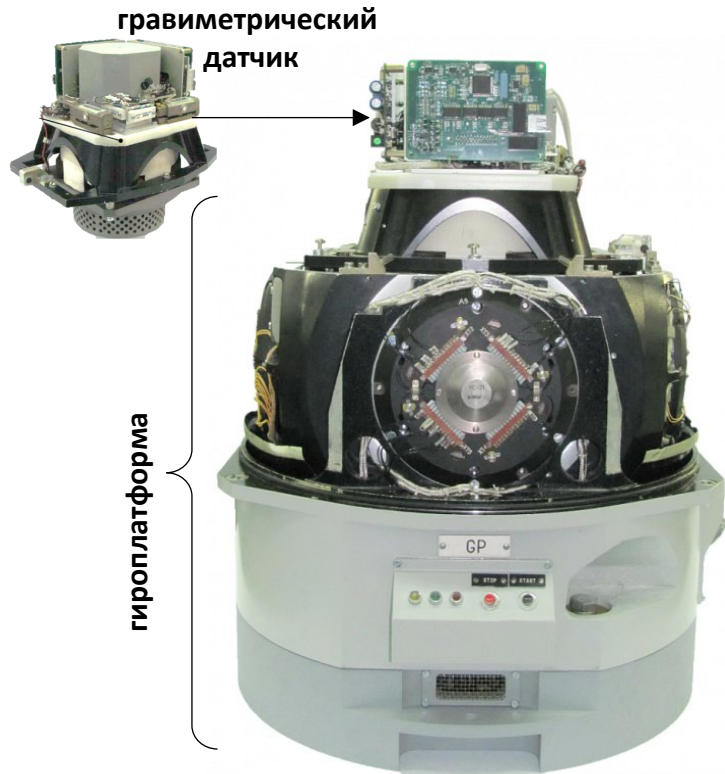
С началом экспедиции СП-42 на борту Ледостойкой платформы (ЛСП), кроме относительного, был установлен абсолютный баллистический гравиметр ГАБЛ-ПМ.



Общий вид измерительного гравиметрического комплекса, включающего Чекан-АМ и ГАБЛ-ПМ

Чекан-АМ	ГАБЛ-ПМ
	
Относительный гравиметр	Абсолютный гравиметр
Паспортная погрешность 400 мкГал	Паспортная погрешность 5 мкГал
Морской прибор, на гиropлатформе	Наземный, методика адапти-рована для измерений на ЛСП
Используется в СП-41, СП-42, при морской гравиметрии в регионе	Введен в работу на ЛСП в ходе СП-42

Относительный гравиметр Чекан-АМ (Шельф)



Прибор состоит из гравиметрического датчика с двойной кварцевой упругой системой крутильного типа, системы термостабилизации и гиросплатформы.

Особенности относительного гравиметра

- определения ускорения силы тяжести (УСТ) на маршруте производятся от известного опорного гравиметрического пункта (ОГП), который может находиться на значительном удалении от пунктов проведения измерений.
- дрейф нуля-пункта или дрейф прибора — медленное изменение его показаний во времени из-за "усталости" упругой системы.

Основные технические характеристики

- Среднеквадратическая погрешность измерения УСТ— 0.4 мГал.
- Чувствительность (цена деления) — 0.01 мГал.
- Скорость смещения нуля-пункта гравиметра — не более 3 мГал/сут.
- Погрешность гиросплатформы: статическая — до 30 угл.с; динамическая — до 15 угл.с.
- Показатели надежности: полный назначенный ресурс — 50000 часов; полный назначенный срок службы — 10 лет;
- Рабочий температурный диапазон 10-24 градусов



Абсолютный лазерный баллистический 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.

Особенности абсолютного гравиметра

- возможность определение точного значения УСТ в конкретной точке.
- не требует калибровки относительно других точек, не нуждается в ОГП.
- измерения требует точной стабилизации (неподвижное основание) и отсутствия любых внешних воздействий.
- дорогостоящее оборудование, требующее высокой квалификации персонала.

