

Как влияет ионосфера на GPS-навигацию в полярных широтах ?



**Погорелов Виталий Викторович, П.С. Михайлов,
Д.В. Лиходеев, Ф.В. Передерин, К.И. Холодков**

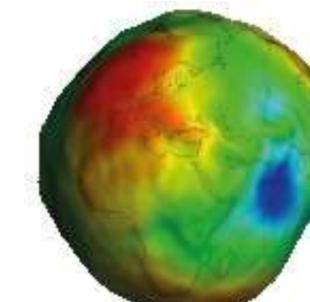
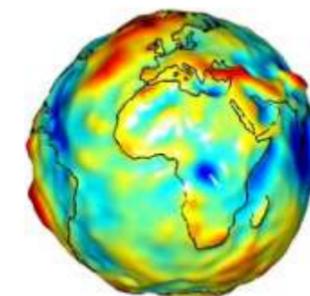
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

Обсуждаются экспериментальные исследования по оценке точности GPS-позиционирования подвижных объектов в Арктической зоне Российской Федерации.

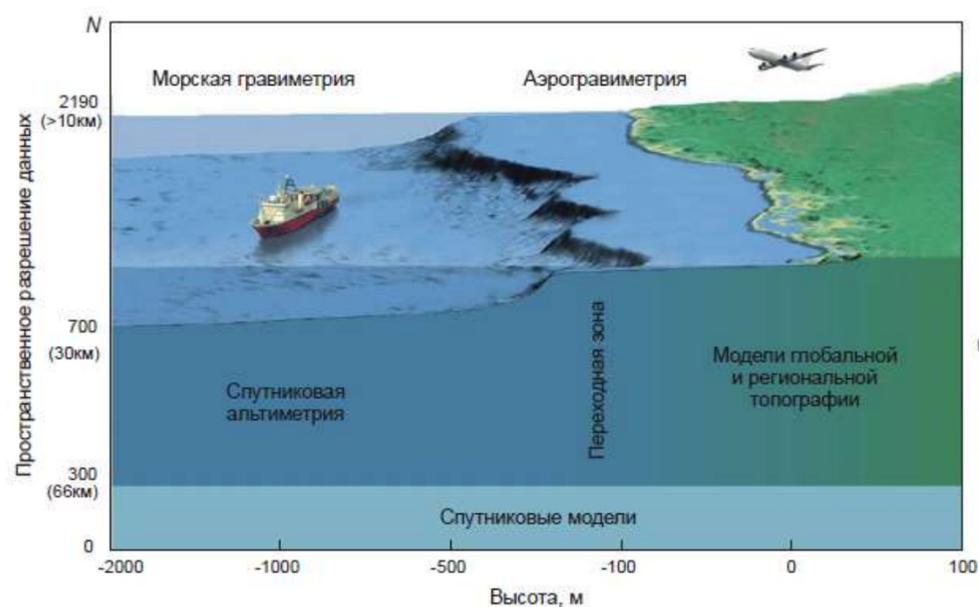
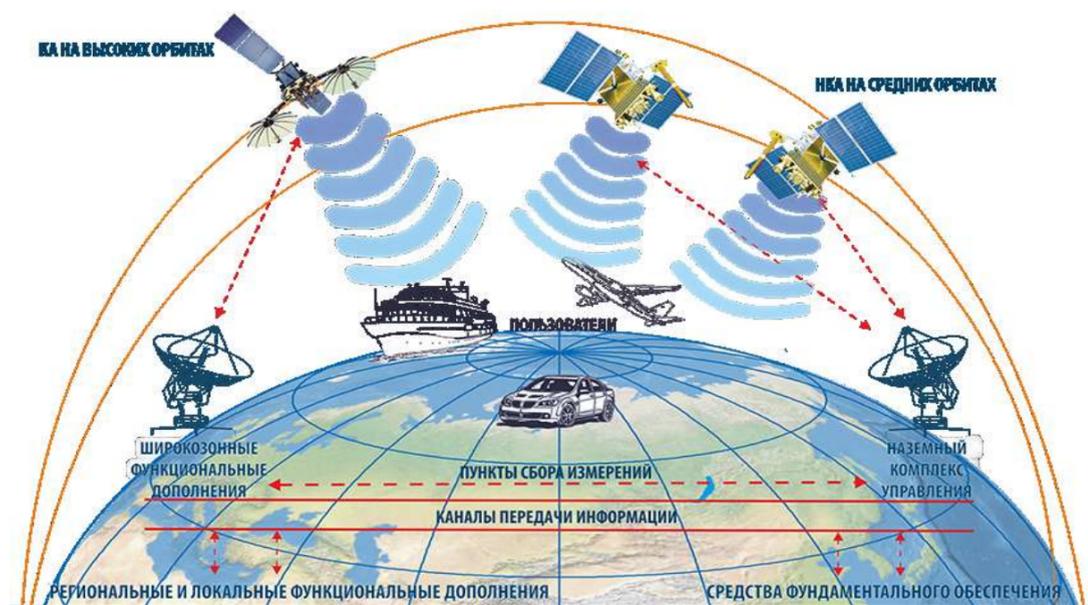
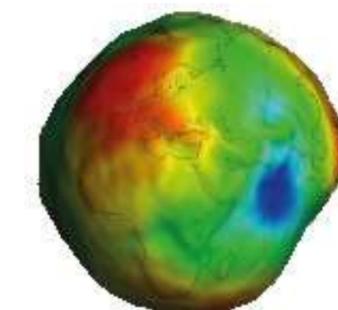
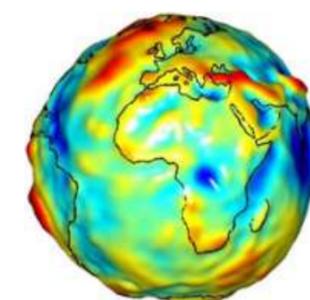
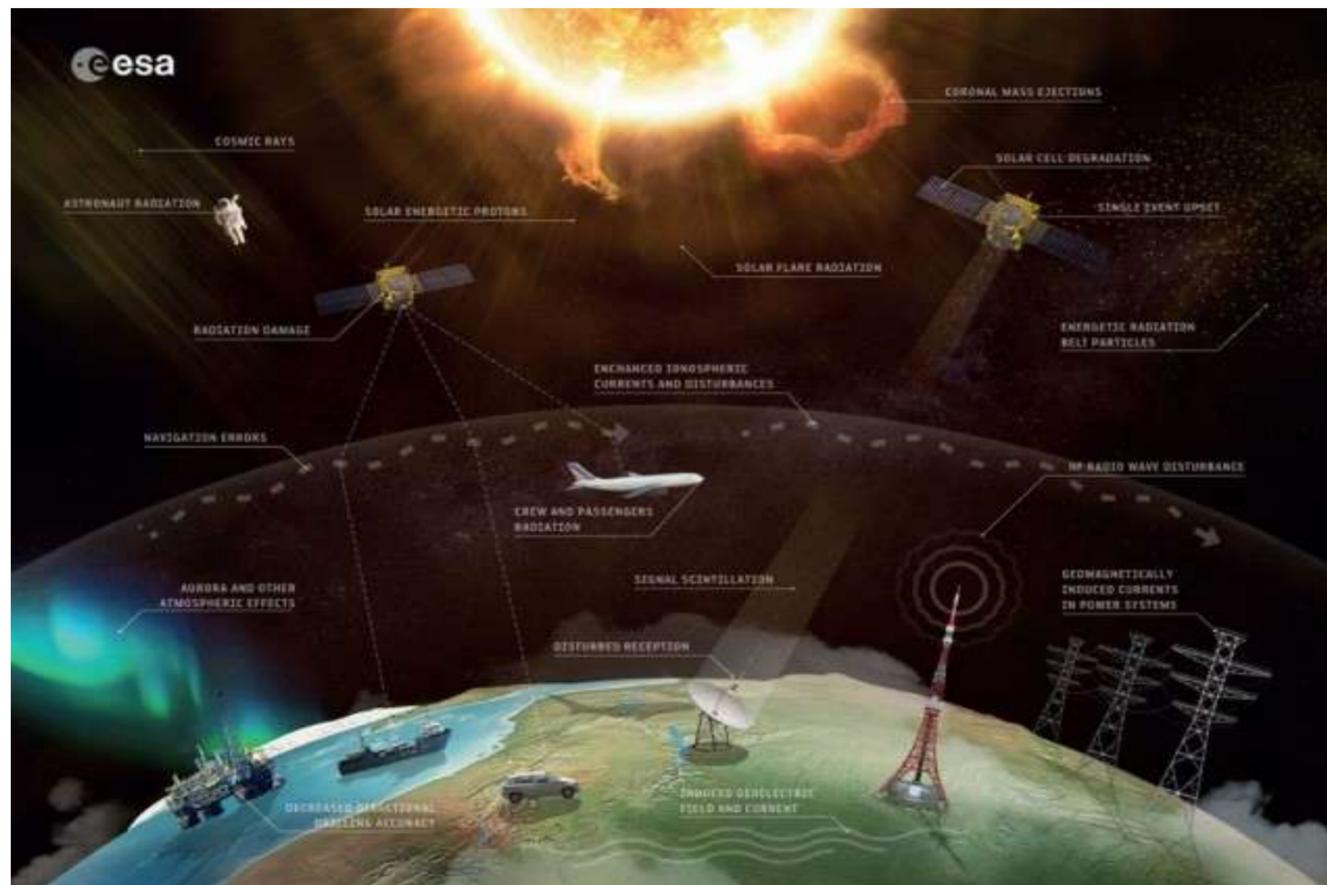
Цикл работ 2013-2020 гг. включал измерения, выполненные на самолете-лаборатории, с применением мобильного исследовательского комплекса на базе автомобиля, а также на ледокольном исследовательском судне в акваториях Северного Ледовитого океана и окраинных морей. В качестве регистрирующего оборудования использовалось устройство для регистрации и передачи геофизических цифровых данных ГНСС с опциональной возможностью оперативного мониторинга состояния оборудования и местоположения.

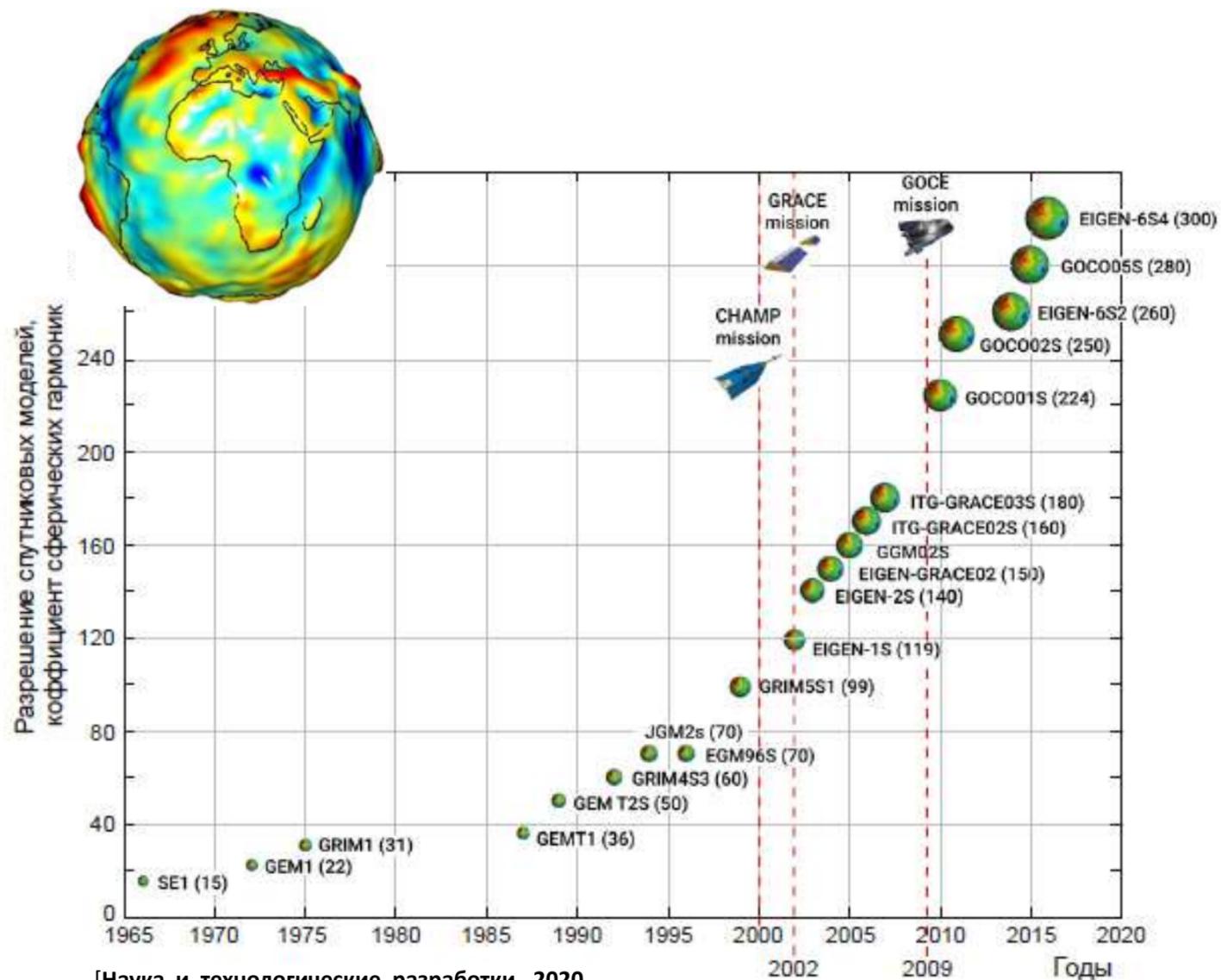
Для оценки возможностей точного позиционирования с использованием технологии Precise Point Positioning (PPP) в арктических и средних широтах использовались глобальные модели рельефа и геоида по маршрутам наблюдений, а также данные наземных опорных станций ГНСС СДКМ Роскосмоса.

Гипотезу о существенном влиянии ионосферных возмущений на точность позиционирования GPS в измерениях, выполненных на подвижных основаниях, подтвердить не удалось.

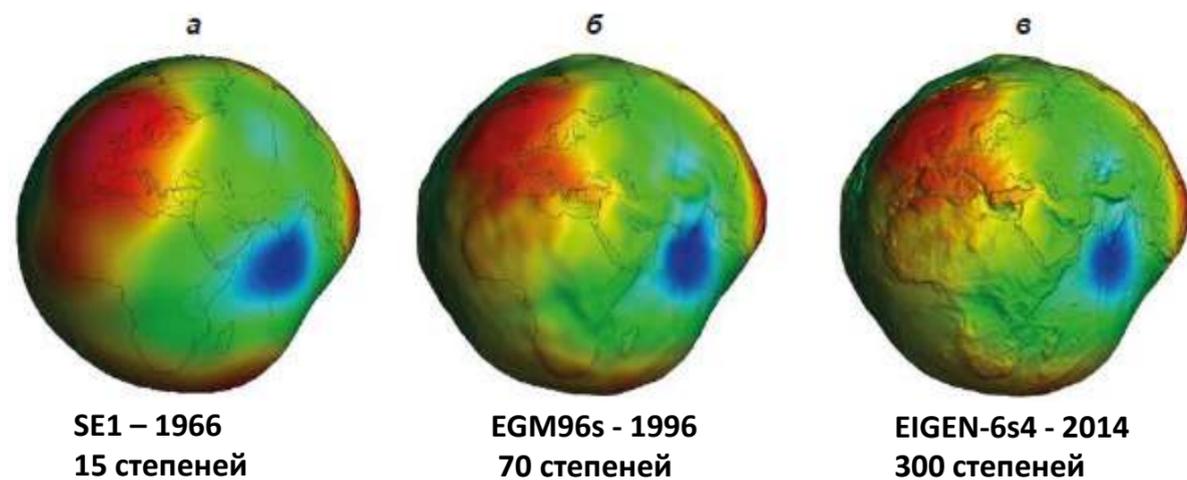


Как влияет ионосфера на GPS-навигацию в полярных широтах ?





[Наука и технологические разработки, 2020, Т.99, № 4 с. 34-52 DOI: 10.21455/std2020.4-1]



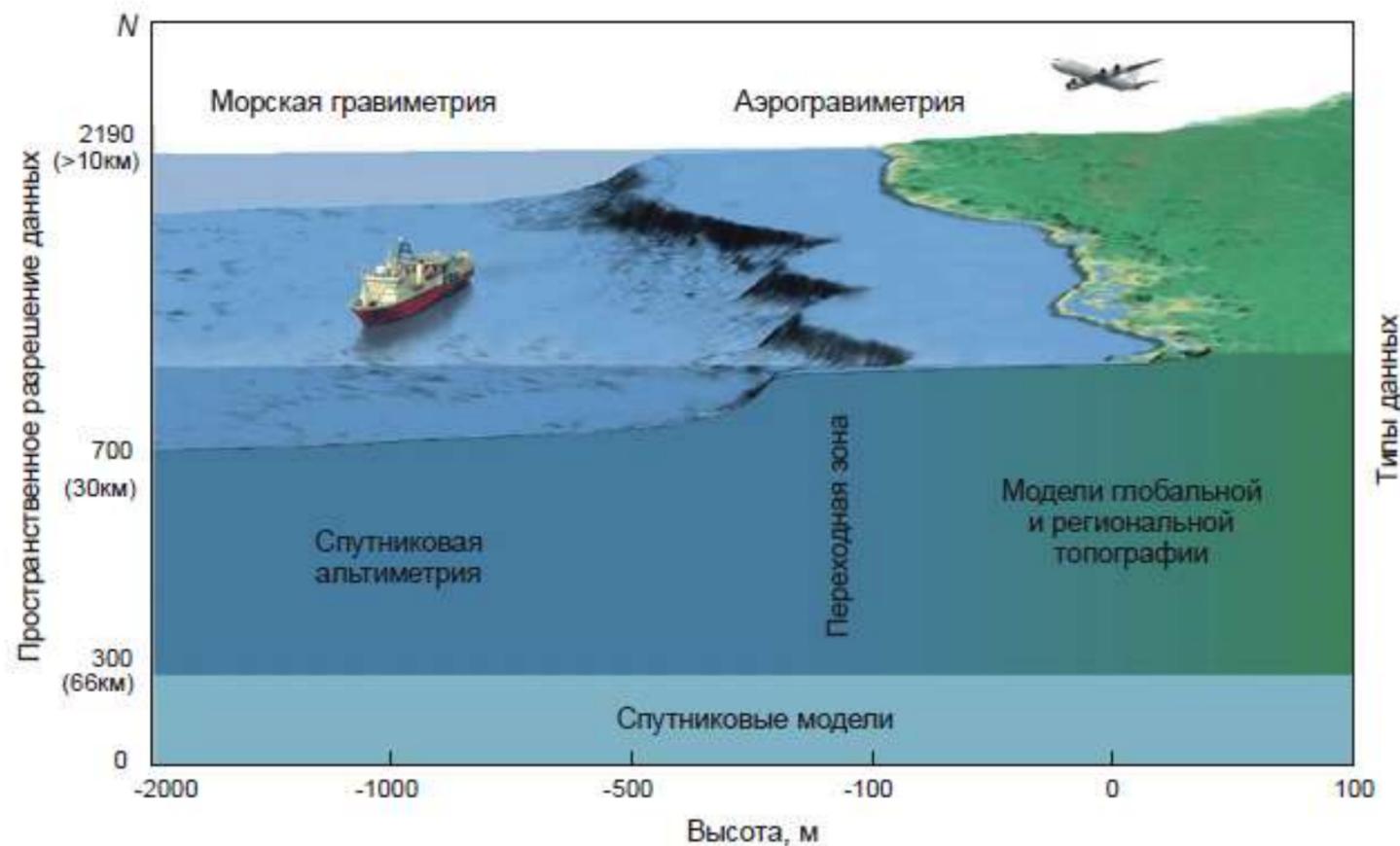
SE1 – 1966
15 степеней

EGM96s - 1996
70 степеней

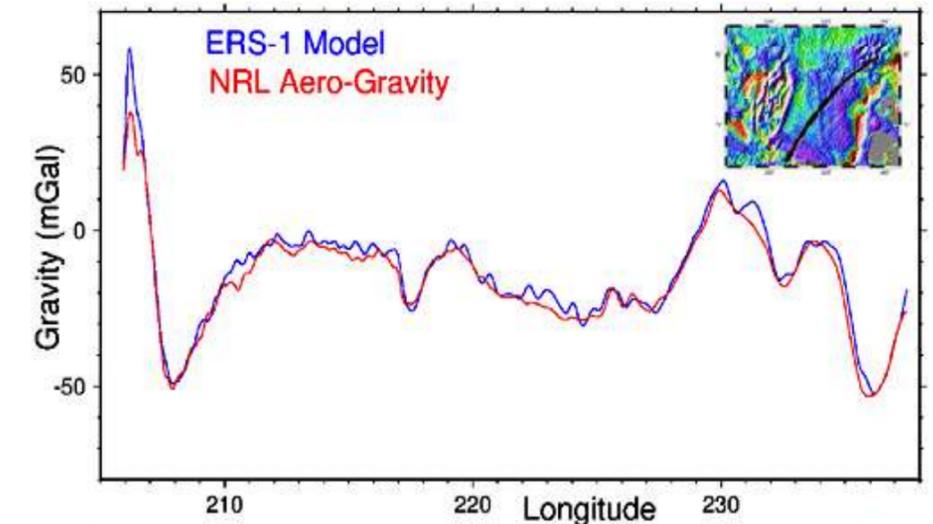
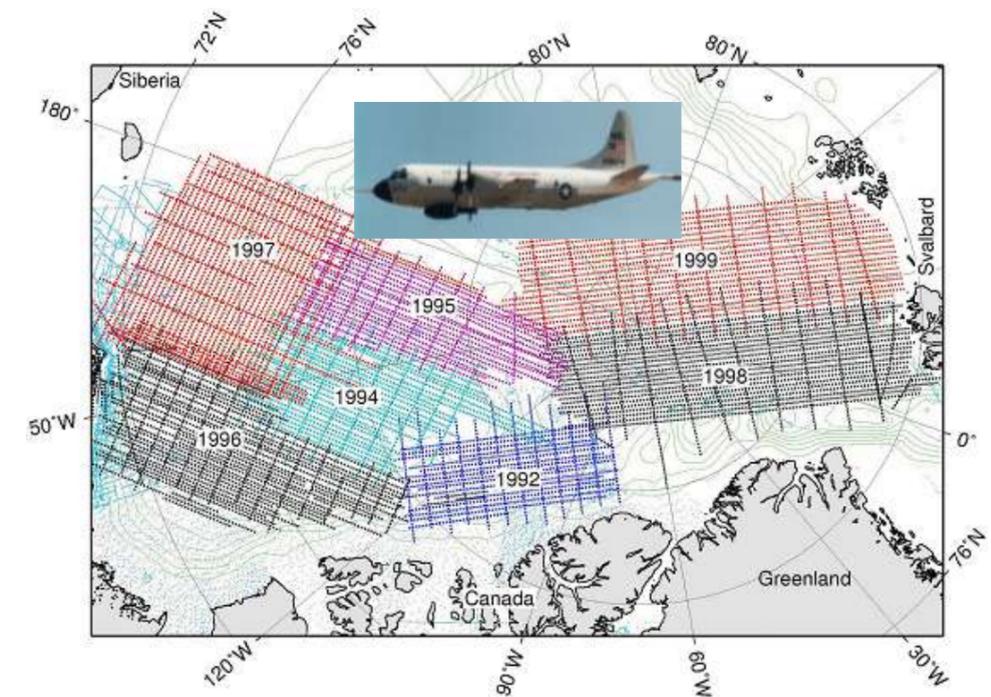
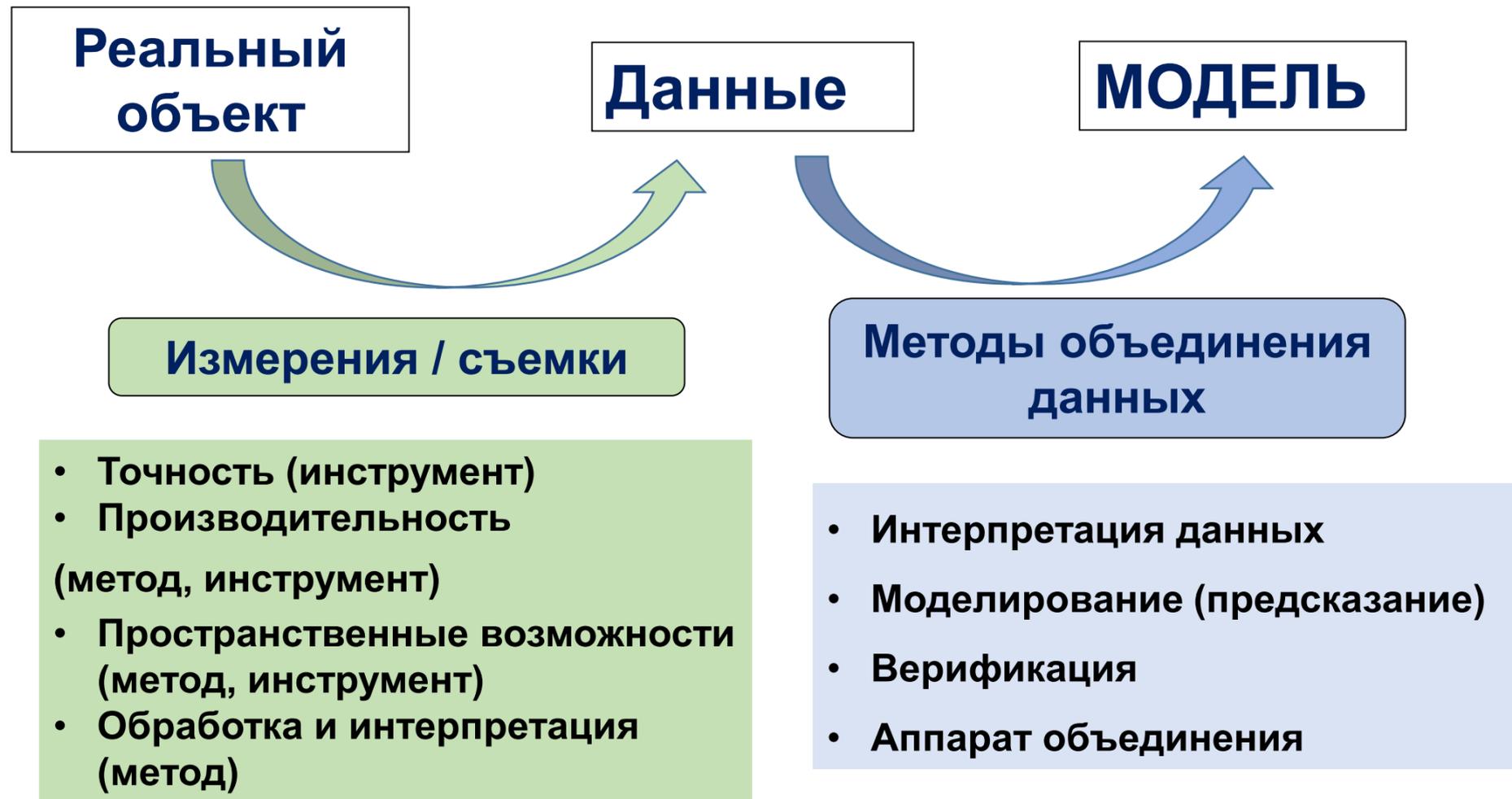
EIGEN-6s4 - 2014
300 степеней

С ростом точности и разрешающей способности спутниковых методов все большее распространение получают глобальные геофизические и геодезические данные, предоставляемые пользователям в виде готовых модельных решений. С развитием технологий получения и обработки спутниковых данных расширяются возможности применения глобальных моделей как в научных, так и в прикладных задачах.