Основные технические характеристики

Среднеквадратическая погрешность измерения абсолютного значения УСТ до 5 мкГал

Относительная погрешность стандарта частоты (эталона времени) - не более $2 \cdot 10^{-10}$

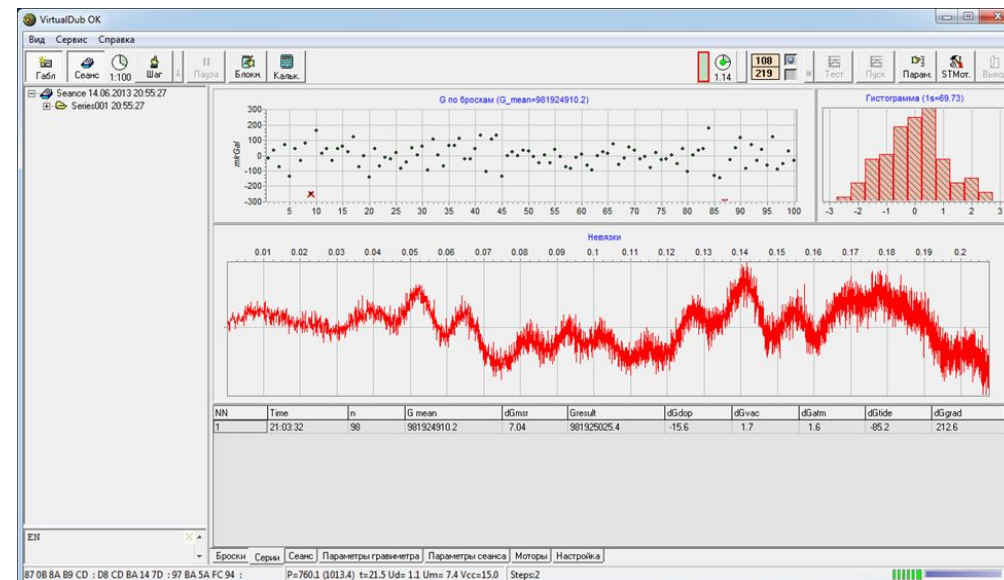
Давление остаточного газа в баллистической камере не более $5 \cdot 10^{-7}$ мм. рт. ст.

Рабочий температурный диапазон, °С от +10 до +30

Рабочий диапазон атмосферного давления, мм. рт. ст. от 560 до 780

Ресурс работы до проведения профилактических работ, 50000 единичных бросков

Средний срок службы при проведении регулярных профилактических работ – 10 лет



Проведение абсолютных измерений в рамках экспедиции СП-42

В порту Санкт-Петербурга был проведён сеанс измерений g , состоящий из 3-х серий по 100 единичных бросков. Получен следующий результат:

$g_{\text{пирс}} = 14,501 + a$ мГал,
среднеквадратичная ошибка (СКО): 0,024 мГал,

где a - константа, введенная для обеспечения защиты государственной тайны.

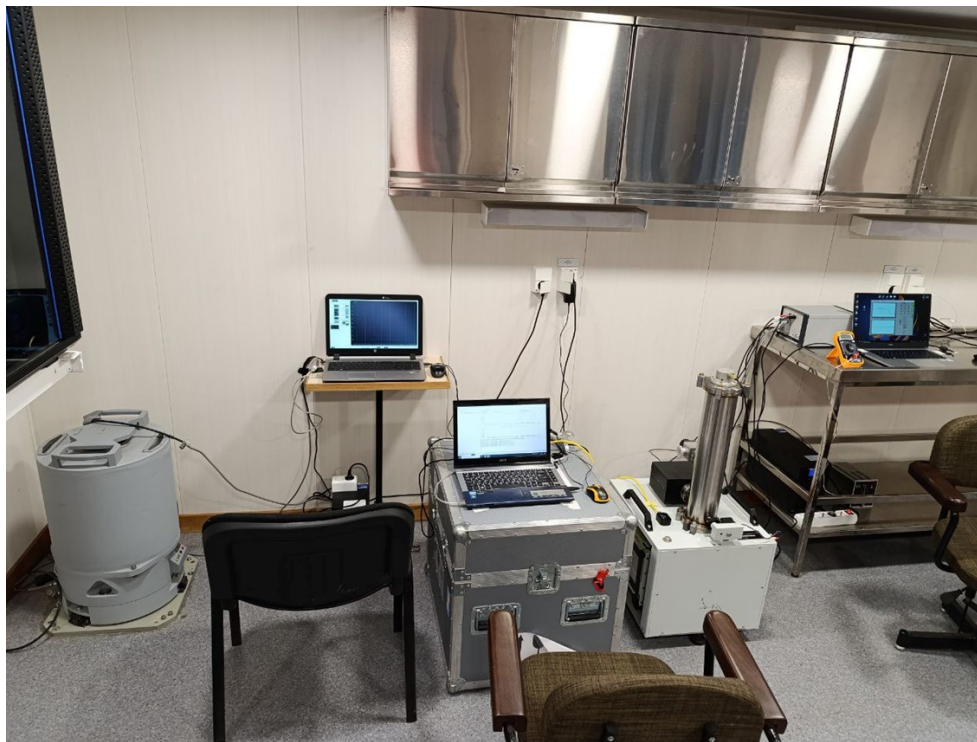
Такие результаты соответствуют заявленным паспортным значениям гравиметра ГАБЛ-ПМ для наземных стационарных пунктов 1 класса. Но они не выполнимы на борту судна, поэтому возникла необходимость к адаптации абсолютного гравиметра к условиям дрейфа.