Одним из наиболее перспективных направлений использования современной глобальной информации являются интерпретационные геофизические задачи. Модельные данные доступны, имеют планетарный охват и во многих случаях безальтернативны (например, в высоких широтах Арктики).



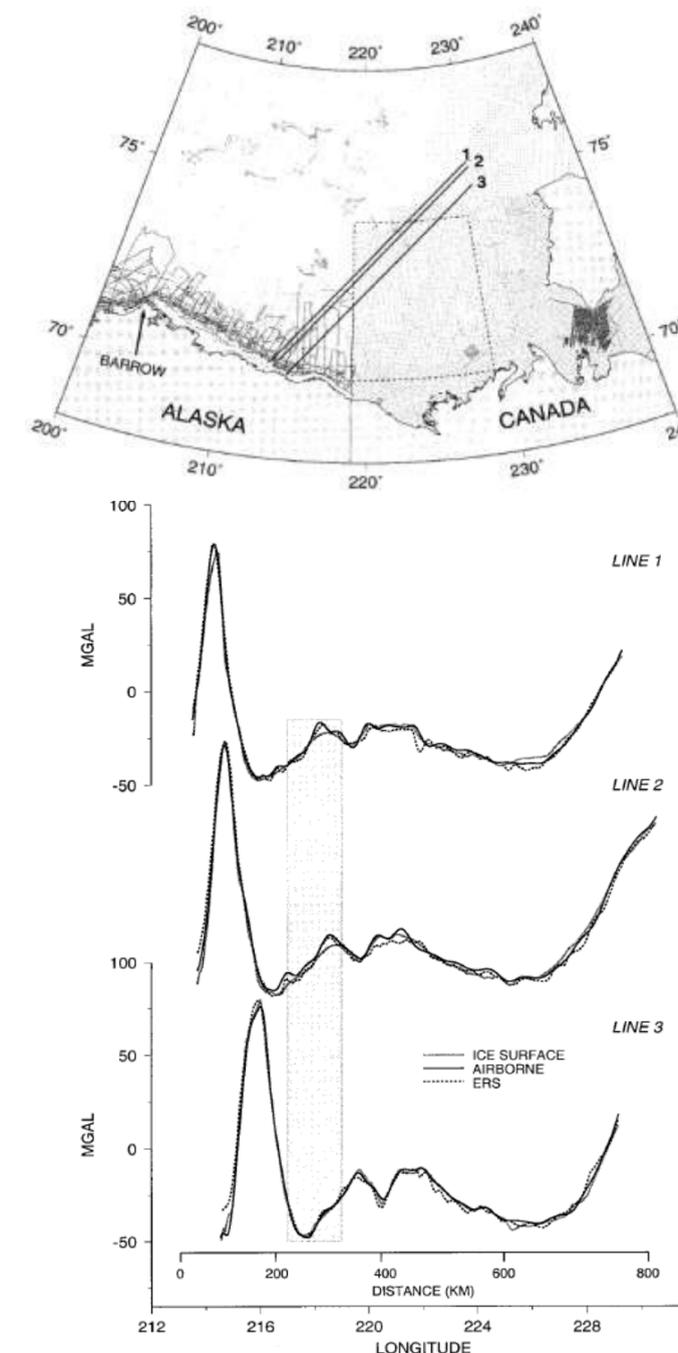
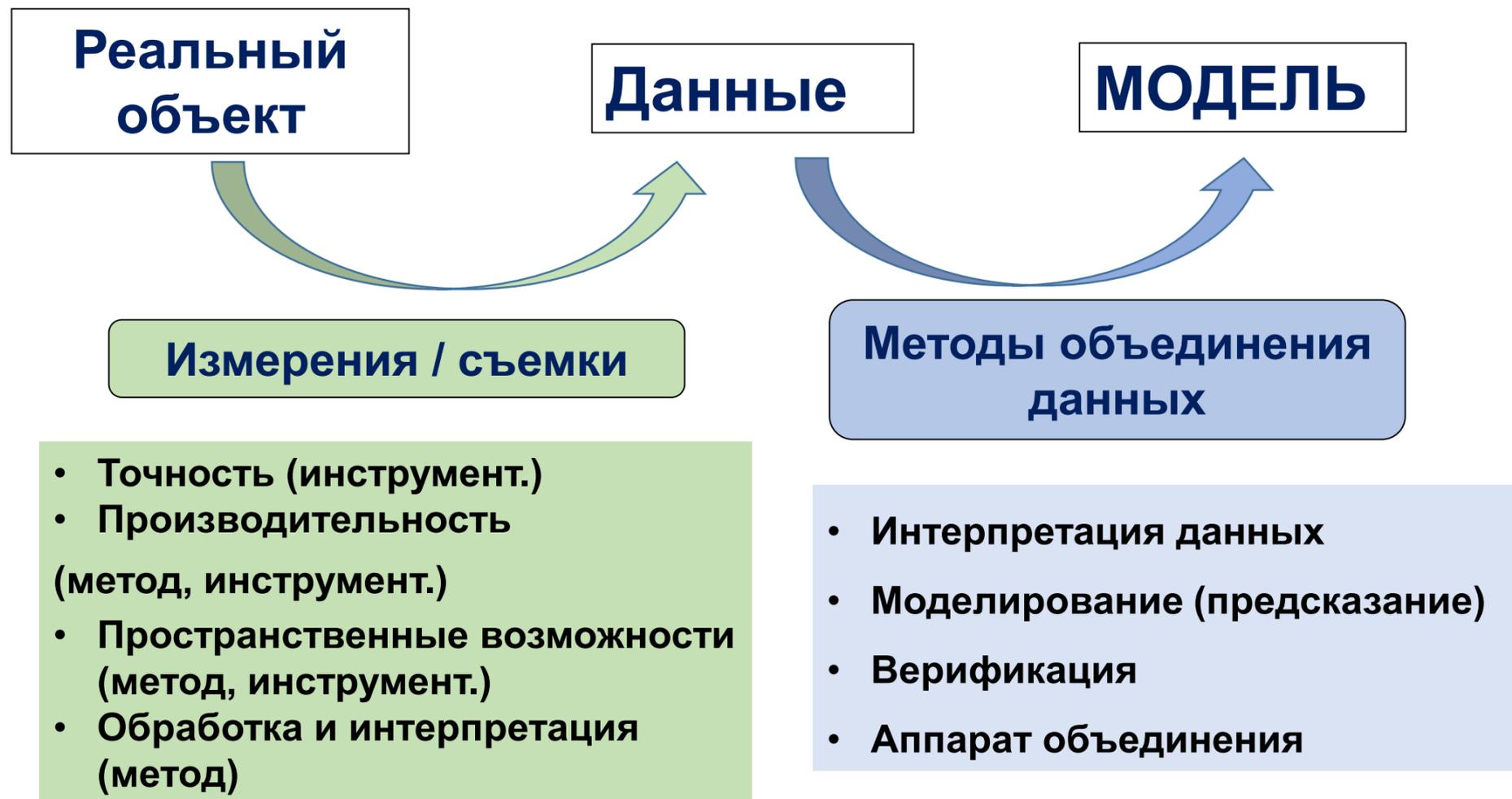
Построение моделей



В ходе Программы Арктических аэрогравиметрических исследований («Arctic airborne gravity measurement program», Naval Research Laboratory (NRL), Washington, D.C., USA) [Brozyna, 1996; Childers, 2001] было выполнено более 210 тыс. погонных километров съемки, покрывающей почти 2/3 площади Северного Ледовитого океана.

Моделирование — построение и изучение моделей реально существующих объектов, процессов или явлений с целью получения объяснений этих явлений, а также для предсказания свойств этих объектов и явлений.

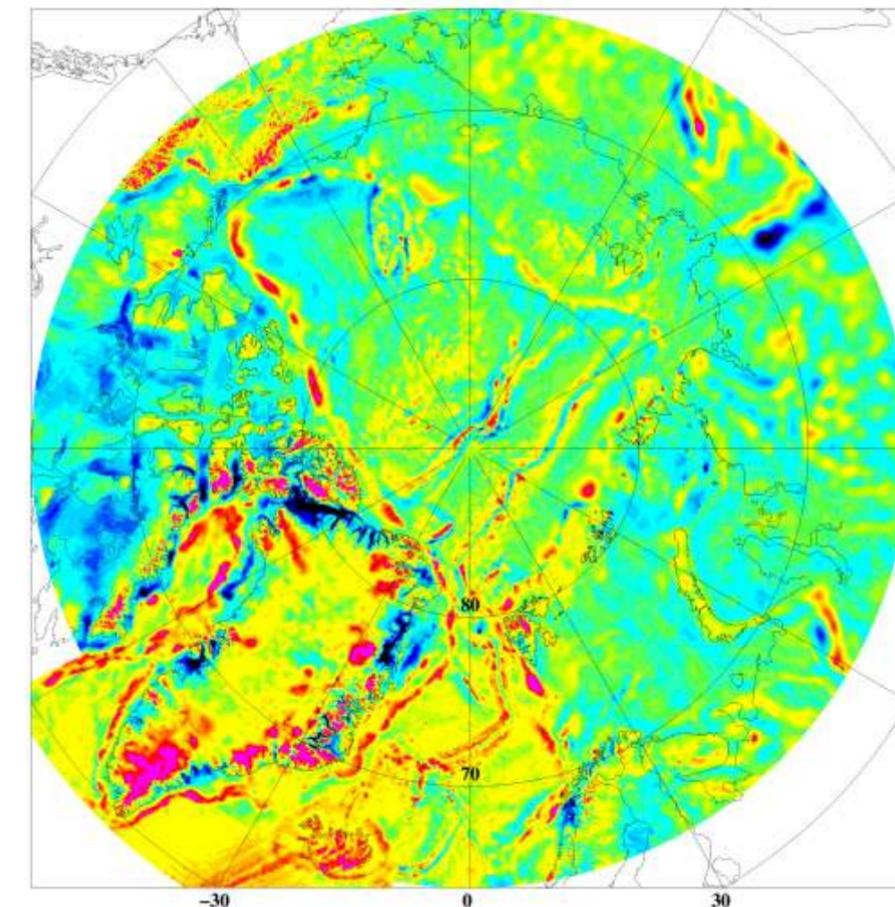
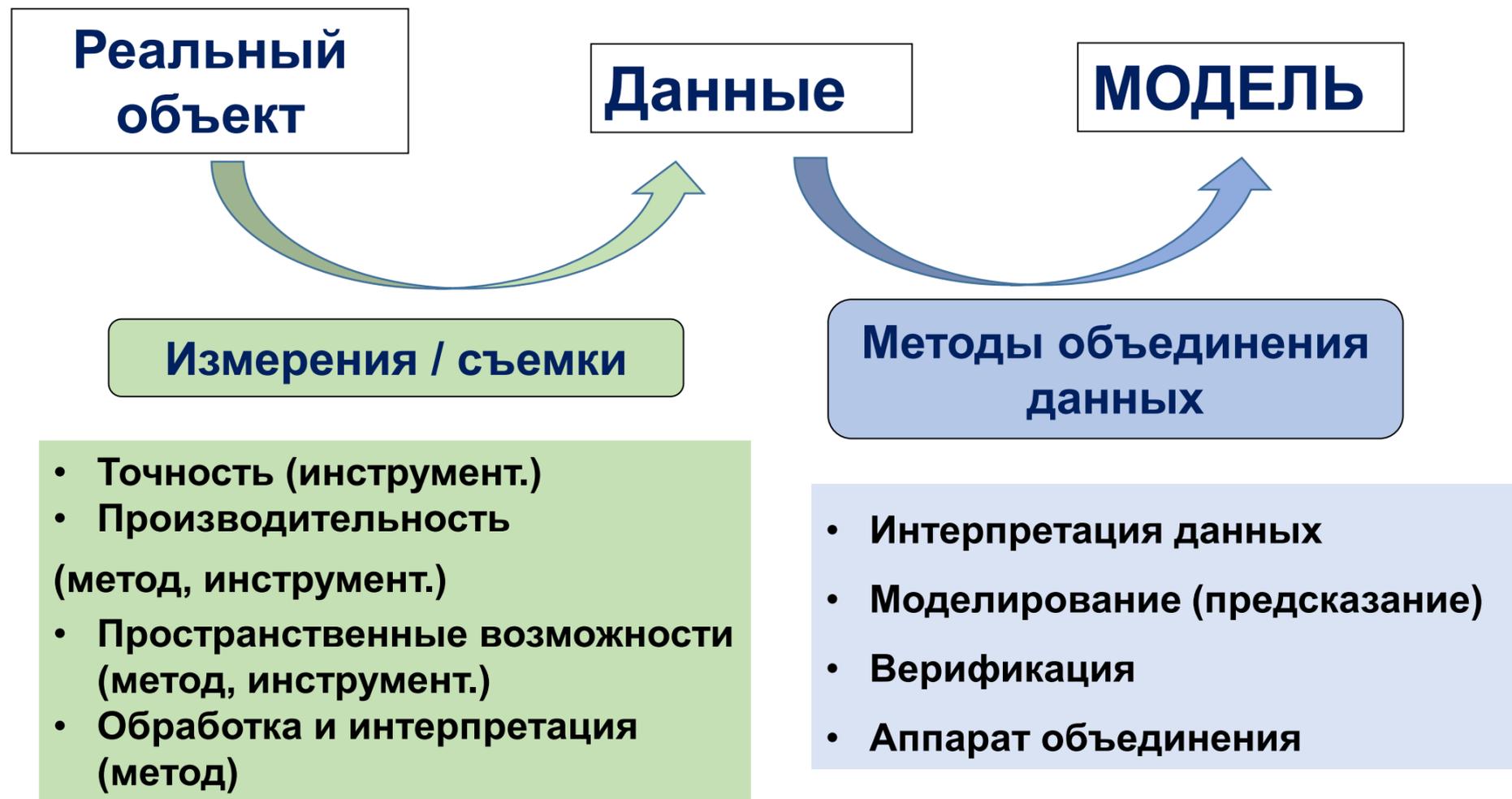
Построение моделей



Результаты комплекса аэрогравиметрических измерений совместно с прочими морскими, наземными и ледовыми измерениями, доступными к тому времени гравиметрическими данными были использованы при построении комплексных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) с использованием спутниковых измерений проектов **ERS 1 и 2**, которые обеспечивали покрытие данными до 81.5 град. с.ш.).

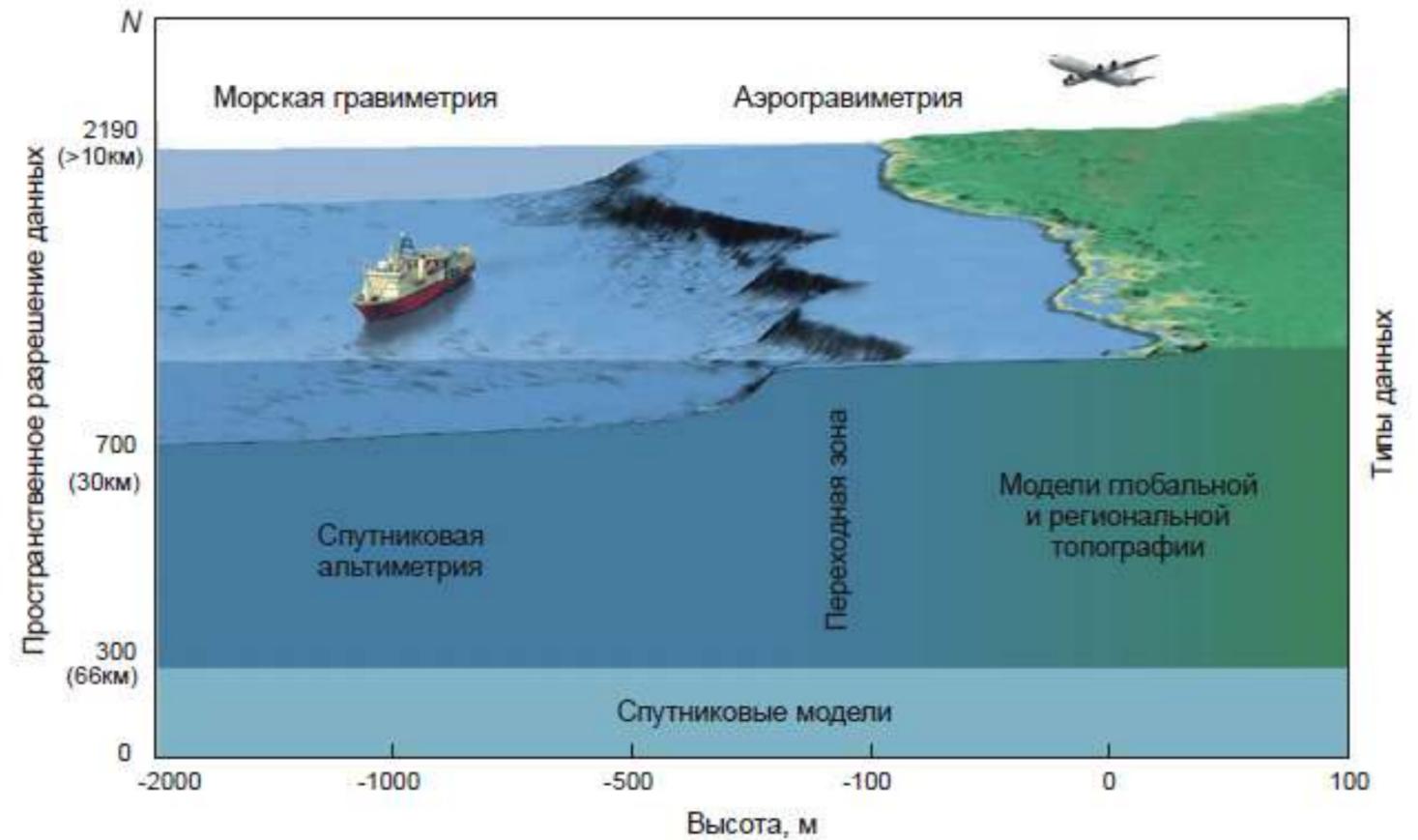
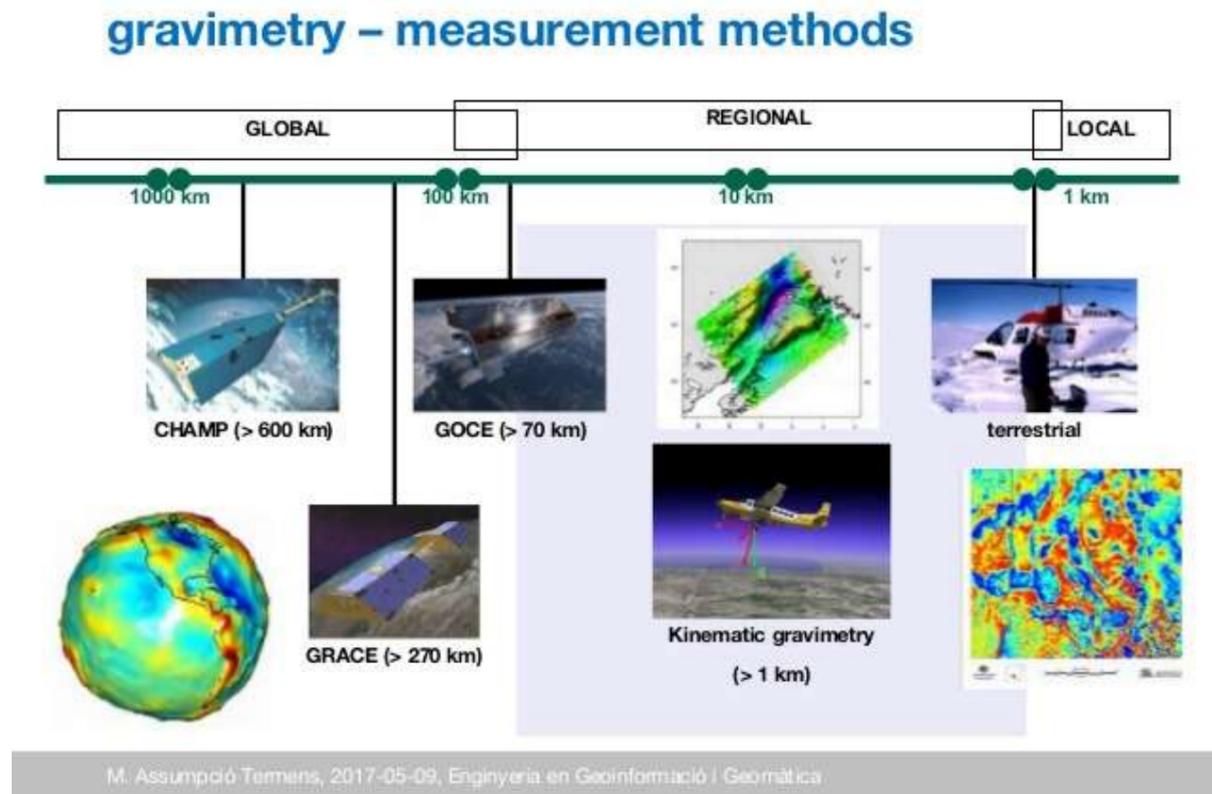
Расположение профилей и аномалии гравитационного поля вдоль них, полученные в ходе аэрогравиметрических, ледовых и спутниковых измерений (по [Chillers, 2001])

Построение моделей



Дополнение первой версии комплексной модели Арктического проекта результатами аэрогравиметрических съемок и исследований, выполненных с ледоколов, а также детальными гравиметрическими данными арктического шельфа Российского сектора и данными наземных измерений для территории Сибири (ВНИИОкеангеология, ПМГРЭ, ЦНИИГАиК), а также данными спутниковой миссии **ICESat**, которые расширили покрытие спутниковыми измерениями **до 86 град. с.ш.**, и результатами исследований CryoSat [Forsberg, 2007] позволило создать существенно **уточненную модель ГПЗ ArcGP Ver.2.0** [Kenyon, 2008].