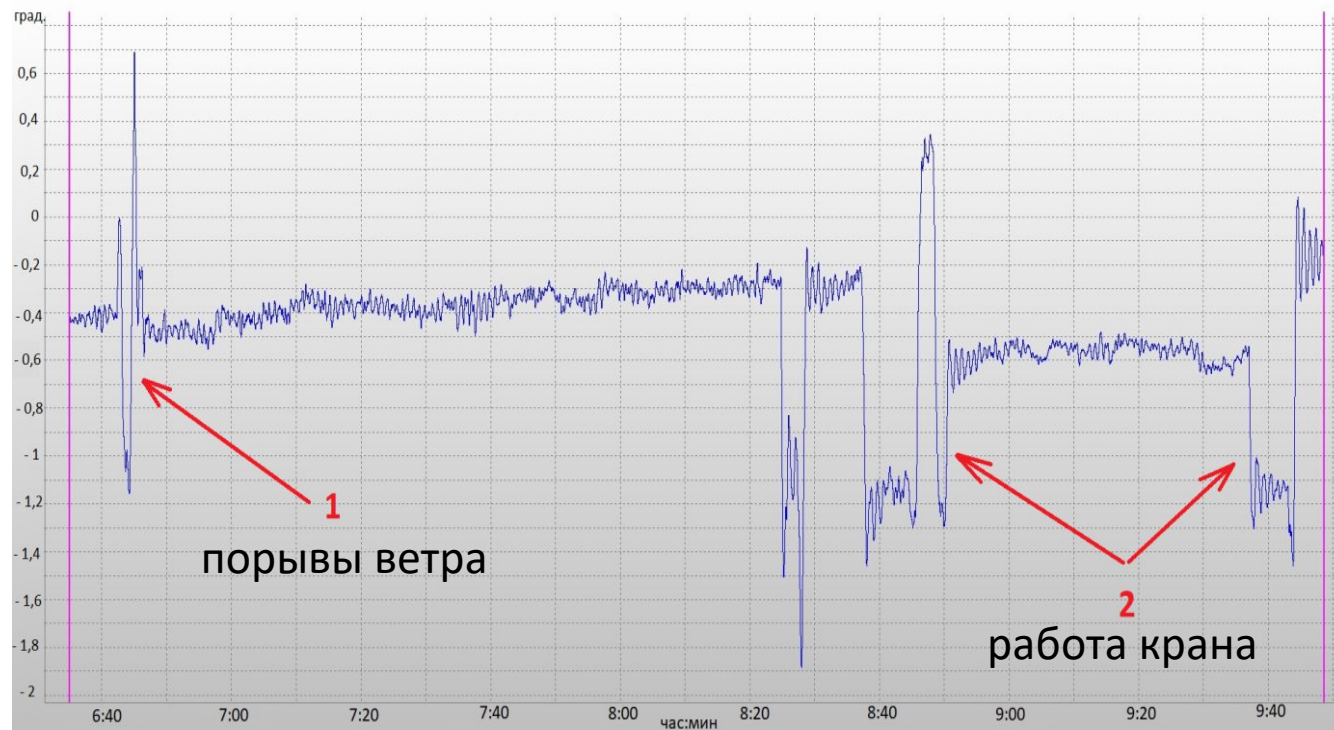
Гравиметр ГАБЛ-ПМ и сервисное оборудование на причале (Санкт-Петербург, ПетроЛесПорт)

Определение параметров гравиметра и методики проведения измерений для возможного использования ГАБЛ-ПМ на борту ЛСП

После окончания измерений на пирсе гравиметр ГАБЛ-ПМ был установлен на судне в лаборатории специальных исследований.



Определены приемлемые условия для выполнения абсолютных измерений гравитационного поля (дрейф, благоприятные погодные условия, отсутствие работы судового крана).



Бортовая качка за трёхчасовой период в ухудшенных погодных условиях

Предварительные результаты измерений во время дрейфа

По окончании движения, после вмораживания ЛСП в лёд и с началом дрейфа СП-42 абсолютный гравиметр ГАБЛ-ПМ был подготовлен группой операторов к проведению измерений согласно требованиям инструкции, составленной по итогам работ в портах Санкт-Петербурга и Мурманска.

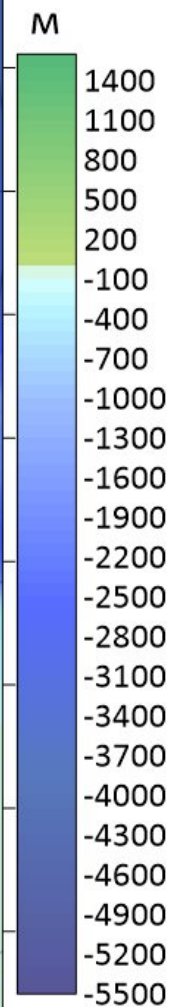
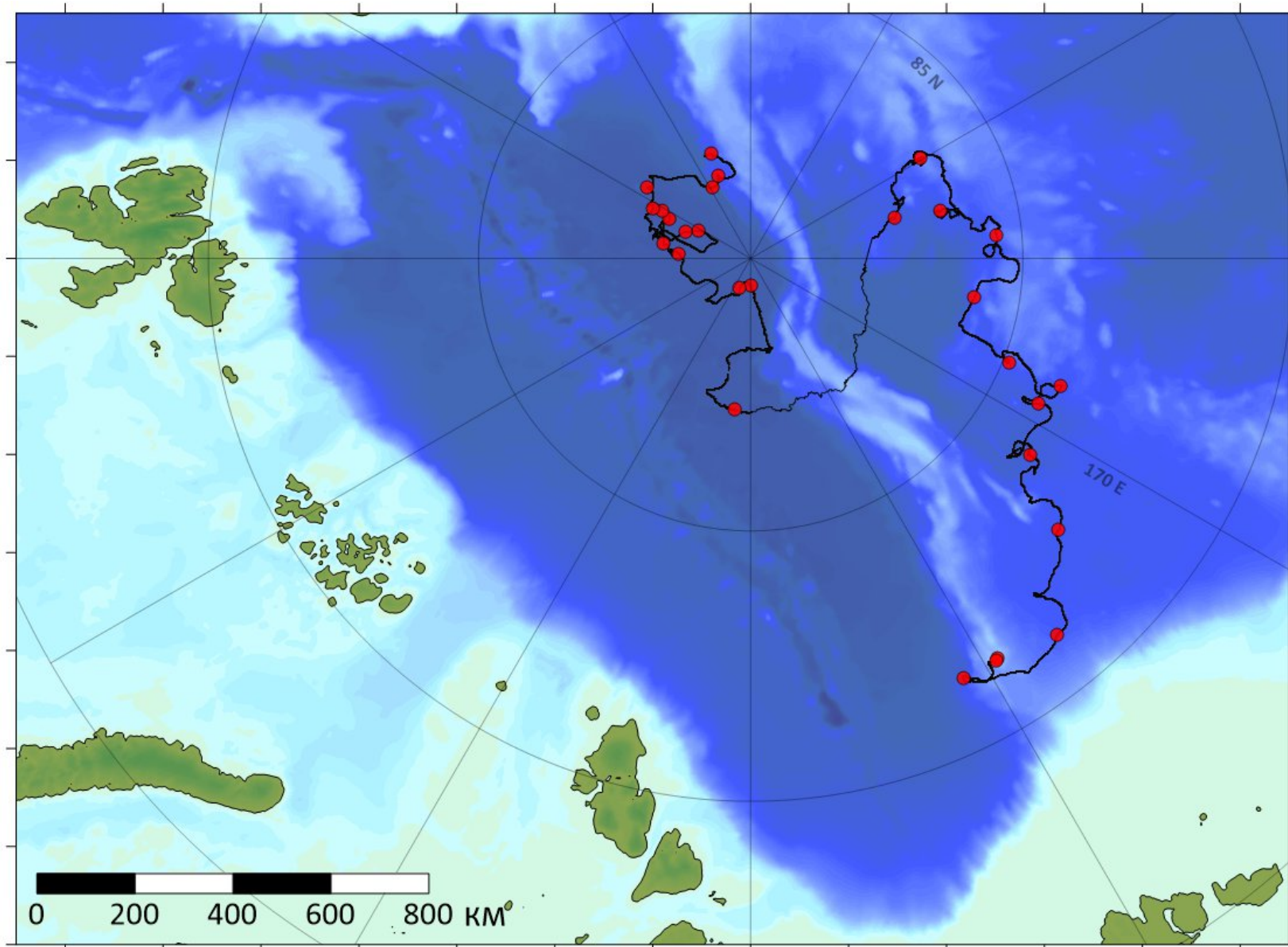
Требования для выбора благоприятных временных условий.