Точность методов гравиразведки



Метод	Точность, мГал	Масштаб	Примечание
Наземная съемка	Систематич. 0,005		Невозможность выполнения на открытых акваториях
Морская гравиметрия	Систематич. 0,2 Случайная 0,2...0,7	1:20 000	Невозможность выполнения на суше
Аэрогравиметрия	Систематич. >1, Случайная 0,7...0,9	1:200 000 (1:100 000)	Обеспечение дифф.режима GPS
Спутниковые модели	Систематич. 1...10 Случайная 10-20	1:1 500 000 (1:1 000 000)	Предел «разрешения» ~ 12...15 км Предел длины волны ~ 20...40 км

Основные методы гравиразведки :

- наземные (ледовые) измерения,
- методы морской набортной гравиметрии,
- аэрогравиметрия,
- Спутниковые методы: гравиметрия, альтиметрия, градиентометрия

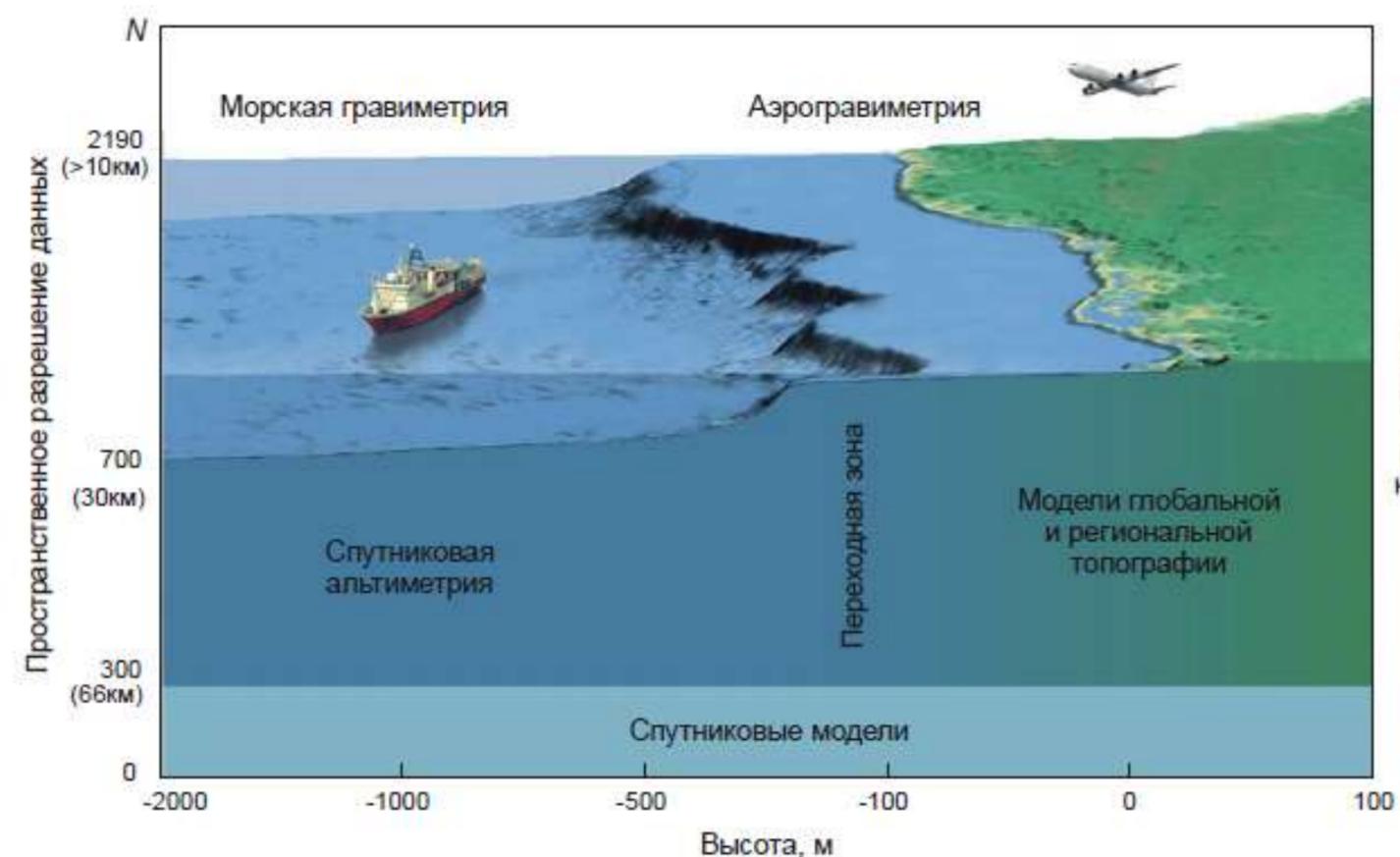
Большое значение приобретают оценки качества и достоверности глобальных модельных данных, также возрастает ценность контрольных инструментальных измерений, выполняемых на длинных и сверхдлинных маршрутах.

Так как **носителями измерительной аппаратуры может быть воздушные и морские суда, и в некоторых случаях – автотранспорт**, значительно увеличивается объем получаемых геофизических и геодезических измерений, подходящих для оценки существующих глобальных моделей.

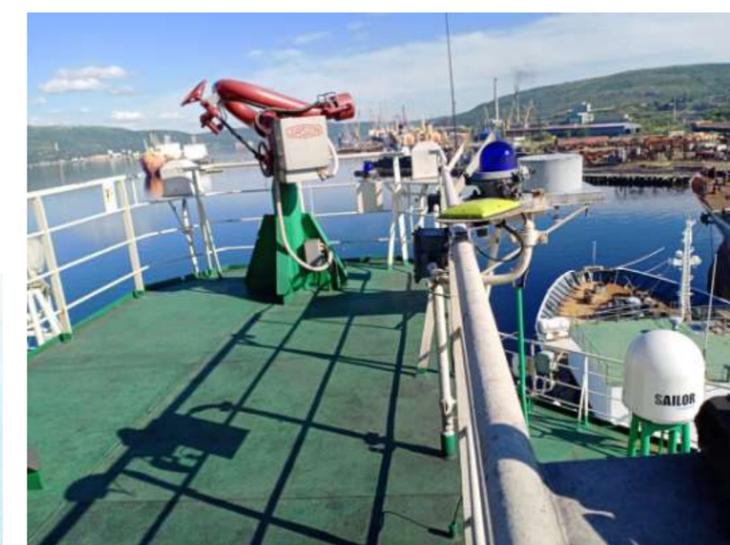
Возникает необходимость в специальных методических подходах, которые зависят как от характера самих данных, так и от используемого транспортного средства – носителя.

Группы исследований:

- (1) **Аэрогравиметрические измерения на протяженном трансконтинентальном перелете по маршруту (Мурманск) Архангельск – Петропавловск-Камчатский;**
- (2) **GPS- измерения с использованием исследовательской лаборатории на базе автомобиля;**
- (3) **GPS-измерения на борту ледокольного судна по маршруту Северного морского пути.**



Спутниковые антенны в блистере на фюзеляже самолета-лаборатории



Перспективные направления исследований

Коррекция позиционирования самолета-лаборатории при аэрогравиметрической съемке

1. **Исследование допустимого расстояния** самолета-лаборатории от базовой станции (т.н. длина базовой линии)
2. **Повышение автономности** временных наземных базовых станций ГНСС с высокой частотой регистрации (не менее 10 Гц) спутниковой навигационной информации
3. Исследование возможности использования **постоянных базовых станций ГНСС** с более низкой частотой опроса
4. Исследование возможности применения технологии **Precise Point Positioning** , которая не требует использования базовых станций

Совершенствование технологий для координатного обеспечения самолета-лаборатории при аэрогравиметрической съемке

1. Исследование применения **многоантенных приемников ГНСС** на борту самолета-лаборатории для обеспечения большей независимости от базовых станций
2. Исследование выбора «рабочей» системы координат для обеспечения устойчивой навигации и координатного обеспечения аэрогравиметрических комплексов в условиях высоких широт Арктики
3. **Анализ поправок за ионосферные возмущения для контроля устойчивости навигационных решений**

Комплексирование различных гравиметрических данных и современные комплексные глобальные модели гравитационного поля Земли (ГПЗ)

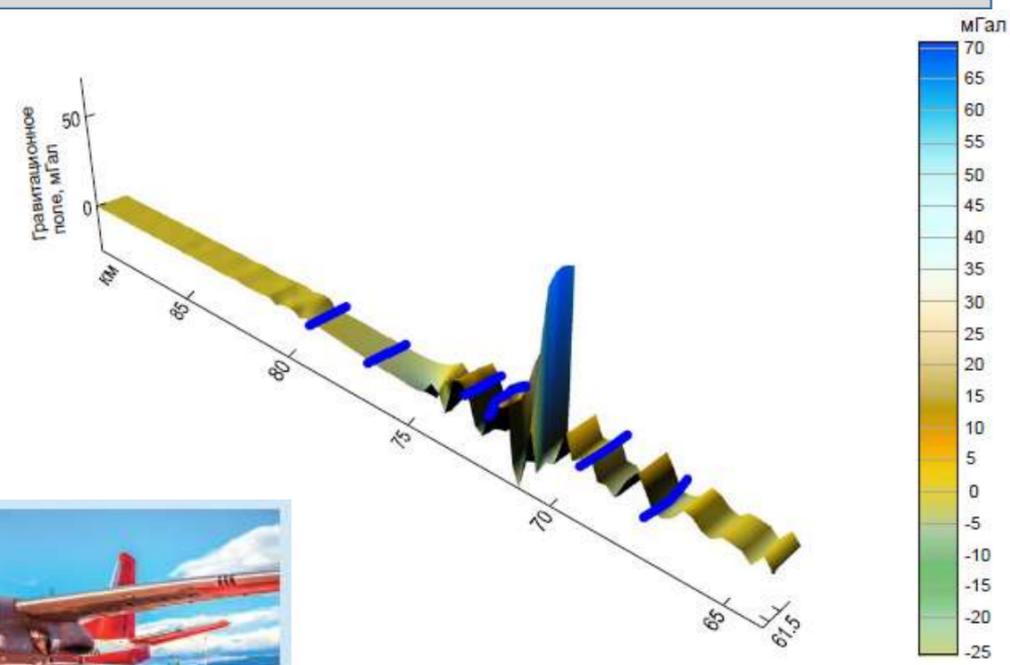
1. **Методы комплексирования разноточных данных** (данных, полученных разными методами)
2. Совершенствование **высокостепенных глобальных моделей** гравитационного поля Земли
3. Развитие **спутниковых моделей** гравитационного поля Земли

(1) Аэрогравиметрические измерения на трансконтинентальных перелетах

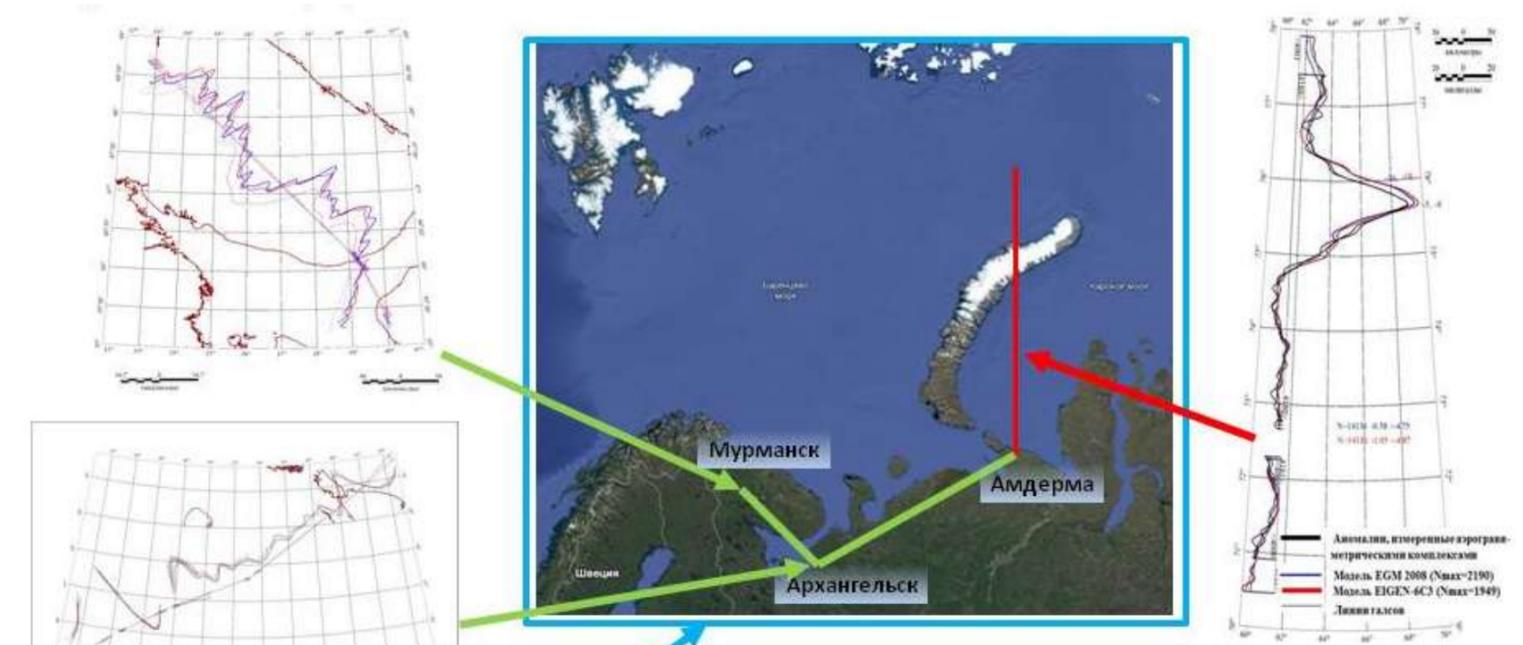
Задачи маршрутных аэрогравиметрических измерений :

- исследование корреляции данных на протяженных маршрутах с глобальными моделями гравитационного поля
- оценка различных навигационных решений
- определение возможностей повышения информативности профильных измерений

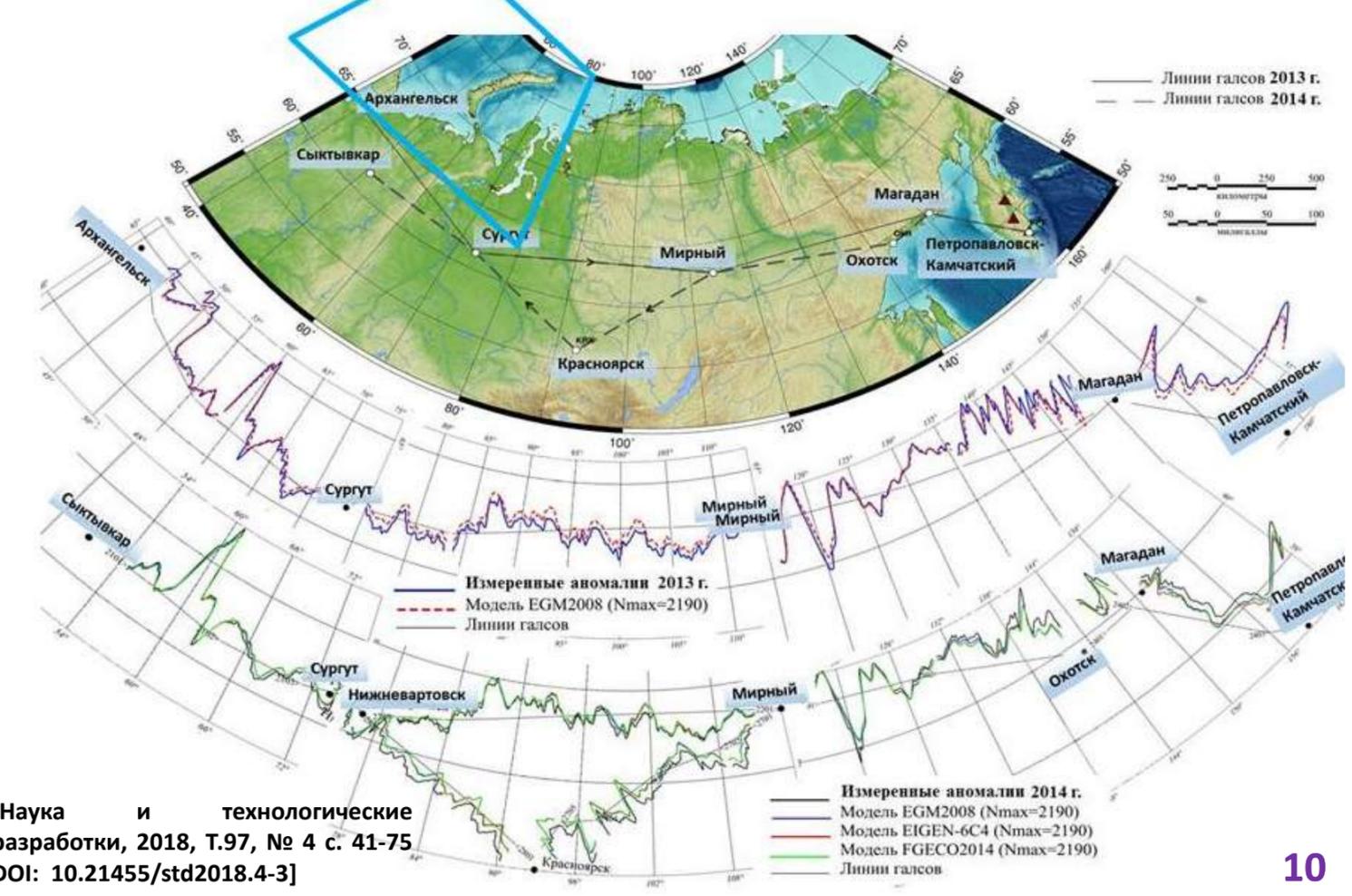
- Развита структурно-параметрический подход к построению аналитических аппроксимаций
- Предложен метод нахождения интегральных кривых векторного поля с использованием модифицированных *S-аппроксимаций*
- Рассмотрена методика нахождения аналитических продолжений потенциального поля по данным профильных (маршрутных) геофизических измерений
- Построены интегральные кривые для примеров площадной и маршрутной гравиметрической съемки



[Наука и технологические разработки, 2020, Т.99, № 4 с. 34-52
DOI: 10.21455/std2020.4-2]

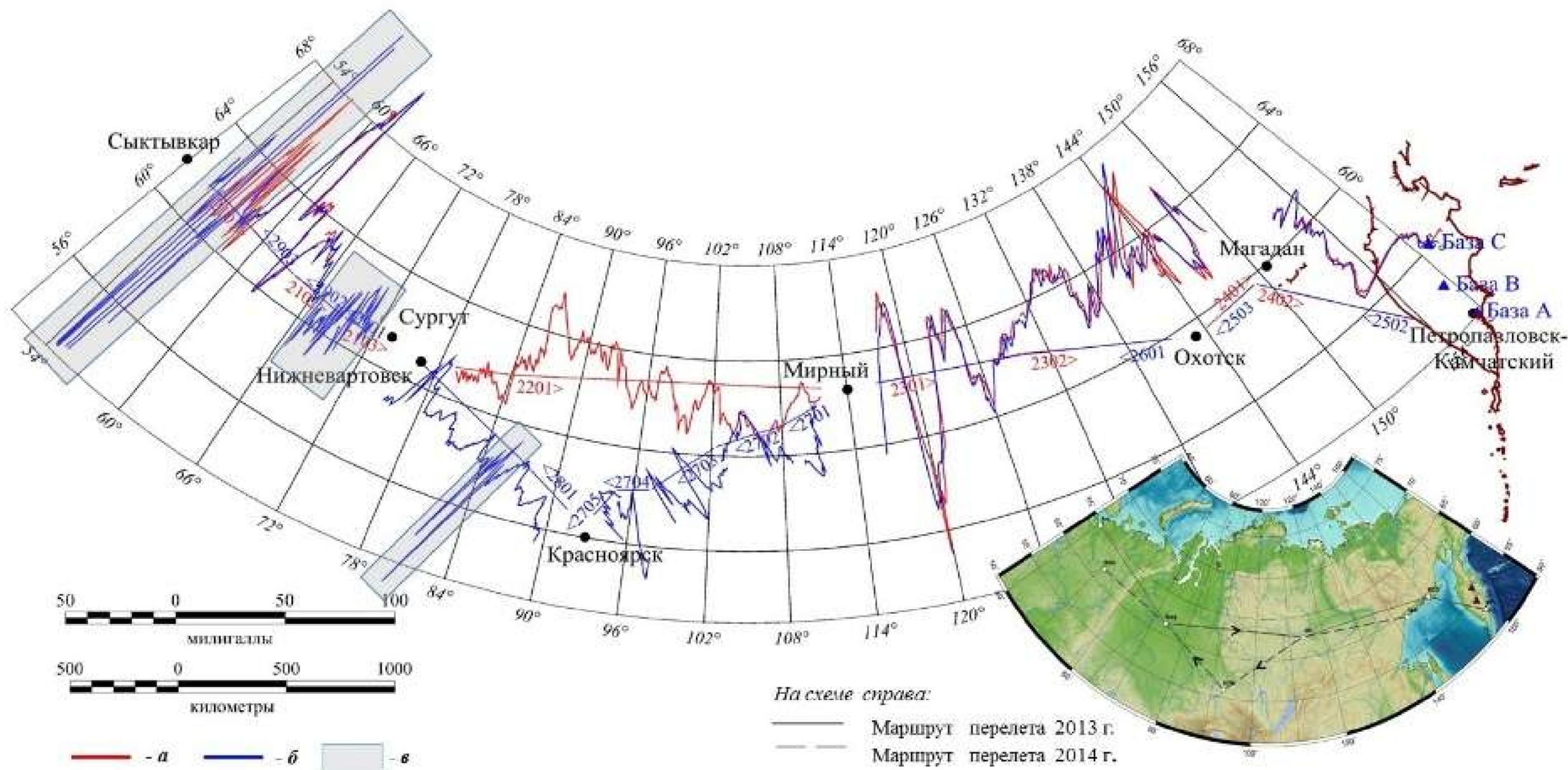


[Физика Земли, 2016, № 3 с. 123-130
DOI: 10.7868/S0002333716030066]



[Наука и технологические разработки, 2018, Т.97, № 4 с. 41-75
DOI: 10.21455/std2018.4-3]

Исследование помехи

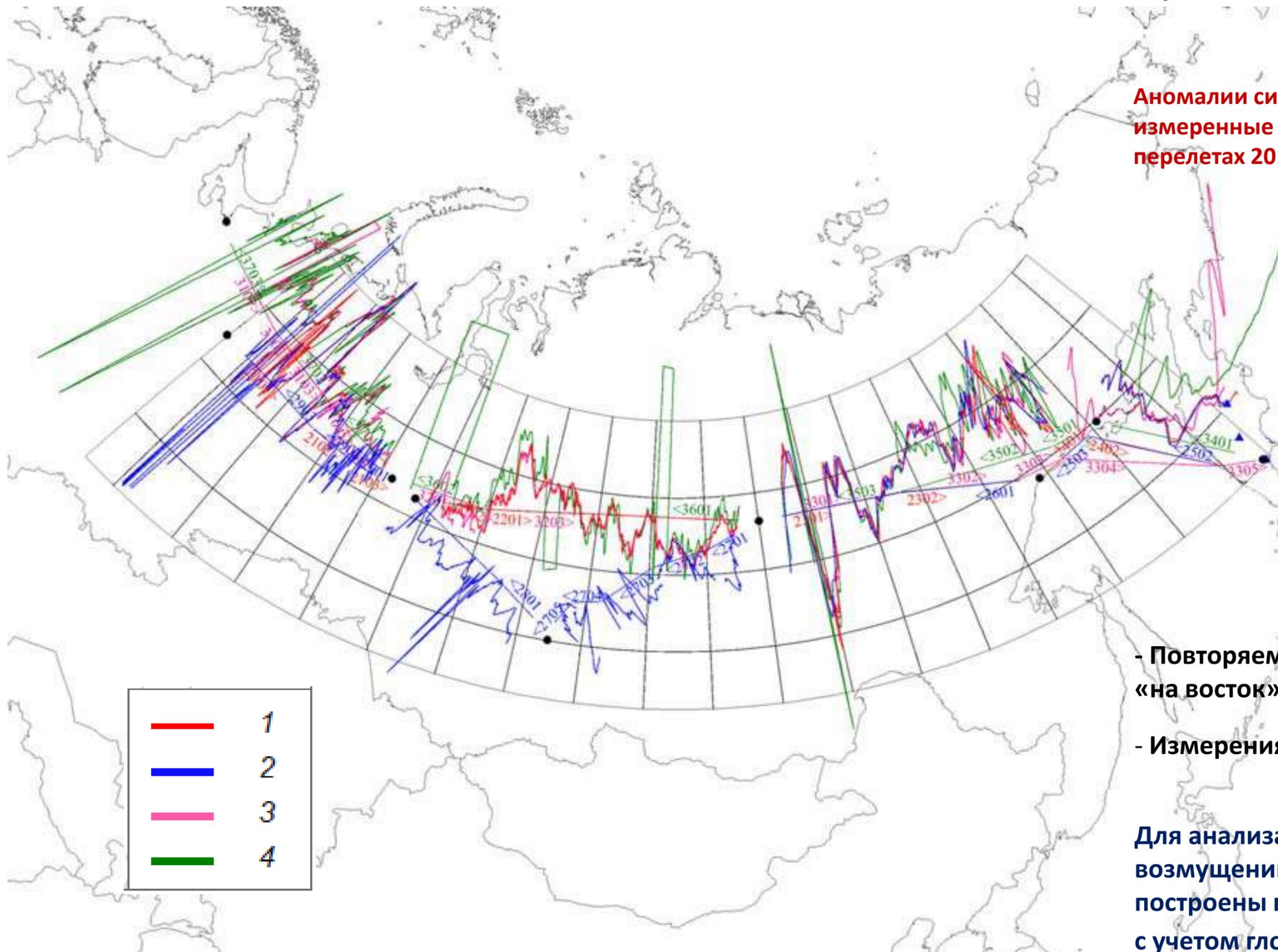


Дифференциальный режим коррекции навигационных данных имеет ограничения, одним из которых является необходимость сопровождения выполняемых измерений базовыми станциями ГНСС, размещенными в районе работ. Альтернативой относительному методу является режим точного точечного позиционирования PPP (Precise Point Positioning)

С использованием PPP задача определения местоположения может решаться в постобработке с использованием данных о точных эфемеридах и ошибках часов навигационных спутников с помощью одного двухчастотного приемника ГНСС, при этом использование наземных базовых станций не требуется. Это позволяет ожидать повышения автономности при выполнении аэрогравиметрических и других видов геофизических исследований, что особенно актуально при работе в высоких широтах Арктики и над удаленными акваториями.