- анализ погоды и состояния ледового поля, подбор дня измерений;
- Определение текущей скорости дрейфа;
- Проверка отсутствия работы кранов или других механизмов, которые влекут за собой дополнительную вибрацию или резкие наклоны;
- В процессе измерений, корректировка вертикали прибора при необходимости.

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

№	Дрейф км.	Длит. Проведения ч.	Ветер м/с	Глубина, м	Значение УСТ + b, мГал	СКО, мГал
1	0.8	0.8	5	930	32,430	0,5
2	1.1	0.8	4	950	29,657	0.74
3	0.2	0.9	2	3300	77,567	0,89
4	0.7	0.9	9	2530	68,805	0,94
5	0.8	1.5	7	2840	39,828	0,37
6	0.6	1.5	6	3260	51,856	0,14
7	1.1	1.5	6	3223	61,293	0.1
8	0.1	1.5	5	2664	70,756	0,239
9	0.2	1.5	6	2529	96,904	0,143
10	0.5	1.4	6	2420	07,433	0,068
11	0.3	0.6	7	2005	11,696	0,083
12	0.4	1.5	2	3088	87,102	0,087
13	0.2	1.5	3	1691	29,184	0,054
14	0.2	1.5	4	3193	11,228	0,174
15	0.7	1.8	6	4345	99,462	0,228
16	0.5	1.6	6	4266	32,466	0,221
17	0.8	1.6	12	4266	28,758	0,351
18	1.2	1.8	8	4350	09,124	0,875
19	0.2	1.5	5	4354	02,467	0,278
21	0.9	1.7	7	4335	04,815	0,568
22	0.7	1.4	7	4319	12,111	0,2281
23	1.0	1.3	8	4337	10,201	0,411
24	0.1	1.4	6	4349	96,105	0,228
25	0.5	1.4	6	4324	02,703	0,331
26	0.1	1.4	4	4309	01,209	0,205
27	0,1	1,4	15	3967	94,594	0,189
28	0,3	1,3	6	2957	01,417	0,147
29	0,3	1,3	6	3341	00,670	0,235
30	1.4	1.2	11	4043	03,353	0,161

Маршрут дрейфа СП-42 с проведением абсолютных измерений гравитационного поля

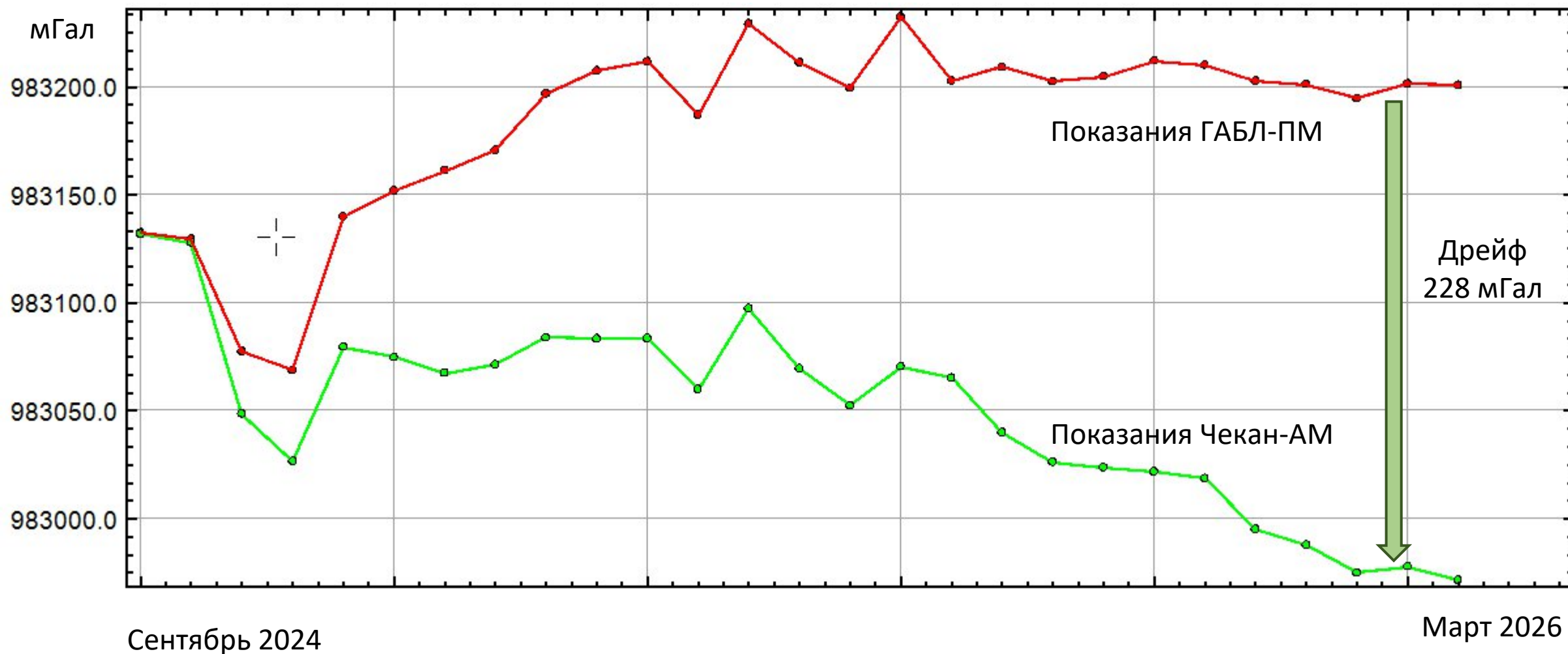


● «Пункты» измерения абсолютных значений гравитационного поля

На фоне – карта рельефа суши и дна океана по данным глобальной модели

Показана траектория дрейфа за период до Апреля 2026 года

Коррекция нуля-пункта относительного гравиметра Чекан-АМ



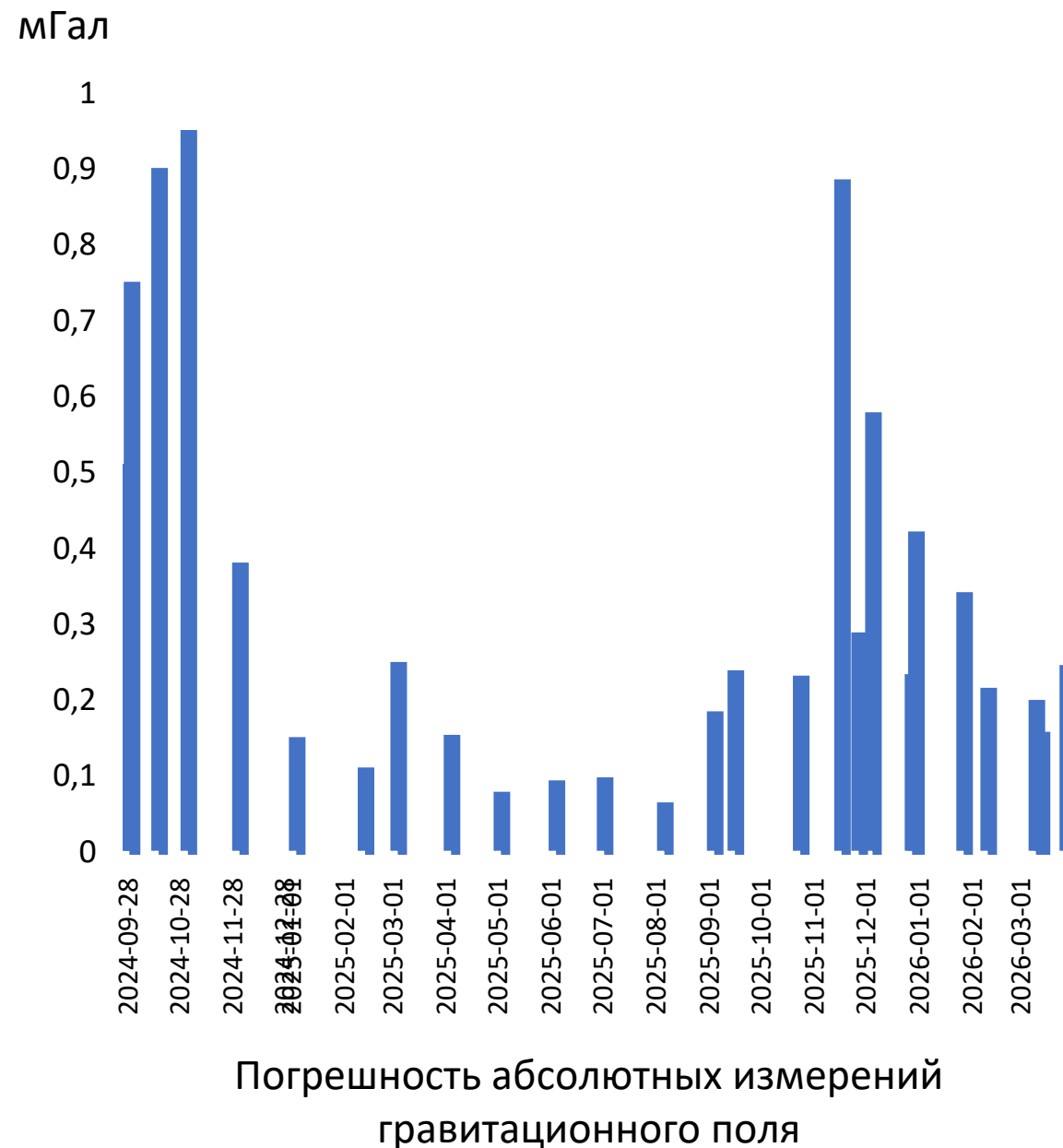
Оцененный дрейф гравиметра Чекан-АМ содержит значительную нелинейную компоненту не может быть определен без использования абсолютного гравиметра.

Трудности: почему это не сделали раньше?

— **Хрупкость оборудования:** абсолютный гравиметр — это **чрезвычайно дорогостоящий и хрупкий прибор**. Он требует исключительно стабильных условий для корректной работы. Традиционные дрейфующие станции на льдинах физически не могли обеспечить его доставку и эксплуатацию — ледовое поле нестабильно, подвижно и подвержено трещинообразованию.

— **Проблема качки и вибраций:** даже на ЛСП, несмотря на то, что судно заморожено в лед, сохраняется микровибрация и остаточная подвижность. Гравиметр ГАБЛ-ПМ изначально создавался для работы на наземных пунктах, а не на борту движущегося (пусть и дрейфующего) судна. Пришлось решать сложную задачу: адаптировать прибор к работе без использования гиросtabilизированной платформы.

— **Подготовка технических сотрудников:** сложность в обслуживании оборудования требует тренировки и «наметанности глаза», для проведения измерений, так как необходимо вручную как решать проблемы стабилизации гравиметра, так и ручного контроля за бросками и выставления вертикали.