Результаты:

Аномалии силы тяжести в свободном воздухе, измеренные на всех трансконтинентальных перелетах 2014 (1-2) и 2015 (3-4) гг.:



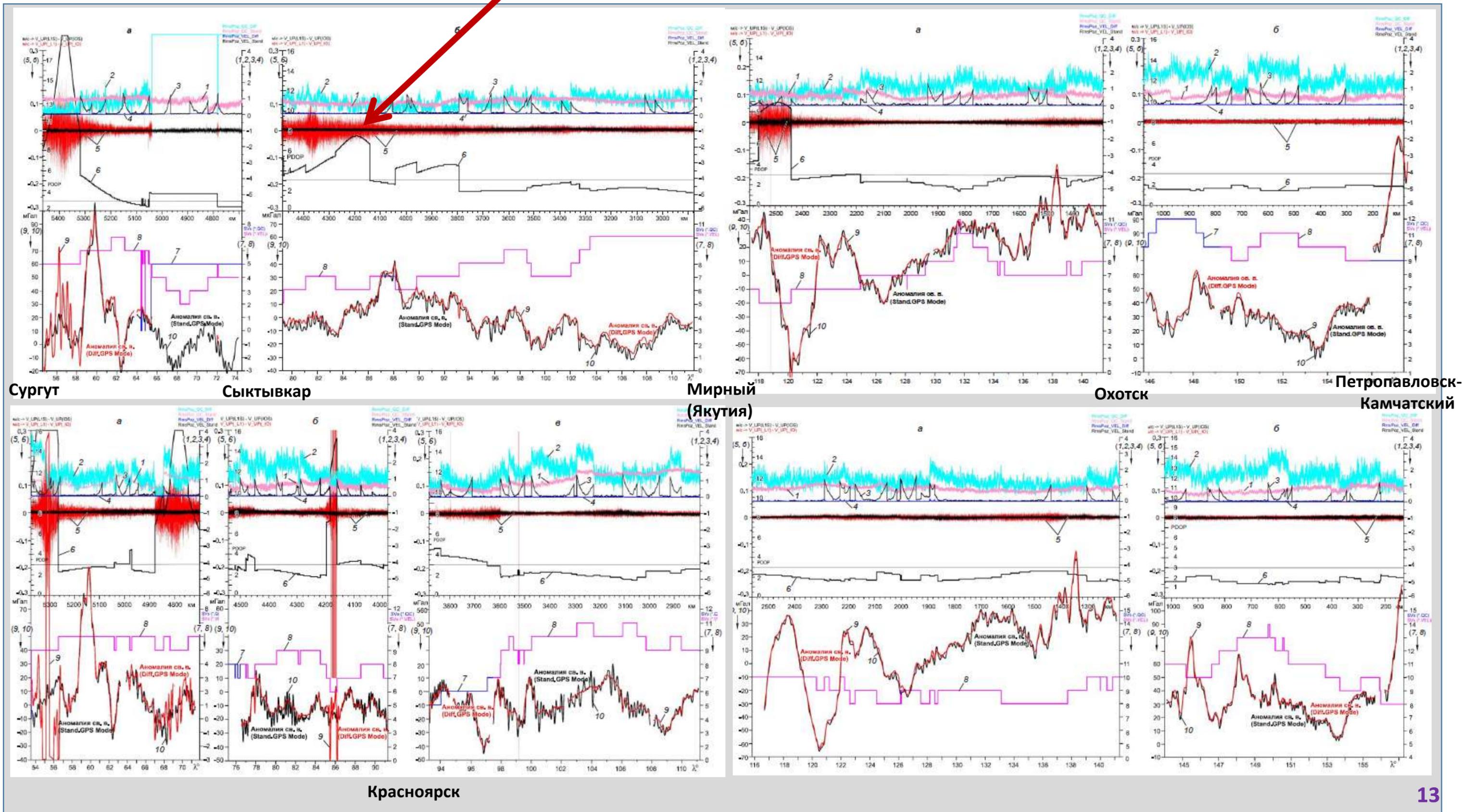
- Повторяемость измерений в направлении «на восток» и «на запад»

- Измерения выполнены в летне-осенний период

Для анализа вклада ионосферных возмущений на перелетах построены профили с учетом глобальных моделей ионосферы

Перелет Сургут - Петропавловск-Камчатский

Красная и черная спектральные кривые – разности определений вертикальных скоростей подвижного приемника в режиме использования данных на основной несущей частоте GPS – L1 и результатов с учетом ионосферно-свободной комбинации (с использованием второй несущей частоты L2) для стандартного и дифференциального режимов обработки, соответственно.



Навигационное обеспечение аэрогравиметрических измерений

Навигационное обеспечение аэрогравиметрических измерений

является важной составляющей процесса измерения.

Наибольший интерес в процессе определения местоположения самолета-лаборатории составляет вертикальная составляющая ввиду зависимости измеряемого значения силы тяжести от высоты полета.

На основе ГНСС определений высотная составляющая определяется хуже, чем плановые координаты.

По этой причине дальнейшему анализу подвергались только значения высотной компоненты местоположения объекта.



1. Для первичного анализа пригодности базовых станций (БС) анализировались временные станции и станция СДКМ в Петропавловске-Камчатском. Эти БС применялись на трансконтинентальных перелетах

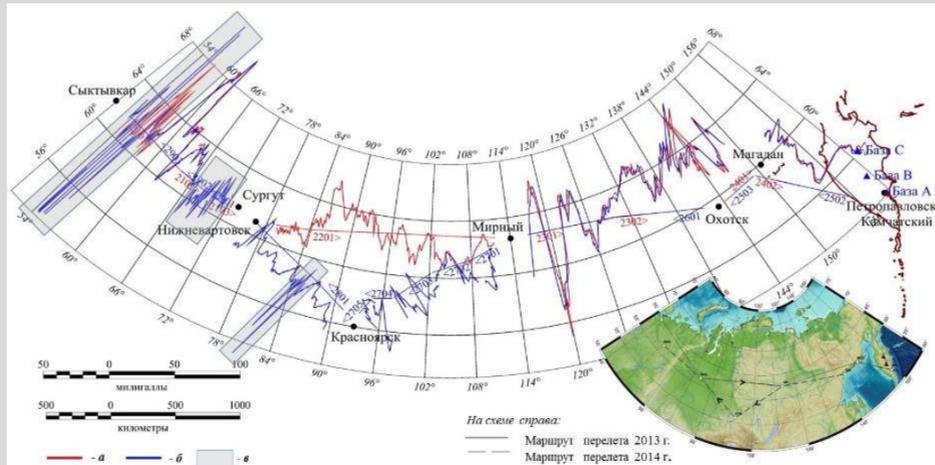
2. Для анализа данных перелетов по маршрутам Мирный – Сургут и Сургут – Архангельск. В процессе координатных определений использовались измерительные данные со станций СДКМ (частота опроса 1 Гц) в Якутске, Ноябрьске, Санкт-Петербурге. Дополнительно рассматривался вариант коррекции позиционирования по измерениям временной базовой станции (частота опроса 10 Гц), размещенной на период перелета в Архангельске.

Важным вопросом для повышения автономности регистрации ГНСС-измерений является корректный учет ионосферных факторов

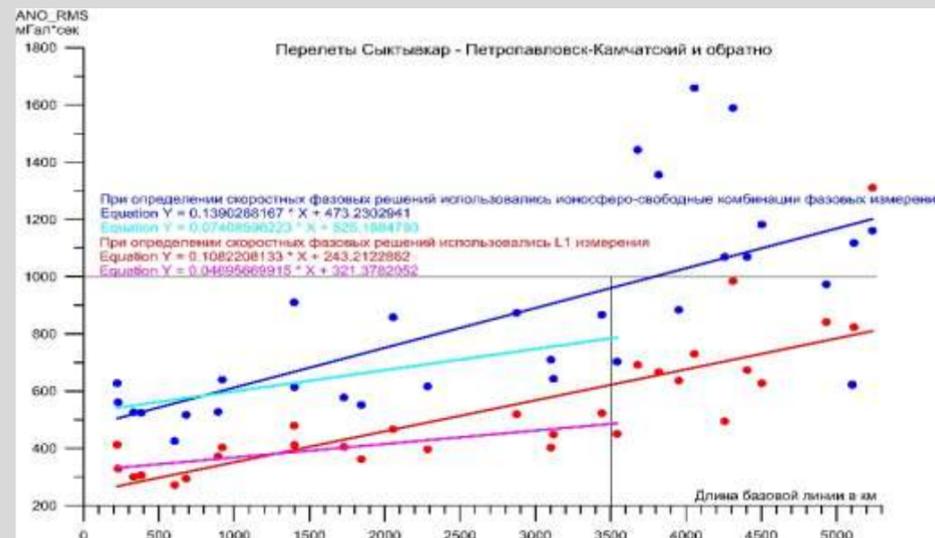
Оценка допустимого удаления

2015 г.: участок Сургут-Петропавловск-Камч.

попутные аэрогравиметрические исследования на профилях, сравнение с моделями ГПЗ, оценка дальнего действия базовых станций на Камчатке

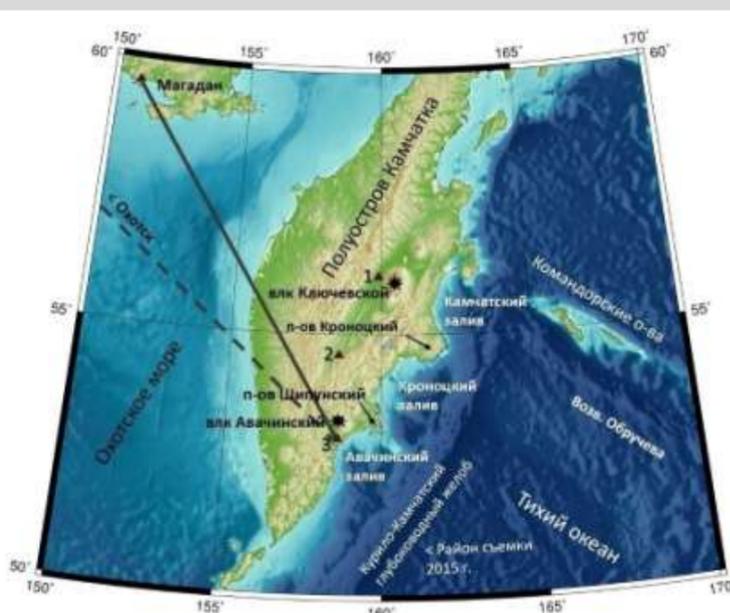


Результат: базовые станции могут оказывать положительный эффект при длинах базовых линий ~ 3000 км



Критерии: $ANO (RMS) < 1000$, $PDOP \leq 4$, общих рабочих спутников > 5 :

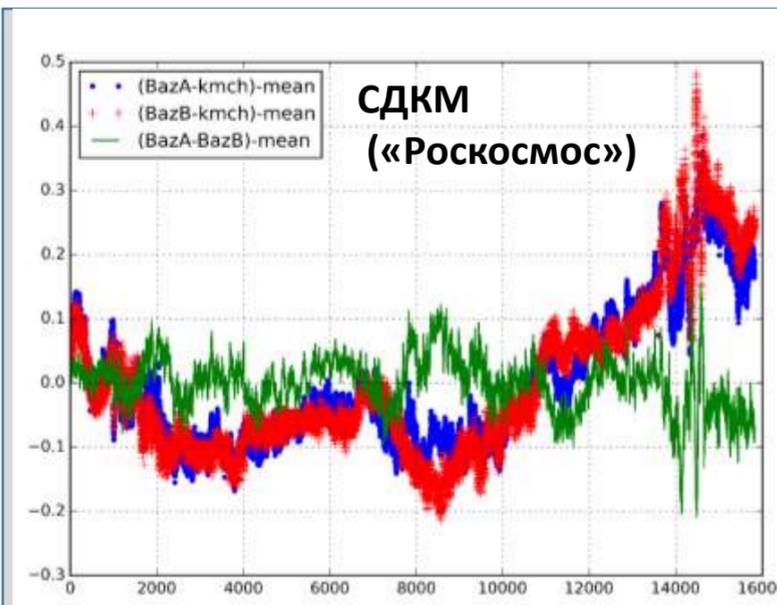
Ионосферно-свободная комбинация;
дифф.режим для частоты L1



Сравнение определений собственной высоты на базовых станциях 1 и 2 (сверху) и 2 и 3 (снизу) во время трансконтинентальных перелетов 2014 года .



Расстояние 1-2 – 250 км, 1-3 - 500 км.
Вывод: различия не очевидны



Применимость станций СДКМ (частота опроса 1 Гц)

Сравнение данных временных базовых станций (10 Гц) в г. Петропавловск-Камч (База А) и в обл. Карымшина (База В, расст. 60 км) и данных станции СДКМ в г. Петропавловск-Камч.

Вывод: данные станции СДКМ хорошо коррелируют с данными временных базовых станций А и В. Использование станции СДКМ с частотой 1 Гц информативно для пост-обработки навигационных данных самолета лаборатории (дискретность реже 1 с - неинформативны)

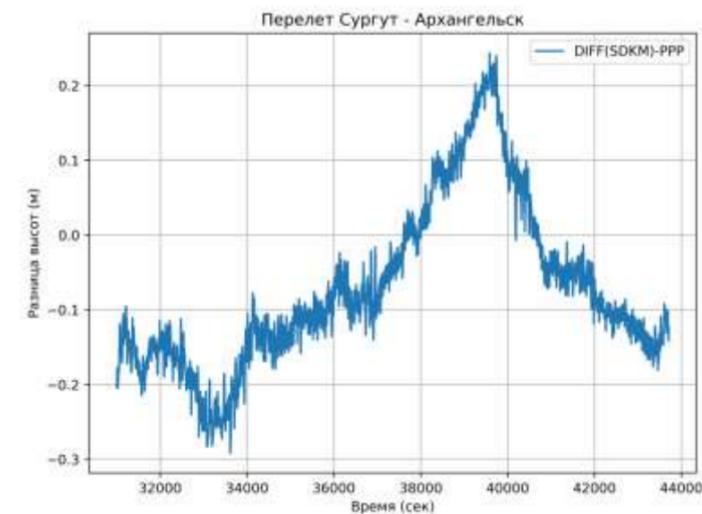
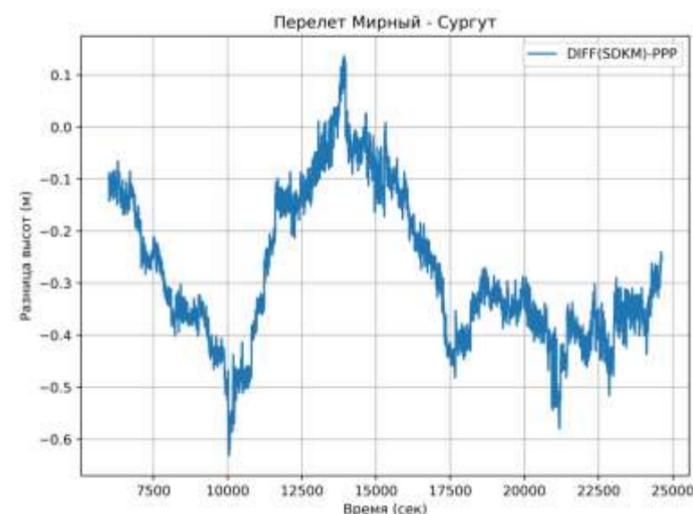
Оценка допустимого удаления – Precise Point Positioning (PPP)

Для двух анализируемых участков перелета были получены три варианта координатных решений:

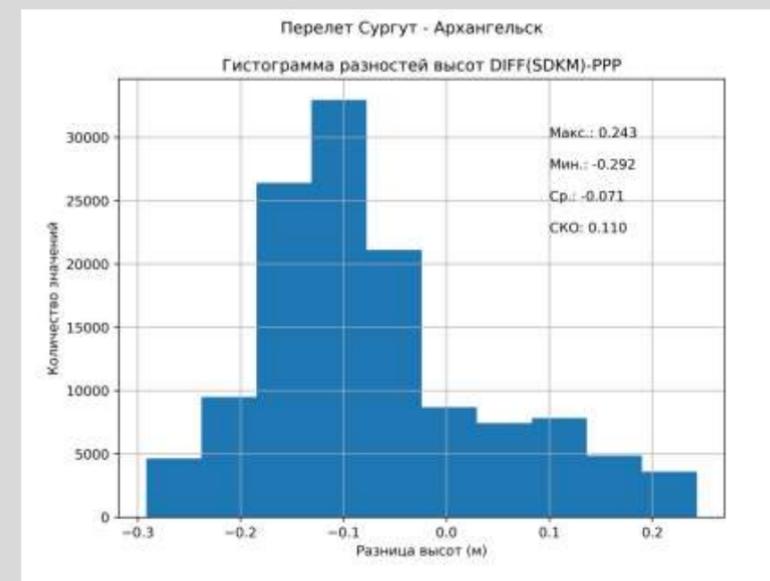
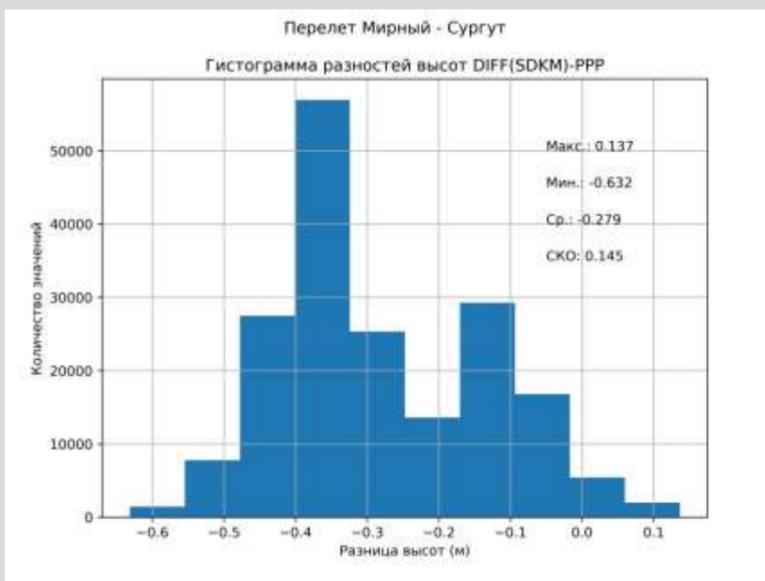
1) в дифференциальном режиме относительно станций СДКМ (Якутск, Ноябрьск, Санкт-Петербург), которые располагались на двух концах каждого из участков маршрута, что соответствует наиболее оптимальному расположению станций при прочих равных условиях;

2) в абсолютном режиме точного позиционирования без использования информации наземных базовых станций – Precise Point Positioning (PPP).

3) в дифференциальном режиме относительно базовой станции расположенной в г. Архангельск;



Графики разницы высот самолета-лаборатории, определенных в дифференциальном режиме относительно станций СДКМ и в режиме высокоточного позиционирования PPP



Гистограммы разницы высот самолета-лаборатории, определенных в дифференциальном режиме относительно станций СДКМ и в режиме высокоточного позиционирования PPP

(слева: маршрут «Мирный-Сургут», станции СДКМ Якутск и Ноябрьск; справа: маршрут «Сургут-Архангельск», станции СДКМ Санкт-Петербург и Ноябрьск)

По результатам анализа координатных решений установлено, что значения высот полета самолета-лаборатории, полученные с использованием трех методов согласуются между собой на дециметровом уровне точности. Поскольку технология PPP не предполагает зависимости снижения точности позиционирования с удалением от базовых станций, было сделано предположение, что полученные с использованием PPP данные могут служить хорошей привязкой для оценки приемлемого дальнего действия базовых станций.

Оценка допустимого удаления – Precise Point Positioning (PPP)

Для сравнения на этих же участках перелета были проанализированы разницы высот, полученные в режиме высокоточного позиционирования PPP и в дифференциальном режиме относительно пункта ARCH – временной базовой станции с частотой опроса 10 Гц, расположенной в Архангельске. Для разницы таких координатных решений характерно наличие длиннопериодической составляющей изменения разницы высот на каждом из участков маршрута.

На участке «Мирный-Сургут» значение разницы высот увеличивается, в то время как на участке Сургут-Архангельск график разности высот показывает противоположную тенденцию.