Применение полученных данных:

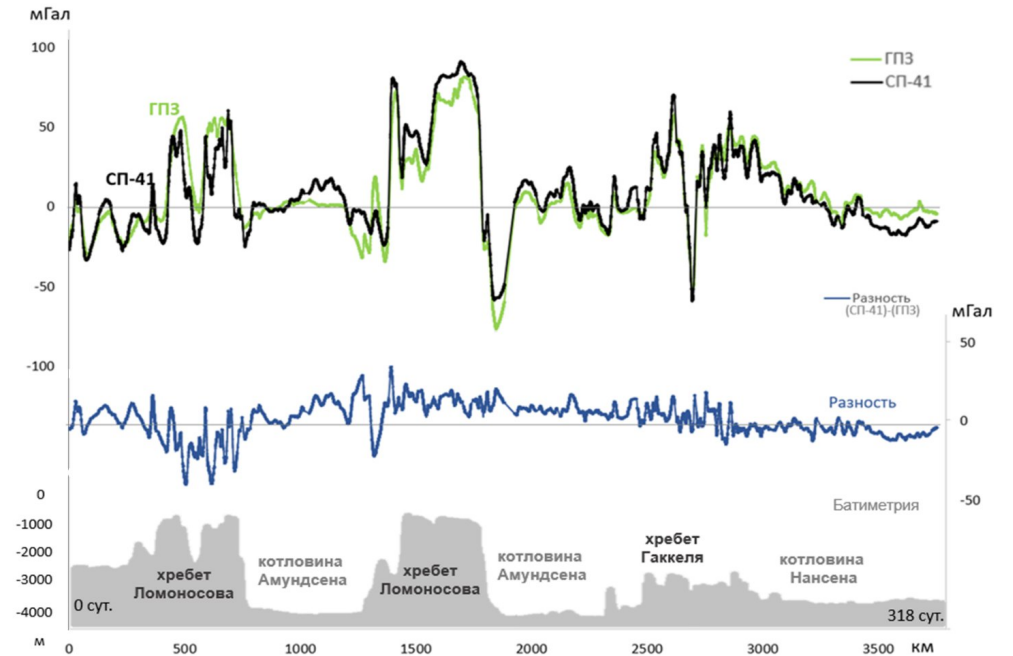
Повышение точности моделей ГПЗ в Арктическом регионе имеет критическое значение для фундаментальных и прикладных исследований:

-геофизика и геология: точные данные о ГПЗ необходимы для построения комплексных геолого-геофизических разрезов, изучения строения земной коры и мантии.

-навигация и безопасность: уточнение моделей ГПЗ позволит повысить точность спутниковых навигационных систем в высоких широтах, что критично для судоходства и авиации.

Разработка уникальных методик измерений гравитационного поля с использованием абсолютного и относительного гравиметров на ледостойкой самодвижущейся платформе (ЛСП) позволит России удерживать лидирующие позиции в арктических исследованиях.

По теме представленной работы подана заявка на грант РФФИ (на рассмотрении).



Сравнение графиков гравитационного поля в редукции в свободном воздухе, полученного по результатам измерений на ЛСП и снятого с модели ГПЗ за весь период дрейфа, данные батиметрии вдоль траектории дрейфа ЛСП в ходе СП-41

№	Название заявки	Осн. исполнители	Конкурс	Организация финансирования
26-77-10040	Развитие гравиметрической сети в Северном Ледовитом океане с помощью измерений на ледостойкой самодвижущейся платформе (2026-2029)	Михайлов П.С. Степанов Н.А. Дронов Д.К.	Конкурс 2026 года на получение грантов РФФИ по мероприятию «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых» 07-407, 01-103, 01-213	ФГБУ "ААНИИ"

Перспективы: что дальше?

- Расширение гравиметрической сети России

Гравитационная сеть высшего уровня в настоящее время активно развивается. Она очень неравномерна по территории и по точностям определений значений. Благодаря ЛСП эти «белые пятна» будут постепенно заполняться высокоточными данными.

- Долгосрочный мониторинг

Формат ЛСП 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.

- Программа на годы вперед

Исследования не ограничатся одной экспедицией. Работы планируется продолжить в рамках экспедиций «Северный полюс-43», «Северный полюс-44» и далее. Каждая новая дрейфующая станция будет накапливать уникальный массив абсолютных гравиметрических данных, создавая основу для фундаментальных научных открытий.

- Техническое развитие

Полученный опыт адаптации абсолютного гравиметра к работе на ЛСП позволит усовершенствовать методику измерений и, возможно, разработать новые комплекс, специально предназначенные для арктических условий.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