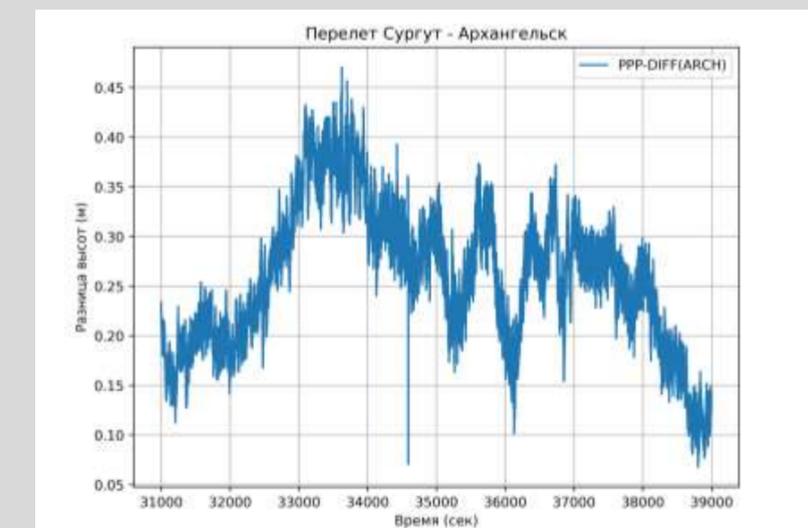
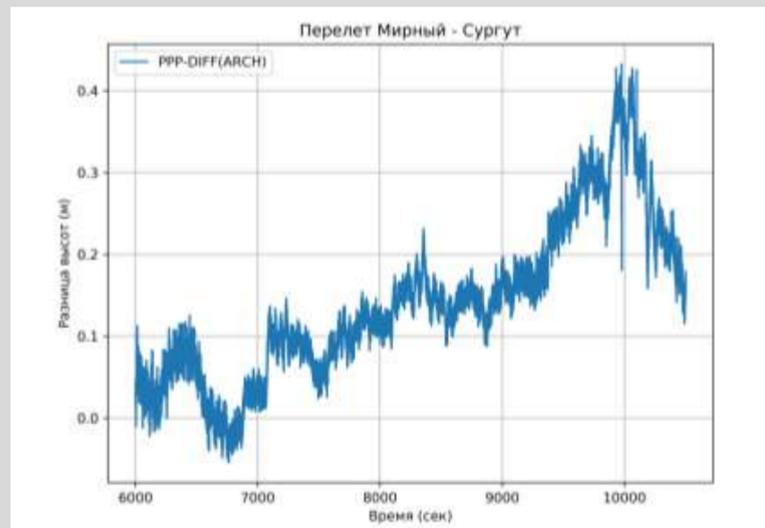
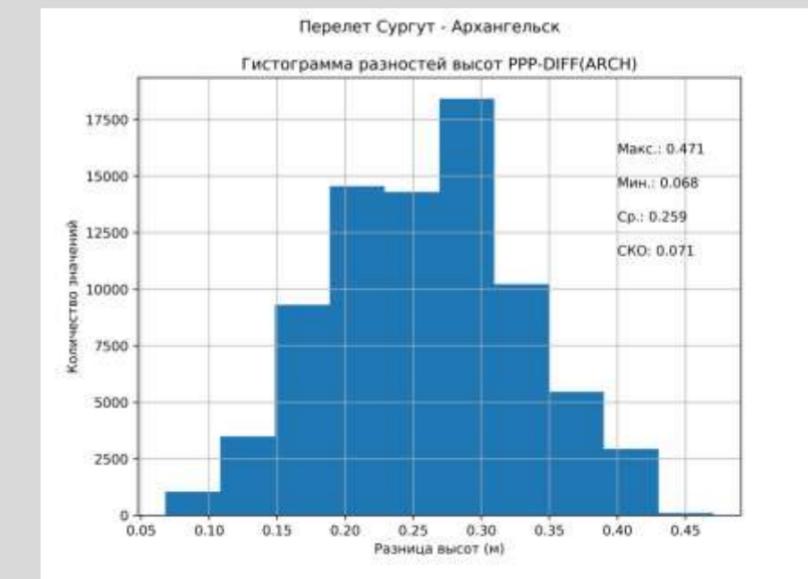
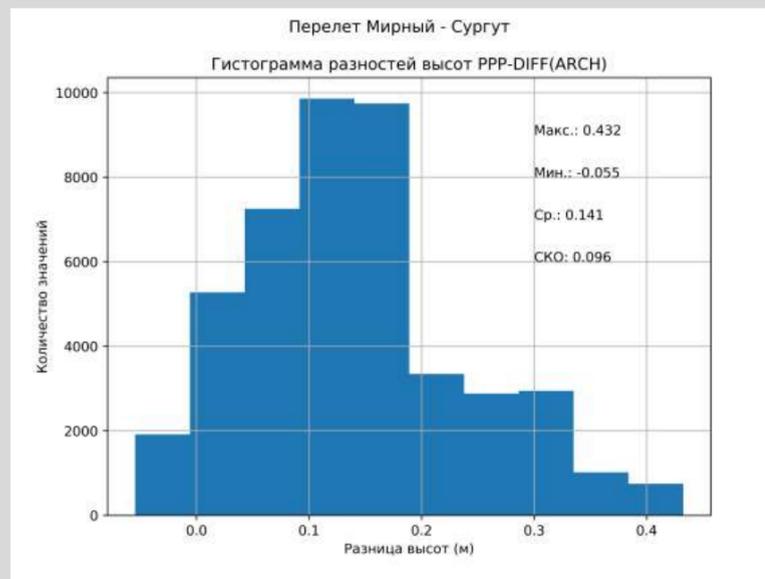


График разницы высот самолета-лаборатории, определенных в дифференциальном режиме относительно временной базовой станции ARCH (Архангельск) и в режиме абсолютного позиционирования PPP



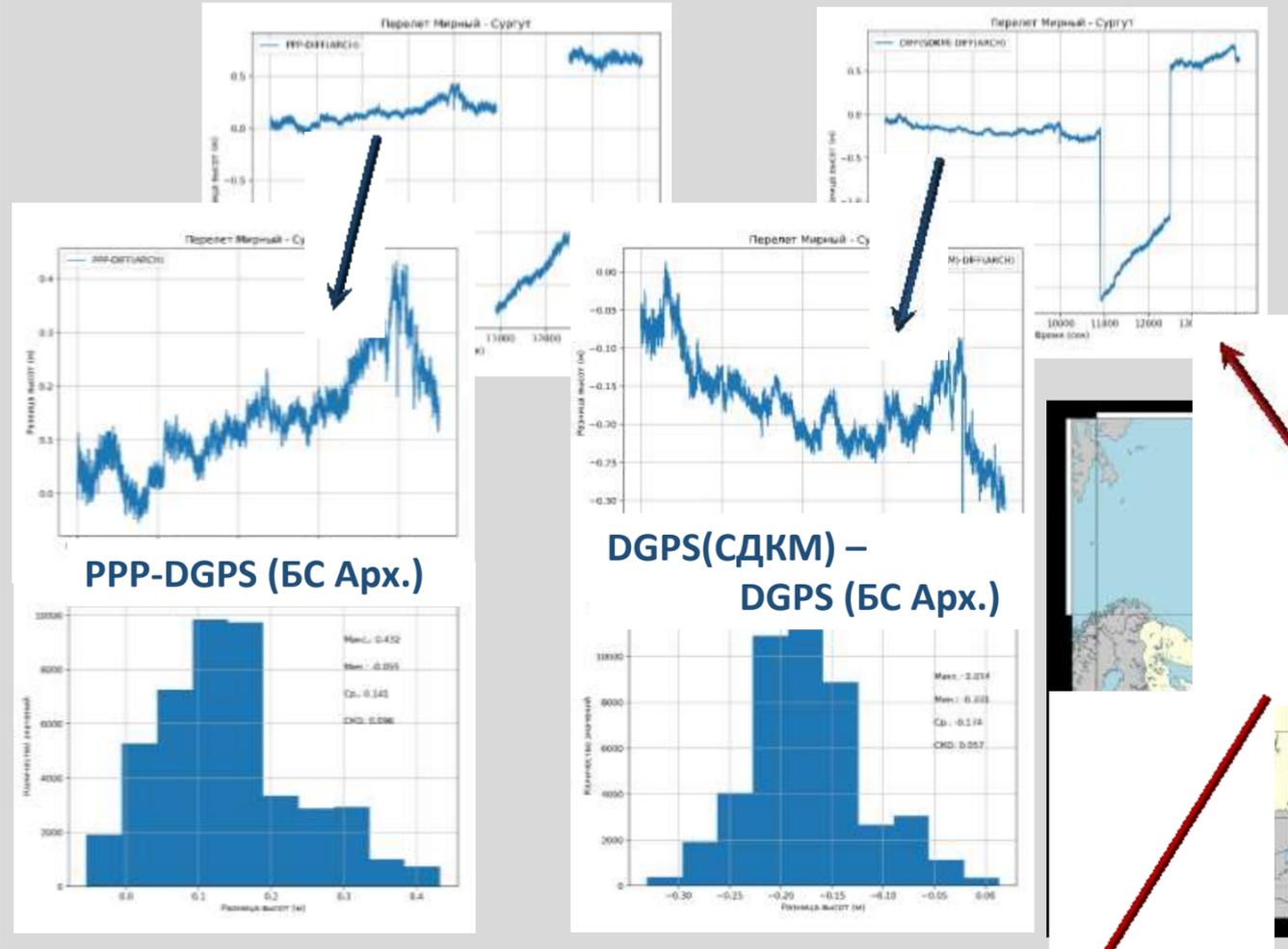
Гистограмма разницы высот самолета-лаборатории, определенных в дифференциальном режиме относительно временной базовой станции ARCH (Архангельск) и в режиме абсолютного позиционирования PPP

(слева: маршрут «Мирный-Сургут»; справа: маршрут «Сургут-Архангельск»)

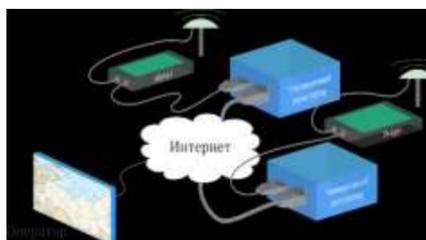
Гипотеза: Такое поведение связано с ошибками в учете влияния ионосферы в связи с значительным расстоянием между базовой станцией в г. Архангельск и местоположением самолета-лаборатории. Однако, по мере приближения к базовой станции, разница в значении высот сокращается.

? Чем объяснить уменьшение разницы высот на дальнем конце профиля?

2017 г.: Мирный –Сургут
Сравнение коррекции с применением технологий (1-3)*



* 1 – Временная необслуживаемая базовая станция (БС) с технологией удаленного контроля регистрации данных ГНСС, 10 Гц (Архангельск), использующая малогабаритный энергоэффективный регистратор



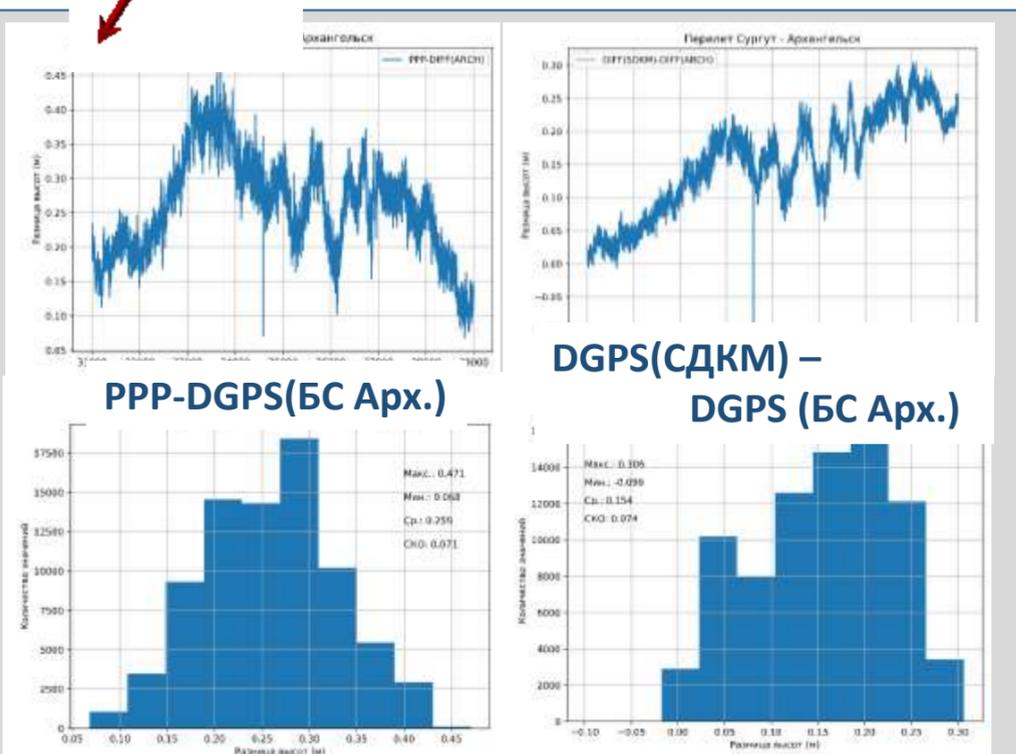
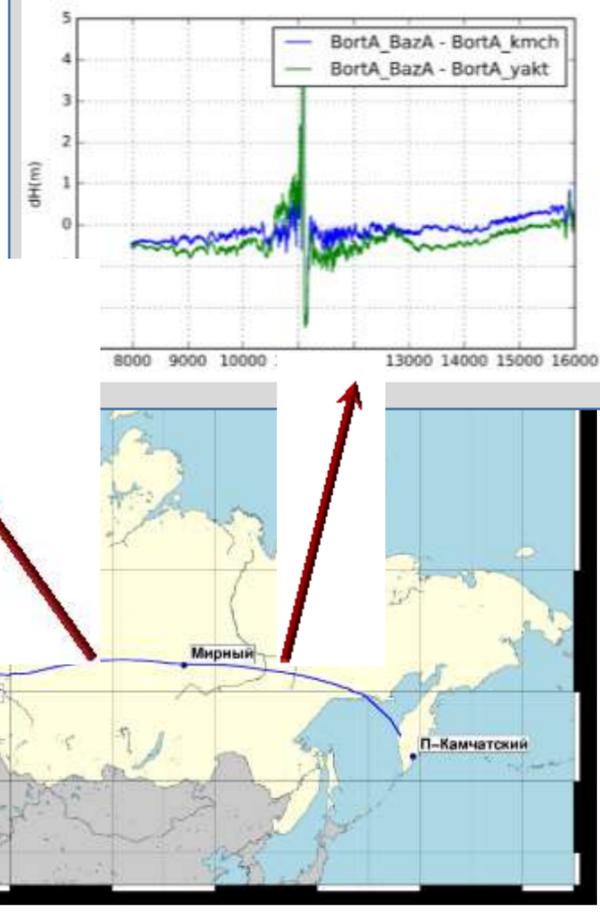
* 2 – Станции СДКМ, 1 Гц,



* 3 – Precise point positioning (PPP) – без использования базовых станций



2016 г.: Исследование DGPS по станциям СДКМ на перелете Петропавловск - Мирный



2017 г.: Сургут -Архангельск
Сравнение коррекции с применением технологий (1-3)*

Сравнение технологий позиционирования

- временные БС 10 Гц;
- постоянные БС СДКМ 1 Гц
- Precise Point Positioning (PPP)

1. С использованием станций СДКМ в гг. Петропавловск-Камчатский и Якутск на перелете Петропавловск-Камч. – Мирный получены сходные результаты коррекции позиционирования самолета-лаборатории

⇒ Подтверждается возможность использования удаленных базовых станций

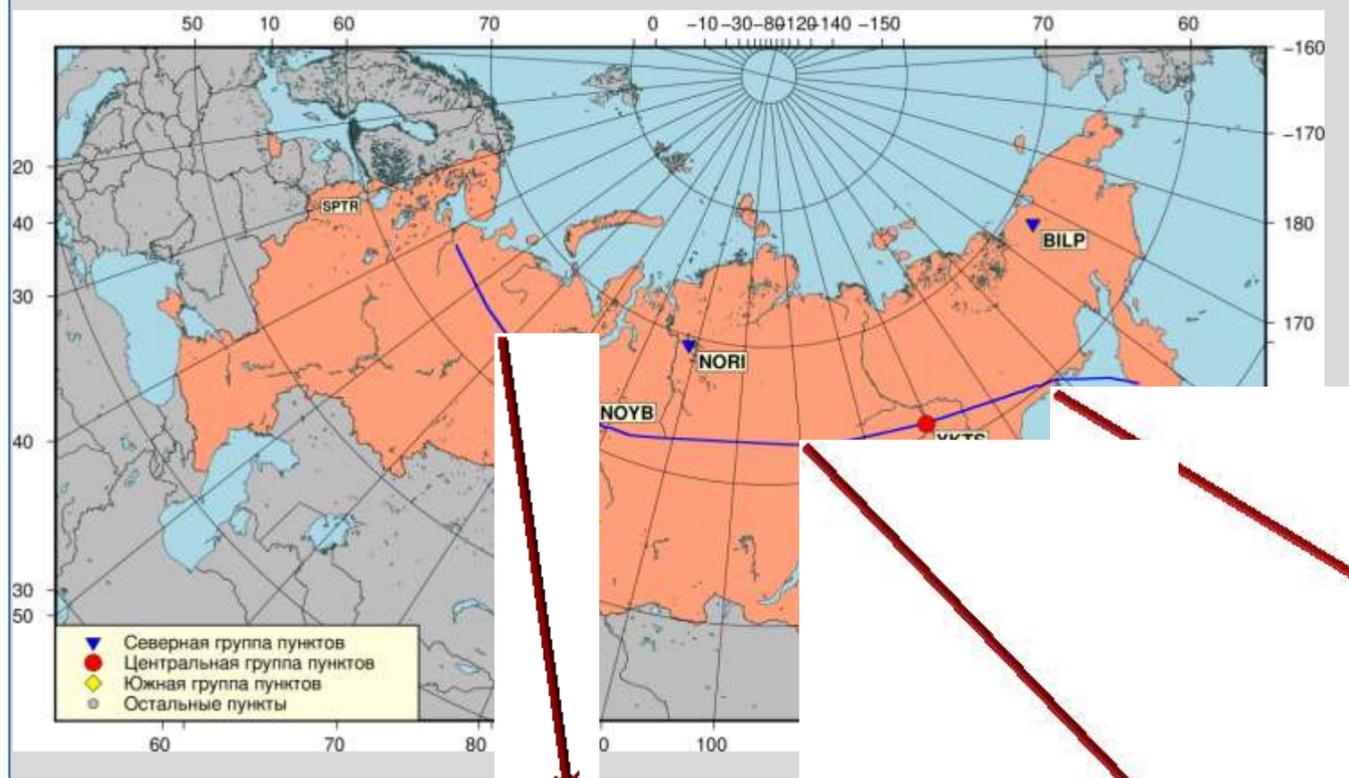
2. Сравнение дифф.режима (с временными БС и СДКМ) и PPP показали сравнимые результаты.

Открытым остается вопрос комплексирования PPP и ИНС

Важным аспектом развития данных исследований представляется разработка методов оценки контроля влияния тропосферно-ионосферных задержек при построении решения по PPP, а также анализ представительных методов оценки определения высотных координат подвижного объекта с использованием высокоточных моделей рельефа, полученных по спутниковым данным.

2018 г.: Архангельск – Петропавловск-Камчатский
Сравнение коррекции с применением технологий (1-3)*

Северная группа – Билибино (BILP) и Норильск (NORI);
Центральная группа – Якутск (YKTS) и Ноябрьск (NOYB);
Южная группа – Южно-Сахалинск (YUSA) и Новосибирск (NOVS).



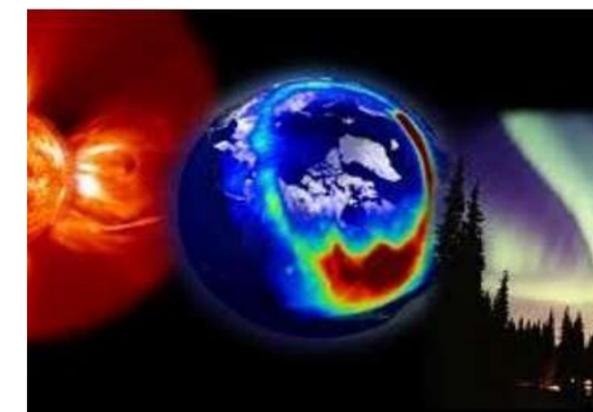
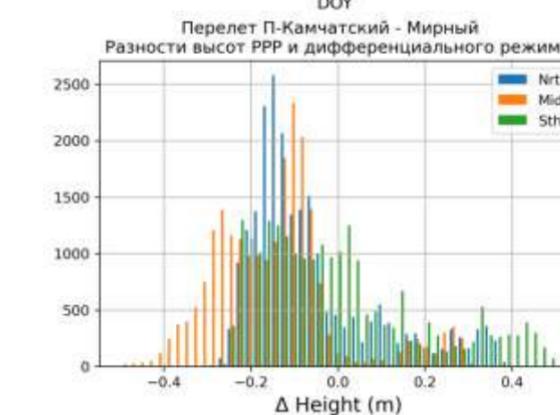
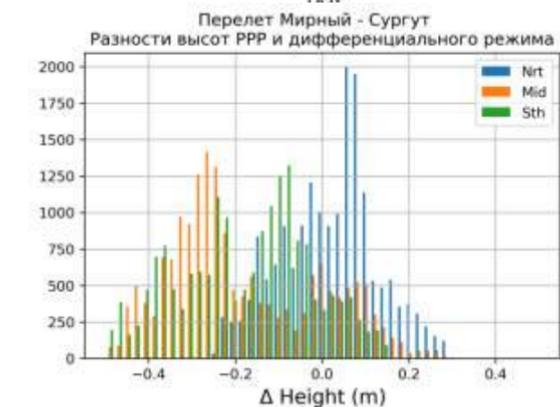
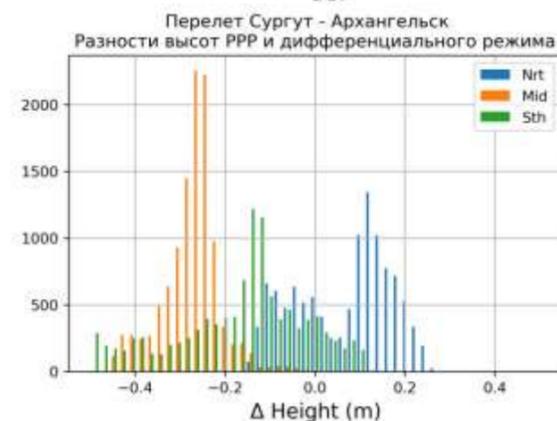
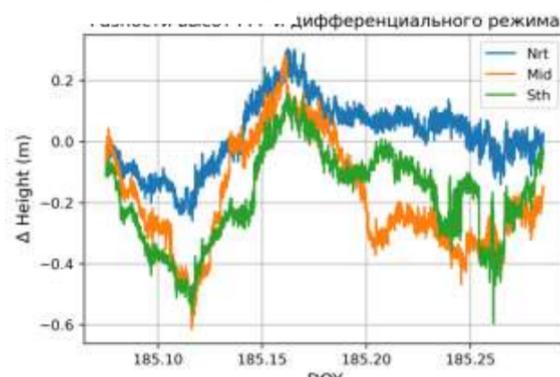
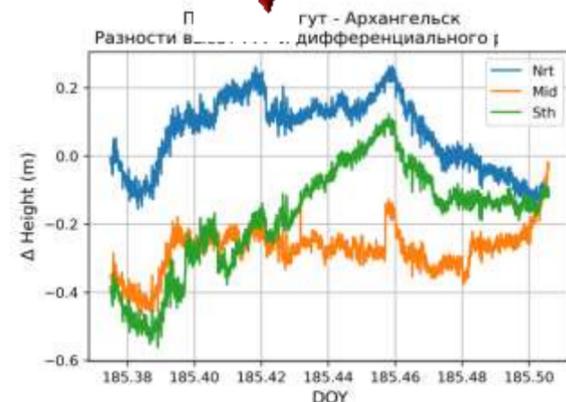
Зависимость результатов координатных определений от географического распределения наземных базовых станций

- постоянные БС СДКМ 1 Гц



- Precise Point Positioning (PPP)

По результатам анализа не было выявлено явной зависимости между географическим расположением базовых станций и точностью получаемого высотного профиля на всех трех участках перелета



Графики и гистограммы разностей значений высотных профилей на участках

Сургут – Архангельск
Мирный – Сургут
Петропавловск-Камч. – Мирный

(слева направо)

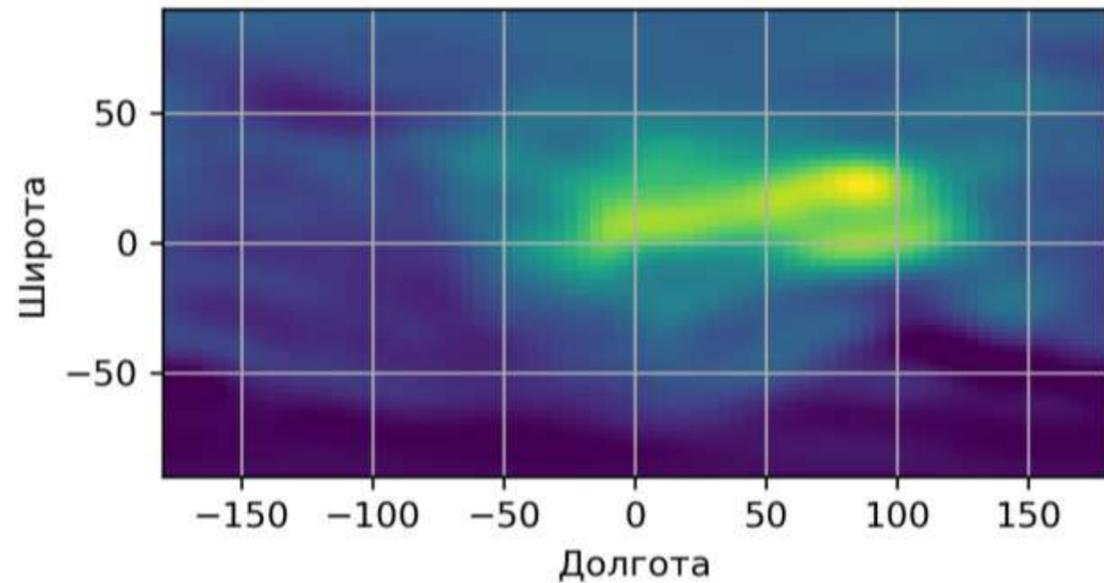
Корреляция солнечной активности

Проанализирована зависимость результатов координатных определений с состоянием ионосферы в районе полета самолета-лаборатории.

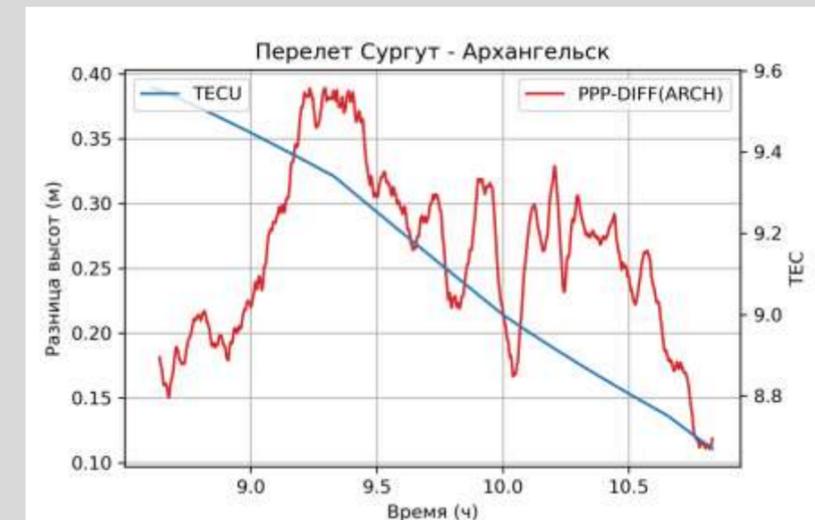
При реализации дифференциального метода координатных определений используется измерительная информация с двух приемников. **Значительное расстояние между двумя приемниками гарантированно обеспечивает различные условия наблюдения, что может отразиться в результатах координатных определений наличием систематических искажений, вызванных недоучетом влияния различных факторов. Одним из основных источников ошибок ГНСС-измерений может являться влияние возмущенной ионосферы.**

При координатных определениях с использованием абсолютного метода точного позиционирования PPP используется измерительная информация только с одного приемника, расположенного на подвижном объекте. Таким образом, состояние ионосферы оценивается именно в том месте, где находится определяемый объект.

Гипотеза: ошибки учета ионосферы имеют наибольшее влияние на точность определения вертикальной компоненты, то для дальнейшего анализа использовались результаты определения высоты по данным ГНСС-измерений.



Карта, построенная по данным глобальной модели ионосферы на момент времени 3027/07/03 11:00



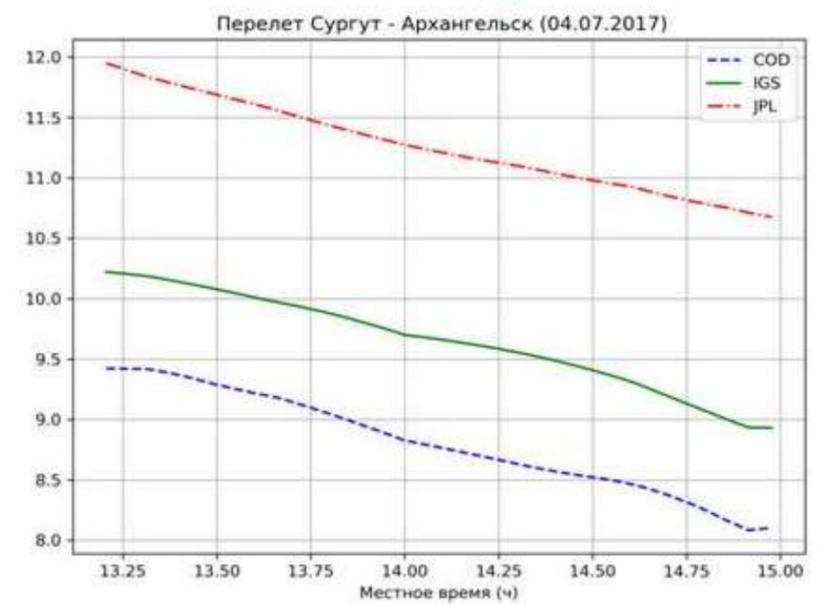
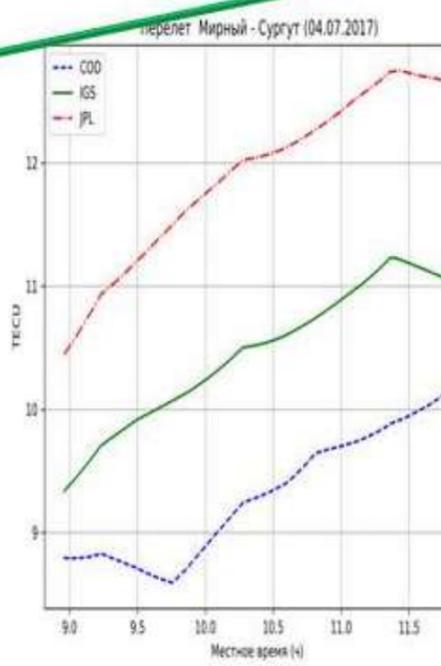
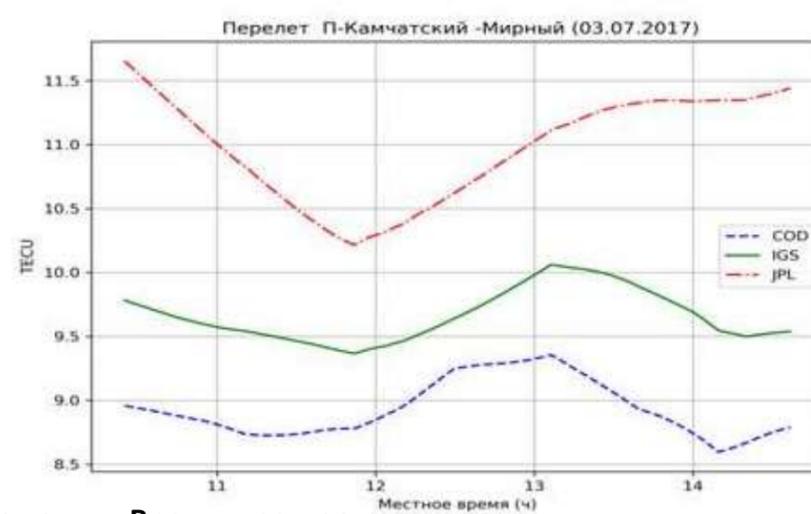
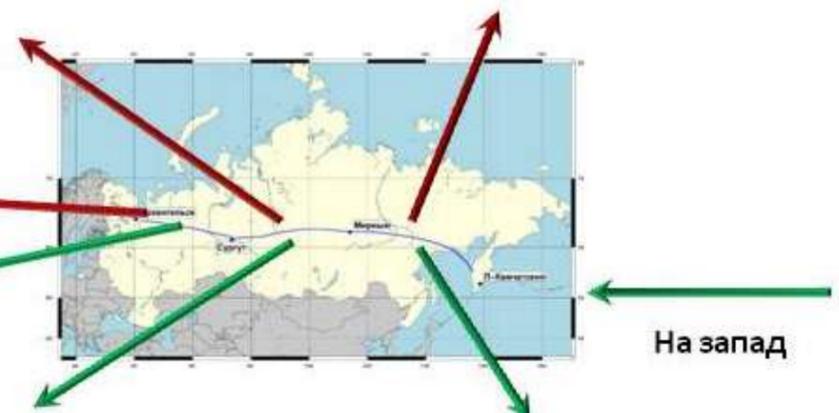
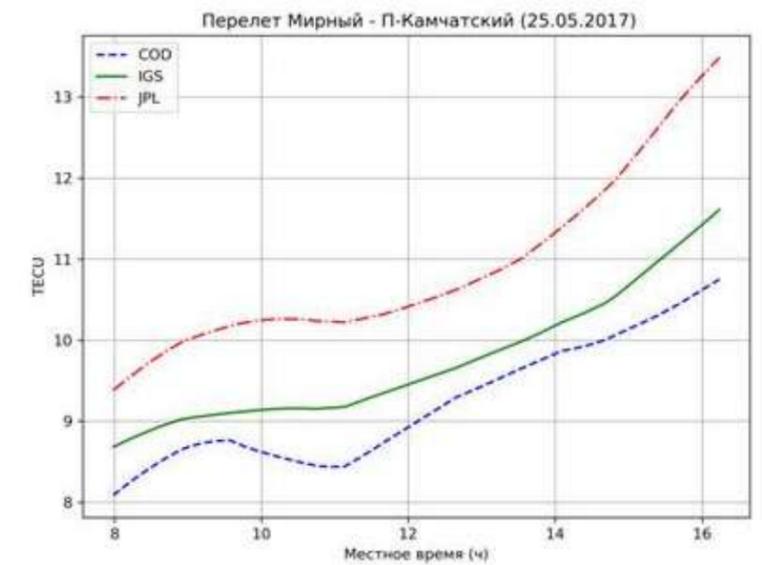
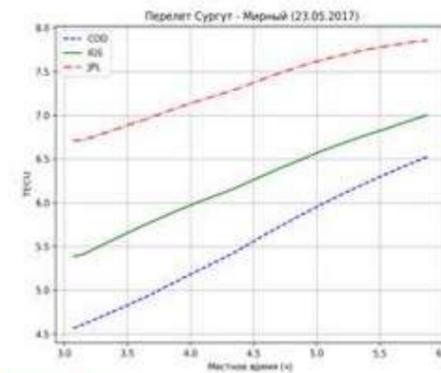
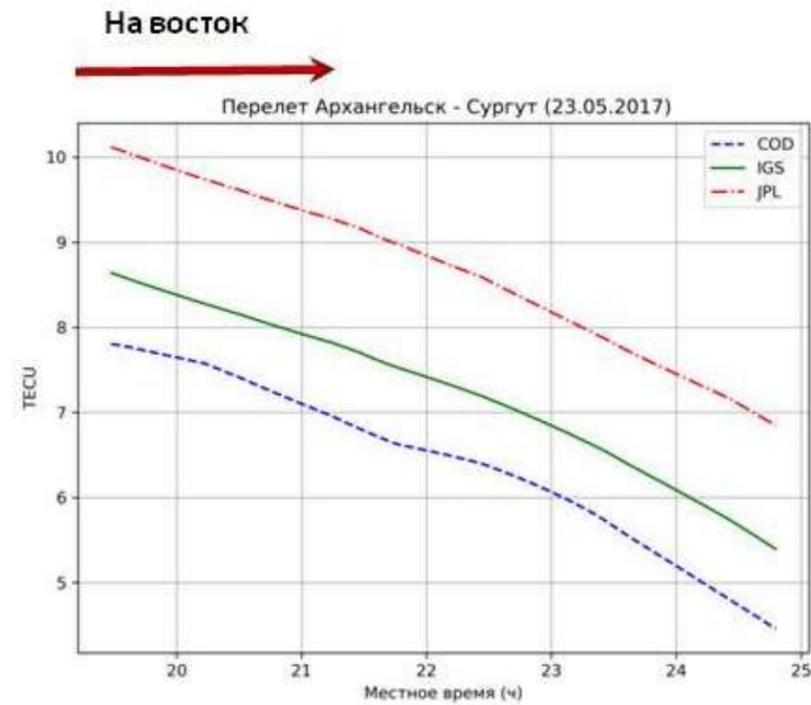
Сравнение разницы определения высот самолета-лаборатории, определенных в дифференциальном режиме относительно временной базовой станции ARCH (Архангельск) и в режиме абсолютного позиционирования PPP с оценкой состояния ионосферы

- Положительная корреляция в значениях разностей высот и состояния ионосферы.
- При приближении к финальной точке маршрута в г. Архангельск разности высот имеют тенденцию к уменьшению.

Сравнивались разности высот, полученных с использованием технологии PPP и дифференциального метода (базовая станция в г. Архангельск). Оценка состояния ионосферы проводилась непосредственно для точек местоположения подвижного объекта. **Имеется положительная корреляция между значениями разностей высот самолета-лаборатории, полученными с использованием двух методов и динамикой изменения состояния ионосферы.**

Результаты: Уровень возмущенности ионосферы по данным глобальной модели ионосферы IONEX для перелетов по маршруту Архангельск - Петропавловск-Камчатский и в обратном направлении

2017 г.: Мирный –Сургут
Сравнение возмущенности ионосферы в режиме PPP по модели IONEX



По оси времени – Время местное

(2) Протяженные профили с использованием автомобиля - Применение PPP

Экспедиционные маршруты:

2017 Севастополь – Москва – Архангельск: ≈ 3080 км

2019 Москва – Беломорск: ≈ 1300 км

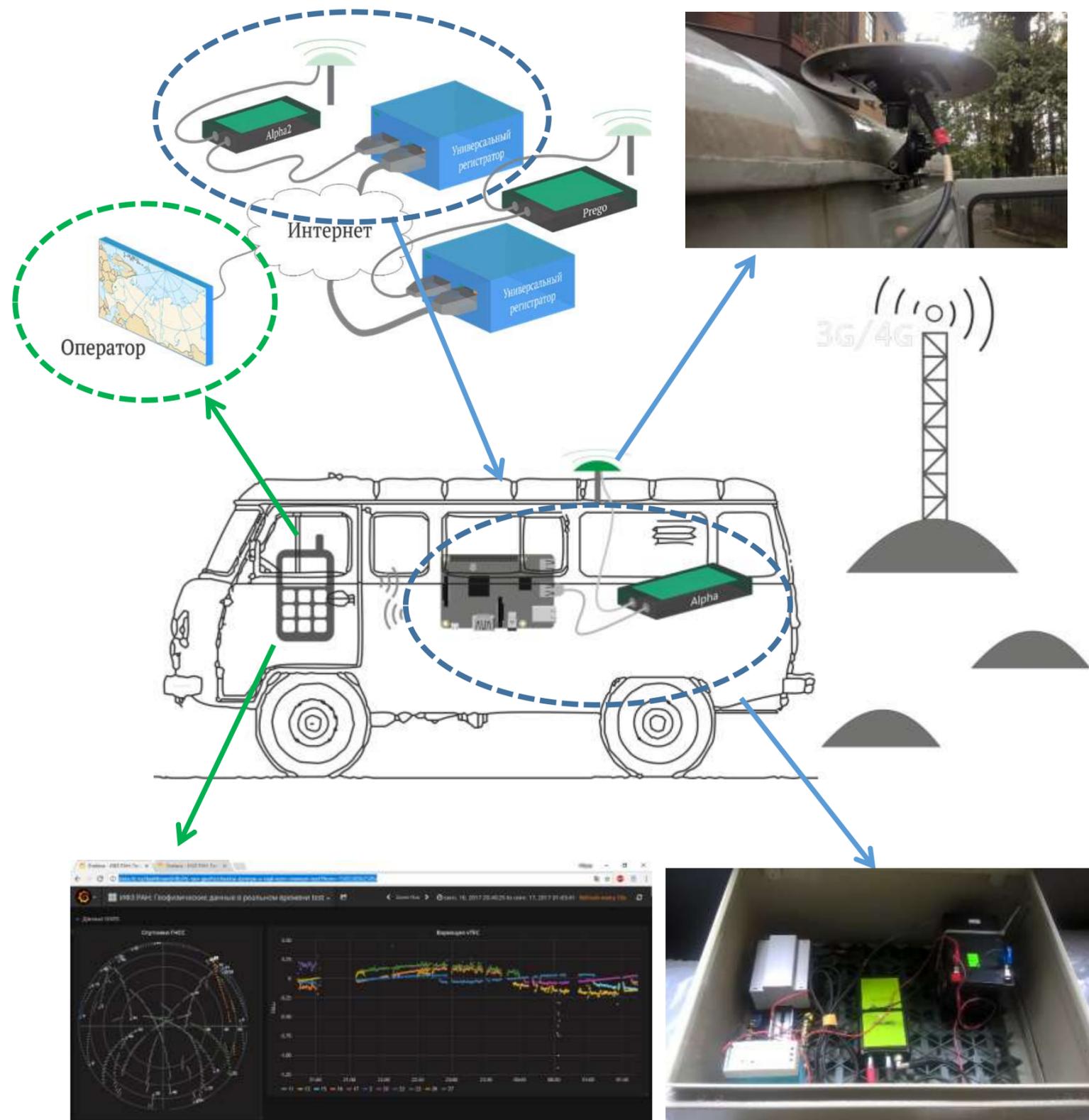
2020, 2023 Москва – Мурманск: ≈ 1950 км

2021 Москва – Кандалакша: ≈ 1750 км

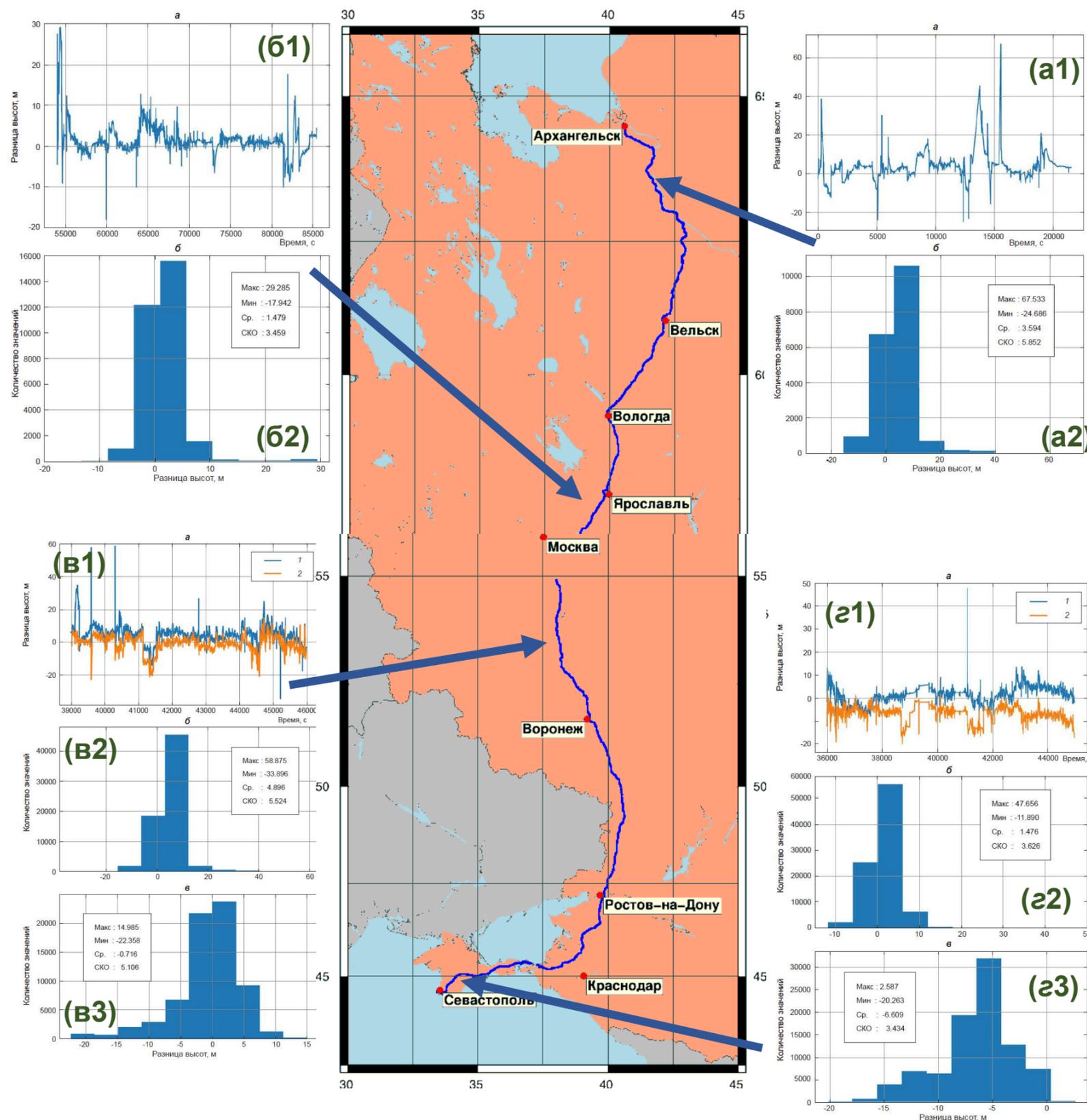
•Для контроля возможных грубых ошибок ГНСС определений, таких как потеря счета циклов фазы, резкое снижение количества видимых спутников и других факторов, обусловленных движением в различных топографических условиях, на части маршрута использовалась глобальная модель рельефа SRTM Digital Elevation Database v4.1.

•Сравнение с дифференциальным режимом обеспечивалось путем выполнения коррекции навигационных решений подвижного приемника (ровера) по данным базовых станций, расположенных в Москве.

•Опробована возможность управления и «real-time» - контроля регистрирующего оборудования через Интернет-сети мобильных операторов связи.

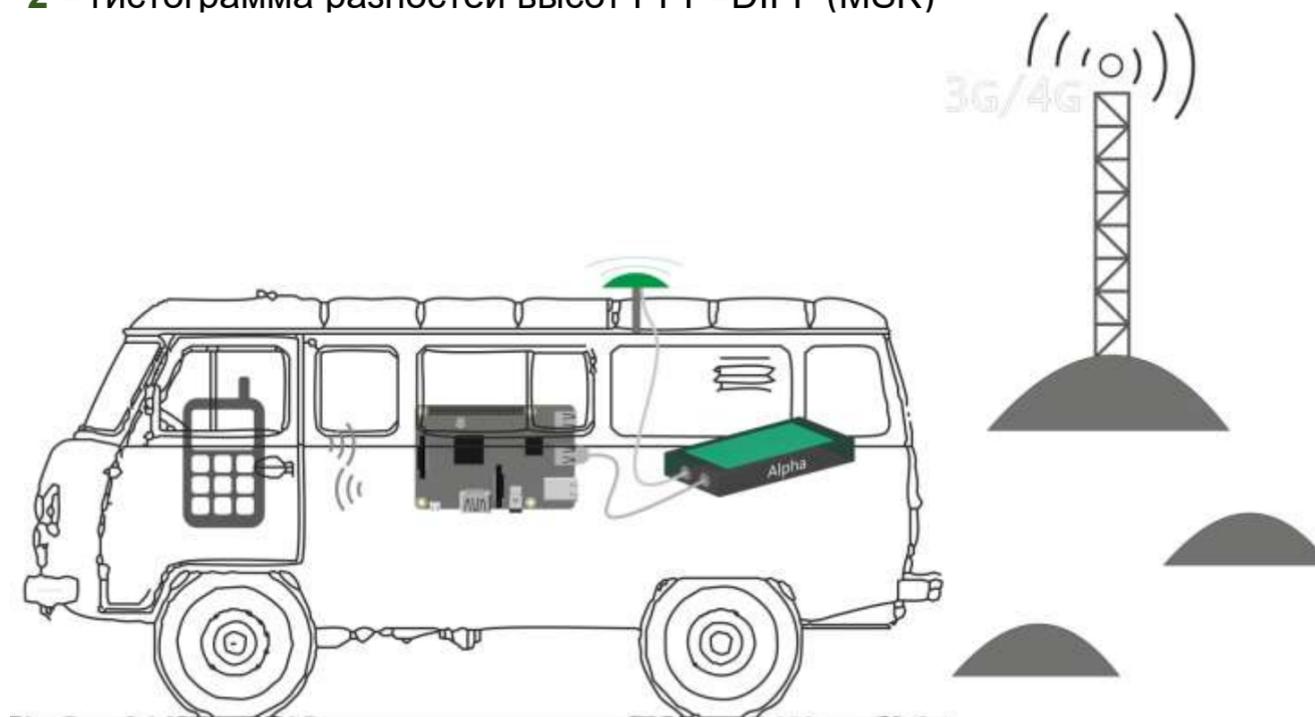


Применение PPP – протяженные профили с использованием автомобиля



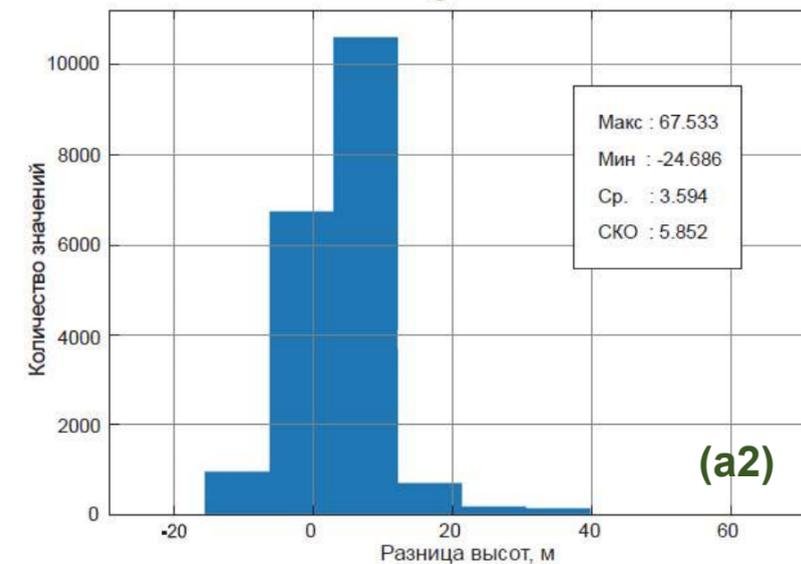
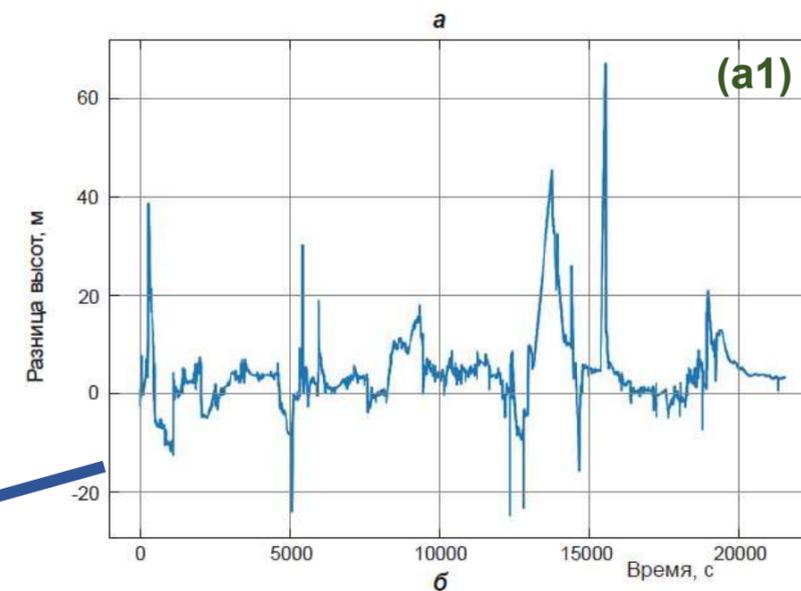
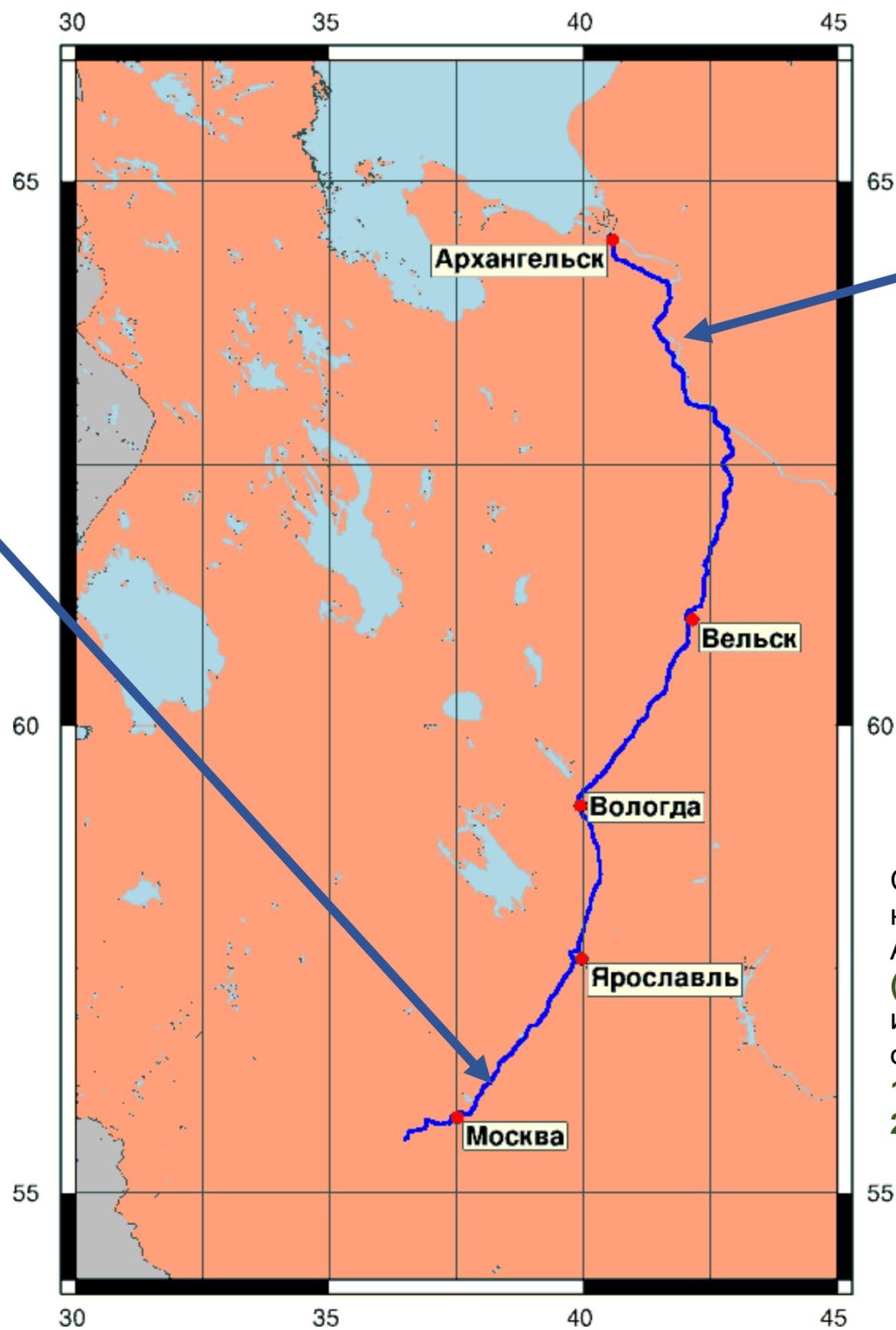
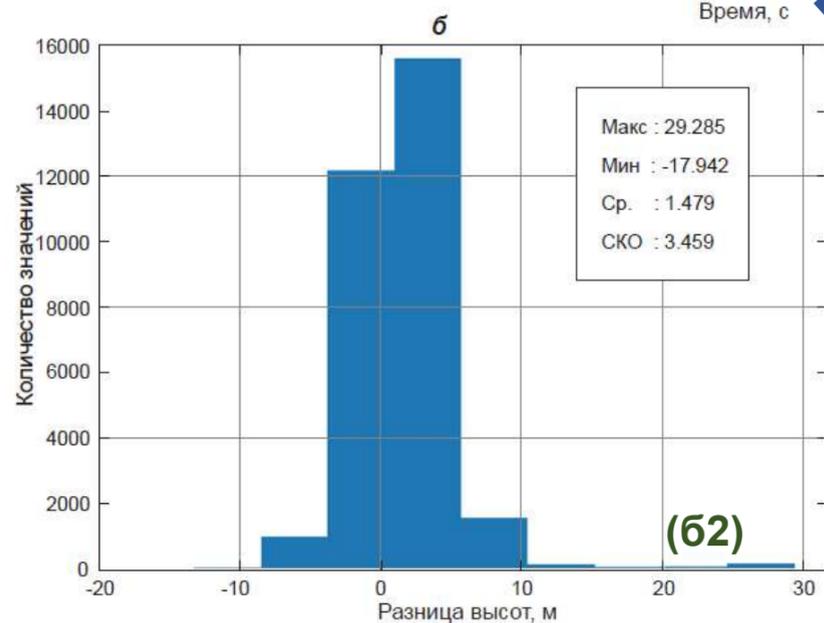
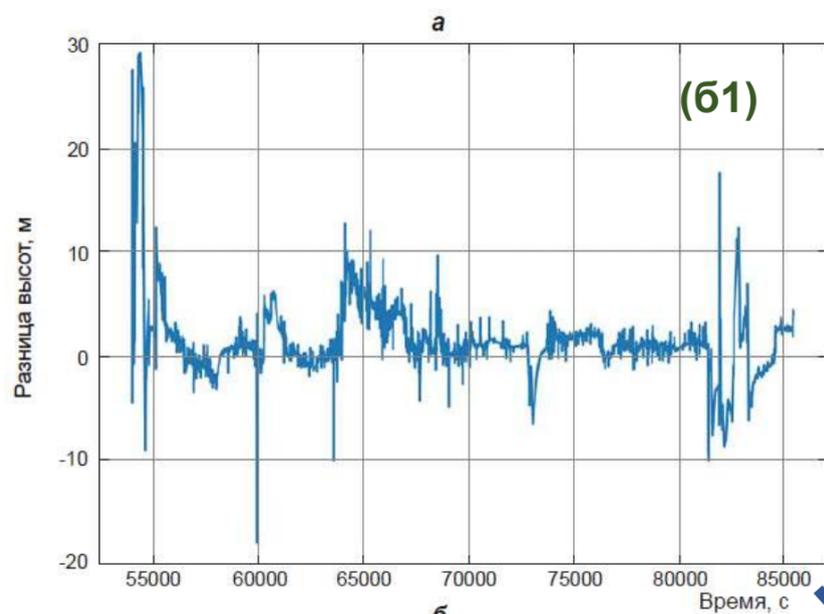
Сравнение значений вертикальных профилей на участке маршрута “Москва–Архангельск” вблизи Архангельска (а) и Москвы (б), полученных по данным ГНСС-измерений с использованием относительного метода (DIFF) и метода PPP:

- 1 – разность PPP–DIFF (MSK);
- 2 – гистограмма разностей высот PPP–DIFF (MSK)



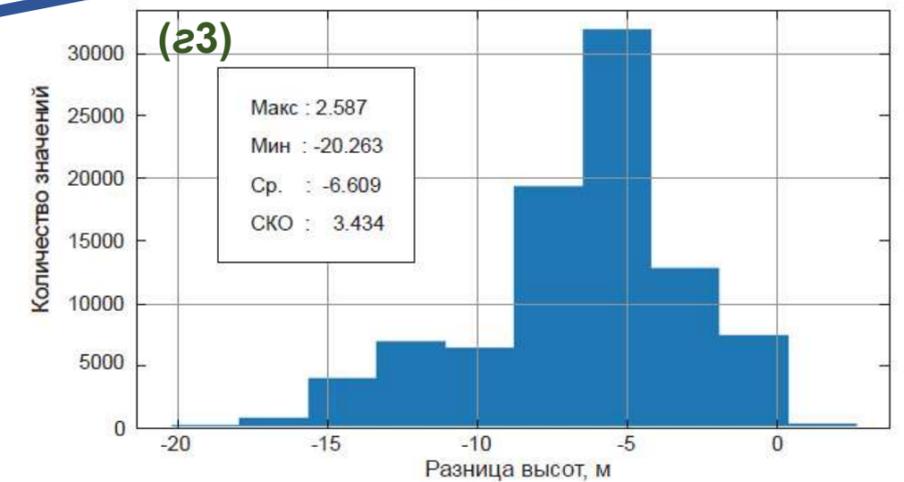
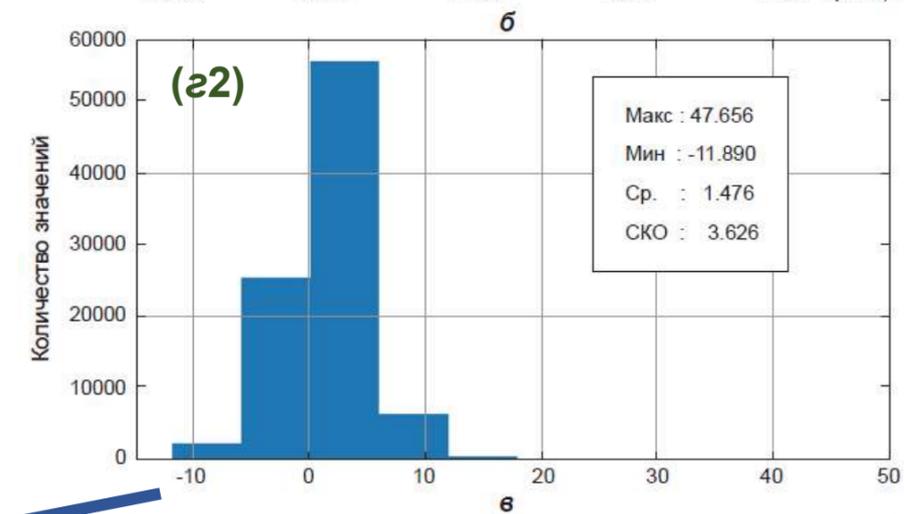
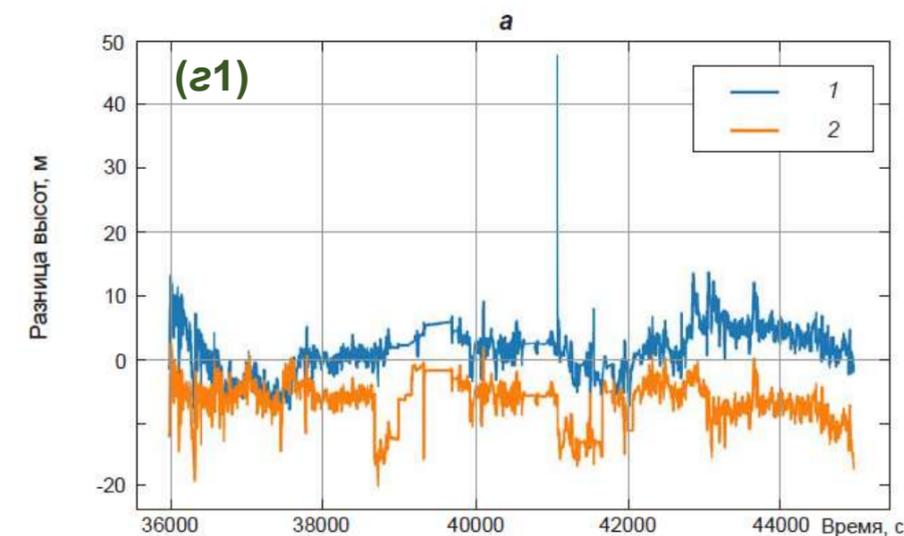
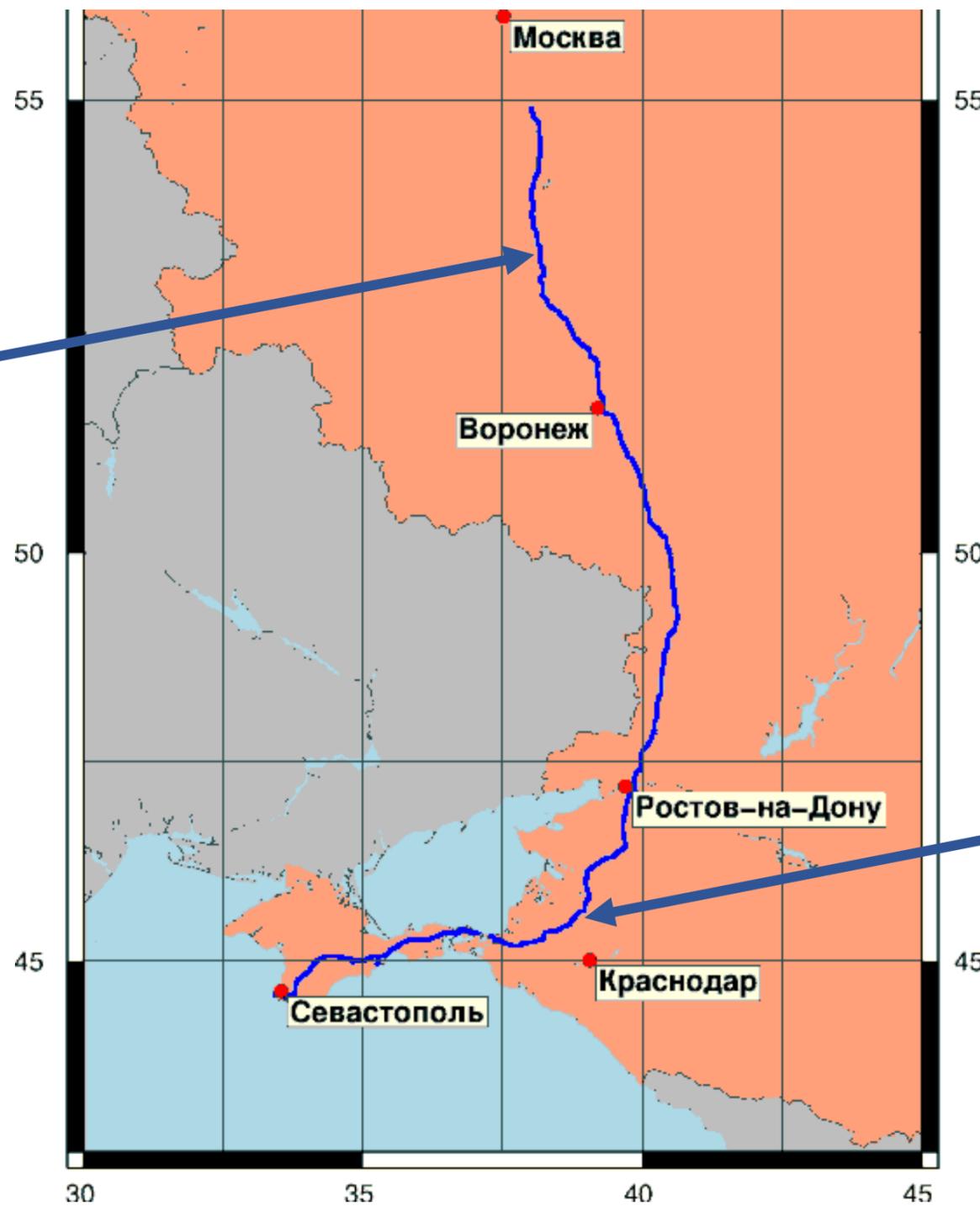
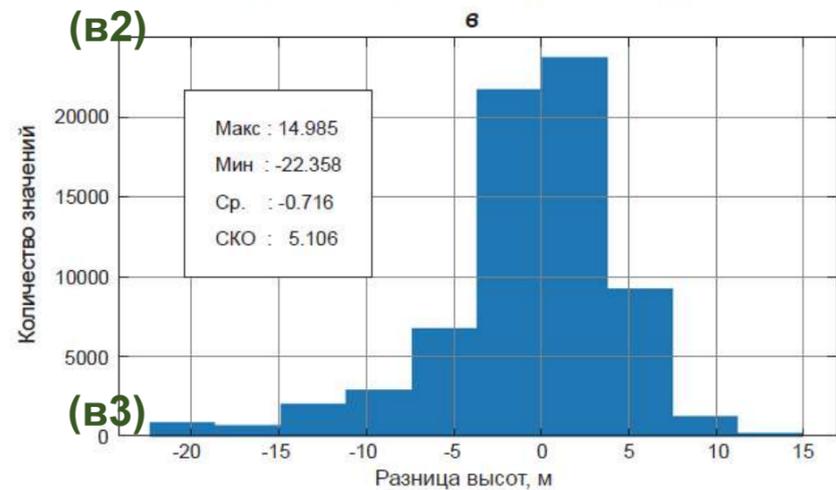
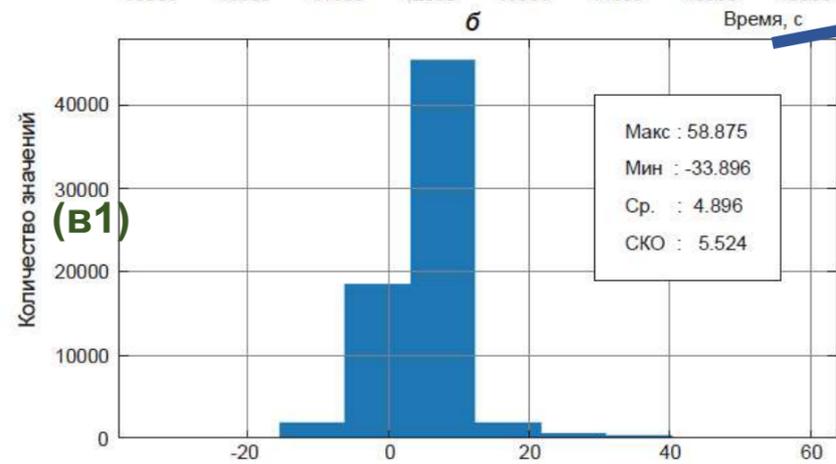
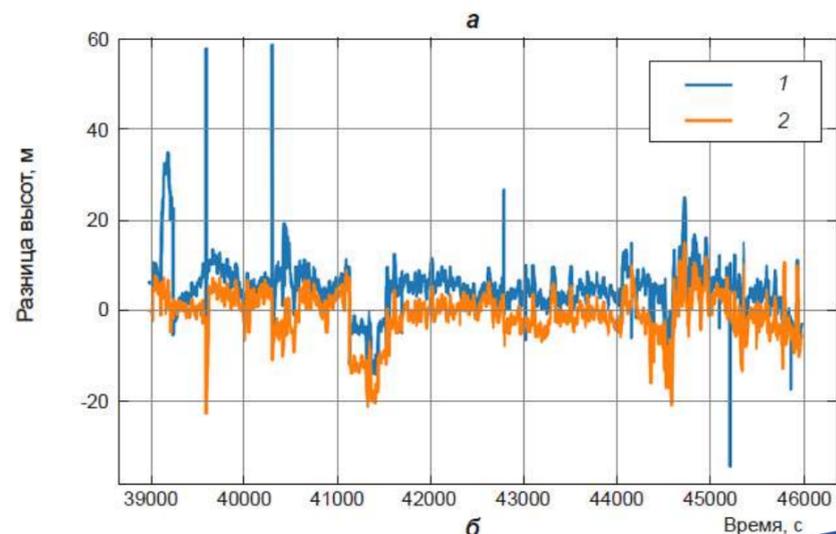
Разности значений вертикальных профилей на участке маршрута “Москва–Севастополь” вблизи Москвы (в) и вблизи Севастополя (з), полученных по данным ГНСС-измерений с использованием относительного метода (DIFF) и метода PPP, и тех же значений по глобальной модели рельефа(TOPO):

- 1 – разности высот: 1 – PPP–TOPO; 2 – DIFF–TOPO;
- 2 – гистограмма разностей PPP–TOPO;
- 3 – гистограмма разностей DIFF–TOPO



Сравнение значений вертикальных профилей на участке маршрута “Москва–Архангельск” вблизи Архангельска **(а)** и Москвы **(б)**, полученных по данным ГНСС-измерений с использованием относительного метода (DIFF) и метода PPP:

- 1** – разность PPP–DIFF (MSK);
- 2** – гистограмма разностей высот PPP–DIFF (MSK)



Разности значений вертикальных профилей на участке маршрута “Москва–Севастополь” вблизи Москвы (B) и вблизи Севастополя (B), полученных по данным ГНСС-измерений с использованием относительного метода (DIFF) и метода PPP, и тех же значений по глобальной модели рельефа(TOPO):

- 1 – разности высот: 1 – PPP–ТОРО; 2 – DIFF–ТОРО;
- 2 – гистограмма разностей PPP–ТОРО;
- 3 – гистограмма разностей DIFF–ТОРО

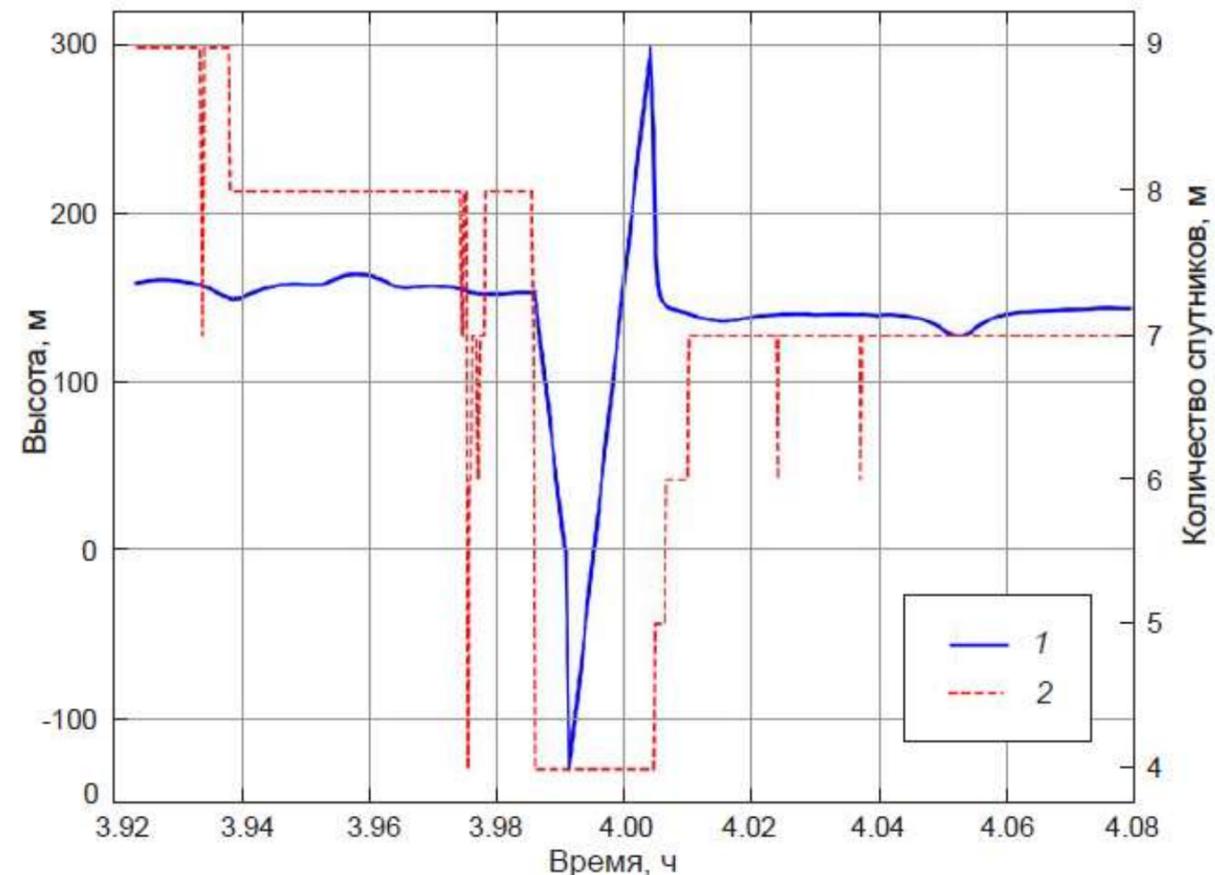
Применение PPP – протяженные профили с использованием автомобиля



Анализ высотных профилей по маршруту движения автомобиля, полученных с использованием данных ГНСС и на основе моделей рельефа, показал, что в разностях высот присутствуют составляющие с различными спектральными характеристиками.

Выявлен ряд характерных отклонений в результатах вычислений нескольких навигационных решений и определены зависимости ухудшения точности координатных определений в условиях срывов фазовых наблюдений, а также потери наблюдаемых спутников

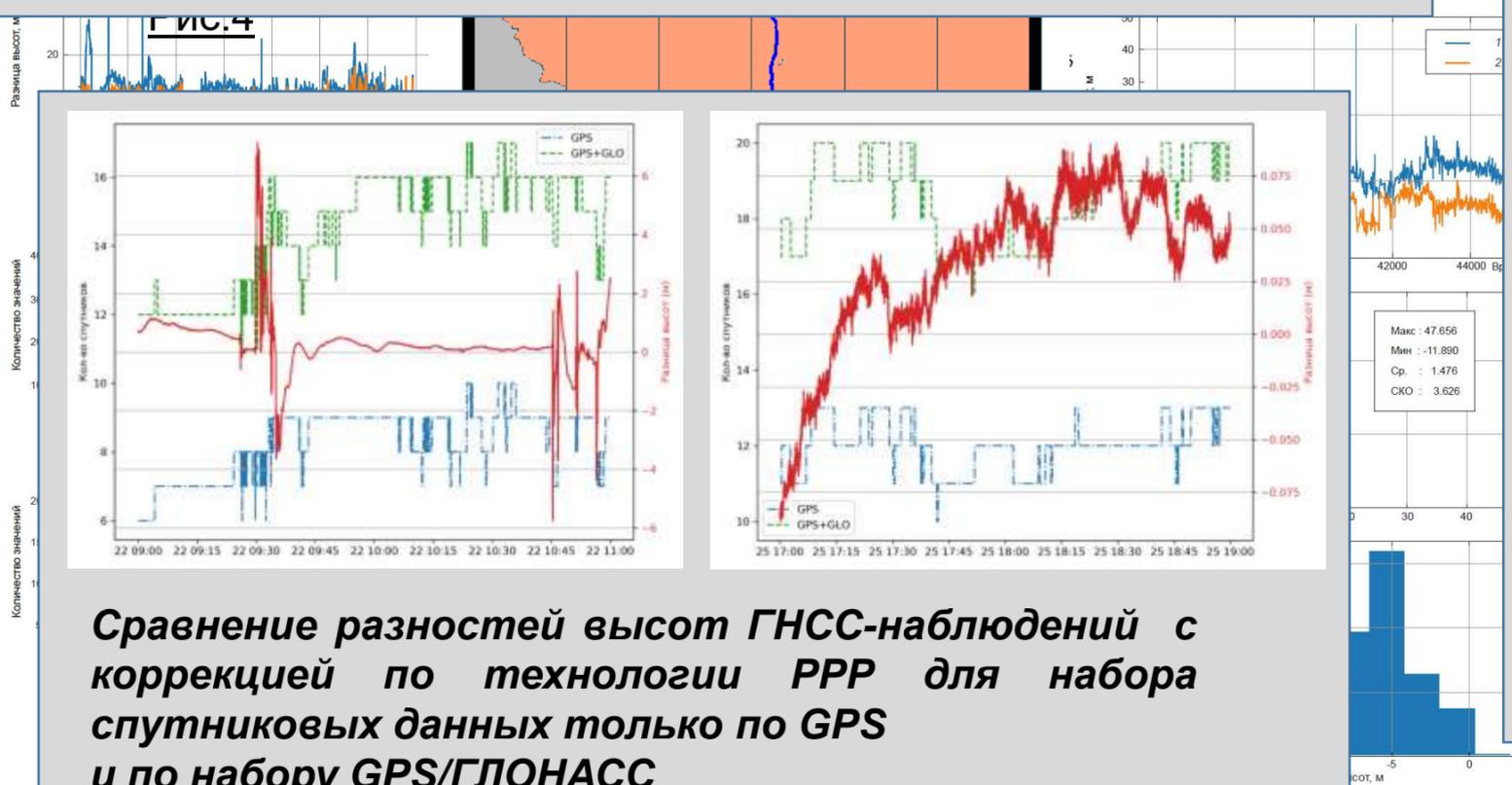
Сравнение значений вертикальных профилей на участке маршрута “Москва–Архангельск” вблизи Архангельска (б) и Москвы (а), полученных по данным ГНСС-измерений с использованием



Связь между наличием грубых ошибок при определении высоты и количеством спутников рабочего созвездия:

- 1 – ошибка определения высоты;
- 2 – количество спутников

Сравнение разностей высот ГНСС-наблюдений с коррекцией по технологии PPP для набора спутниковых данных только по GPS и по набору GPS/ГЛОНАСС



Влияние ионосферы

На примере GPS-измерений, полученных на автомобиле-лаборатории по маршруту Архангельск-Москва, были проанализированы различные методы учета влияния ионосферы на результаты координатных определений. Исследовались результаты трех вариантов координатных определений:

- 1) в стандартном режиме позиционирования;
- 2) в стандартном режиме позиционирования с учетом ионосферы при помощи данных IONEX;
- 3) в режиме высокоточного позиционирования PPP.

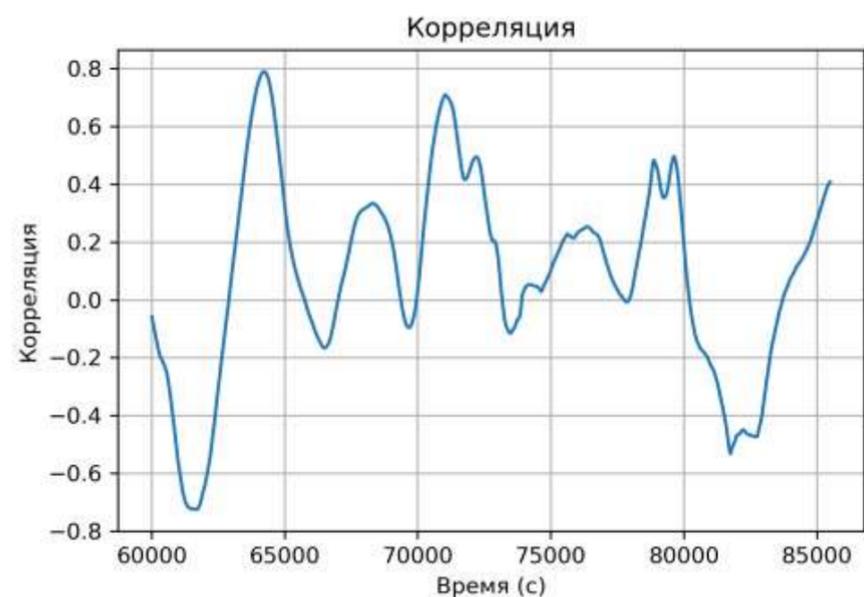
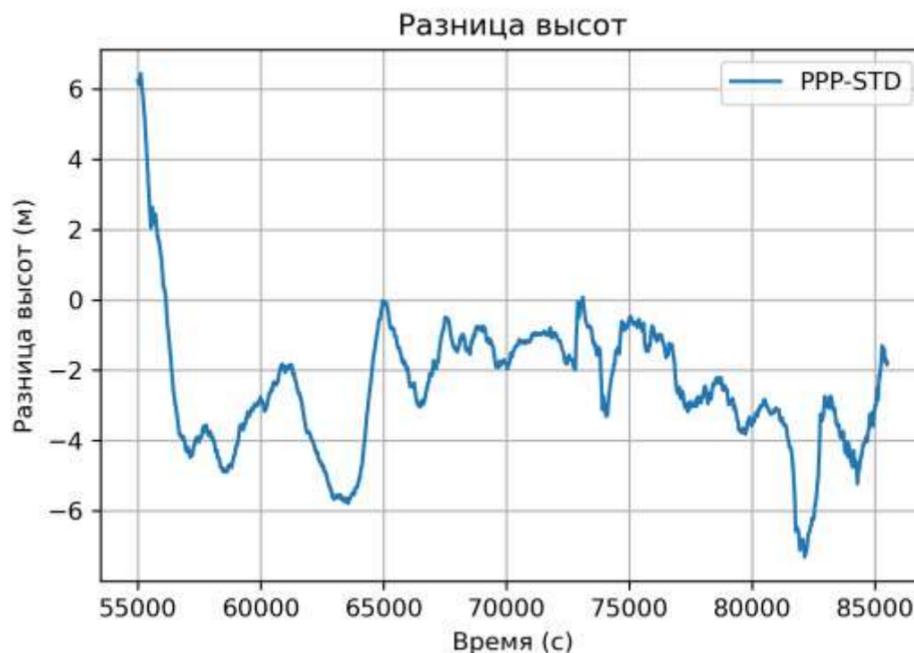
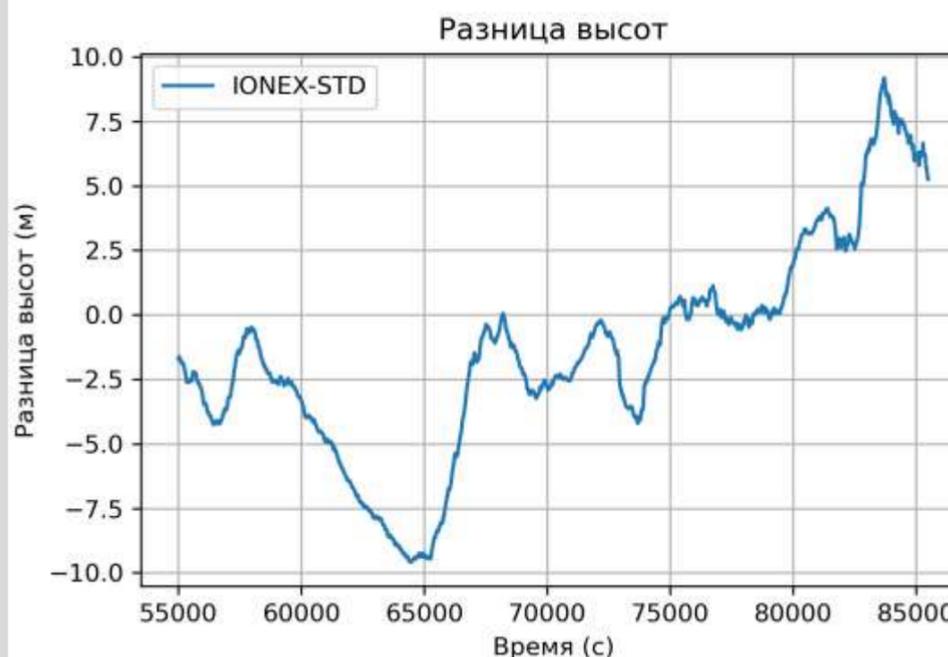


График корреляции рядов разницы значений высот, полученных с использованием различных методов учета влияния ионосферы.



Разница значений высот по методу абсолютного позиционирования PPP и стандартному методу позиционирования на участке «Архангельск – Москва».



Разница значений высот, полученная с использованием метода стандартного метода с учетом влияния ионосферы по данным IONEX и стандартного метода позиционирования на участке маршрута Архангельск – Москва.

Разница значений высот, полученных с использованием PPP и стандартного режима, кроме короткопериодических вариаций содержит систематическую составляющую, которая оставалась постоянной на протяжении всего промежутка измерений (верхний, справа).

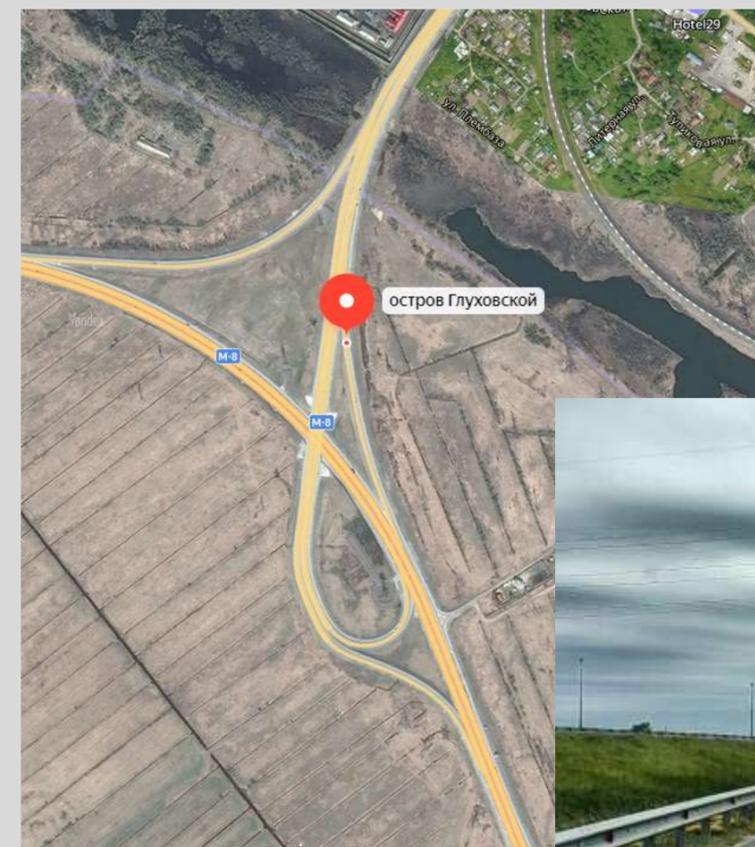
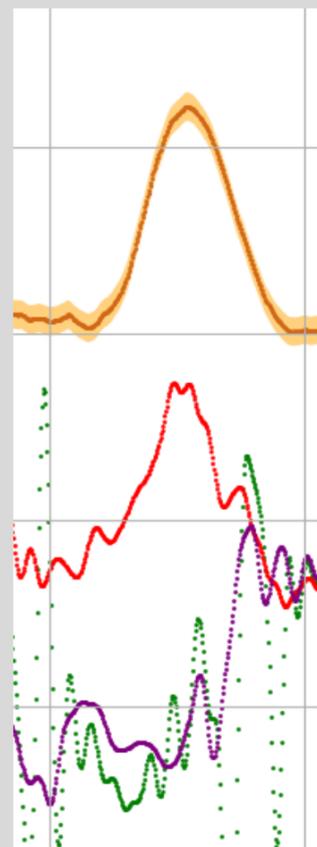
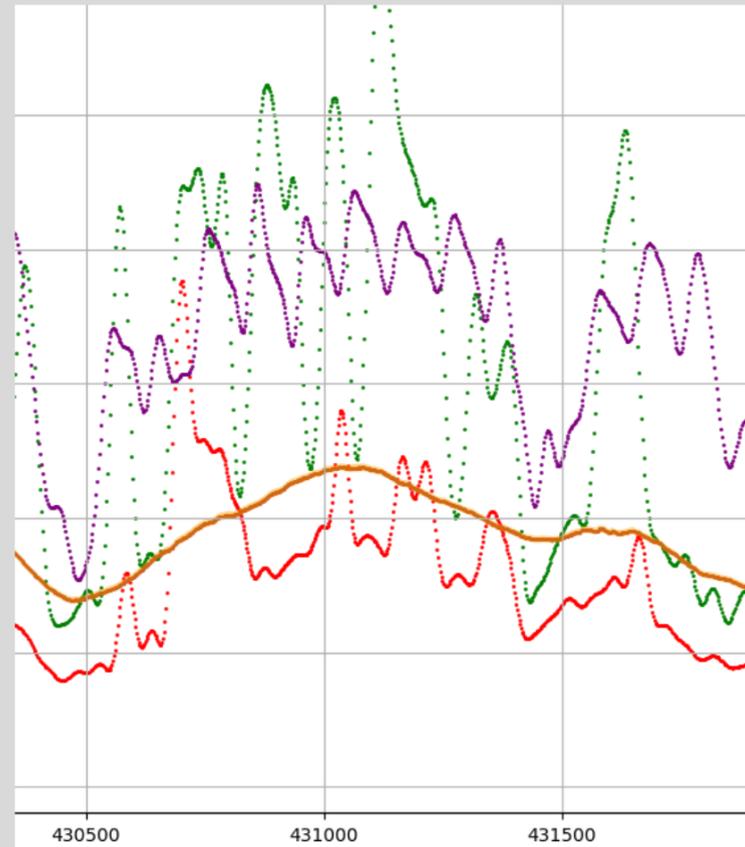
Анализ разницы значений высот, полученных с использованием стандартного режима совместно с данными IONEX и стандартного режима в отдельности, показал, что кроме короткопериодических вариаций данные содержат длиннопериодическую составляющую (нижний, справа)

Сравнение с ЦМР

Выполнено сравнение значений высот, полученных при измерениях на автомобиле, и цифровых моделей рельефа ArcticDEM двух версий (v.3 и v.4) и Copernicus в каждой координате проезда.

Значения высот на графиках:

оранжевый – ГНСС,
красный – ArcticDEM v4,
зелёный - ArcticDEM v3,
фиолетовый – Copernicus.



Пик на графике отмечен точкой на карте. Внизу справа – вид на данную координату



(3) Измерения на борту ледокола по маршруту Северного морского пути

В 2020 году регистрирующее оборудование было размещено на ледоколе «Илья Муромец», который совершил переход по трассе Северного Морского пути в рамках комплексной экспедиции РГО и Северного флота на арктические архипелаги.

Задачи исследования:

- сравнительный анализ качества различных навигационных решений,
- оценка глобальных моделей геоида в Арктике
- разработка алгоритмов для математической обработки больших массивов инструментальных профильных данных.

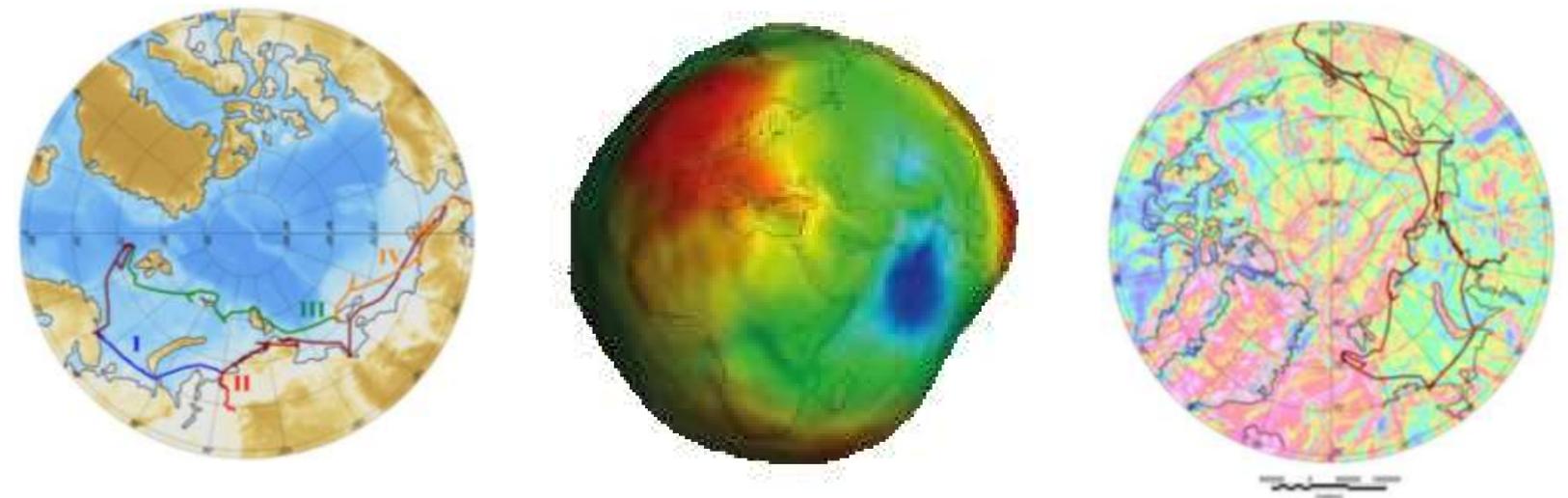


На 4 участках маршрута общей протяженностью более 20 000 км, включающих движение и стоянки ледокола, для точек с известными координатами и высотами и соответствующих им аномалий силы тяжести, полученных с использованием глобальной модели **EGM2008**, были выполнены F-аппроксимация и спектральный анализ

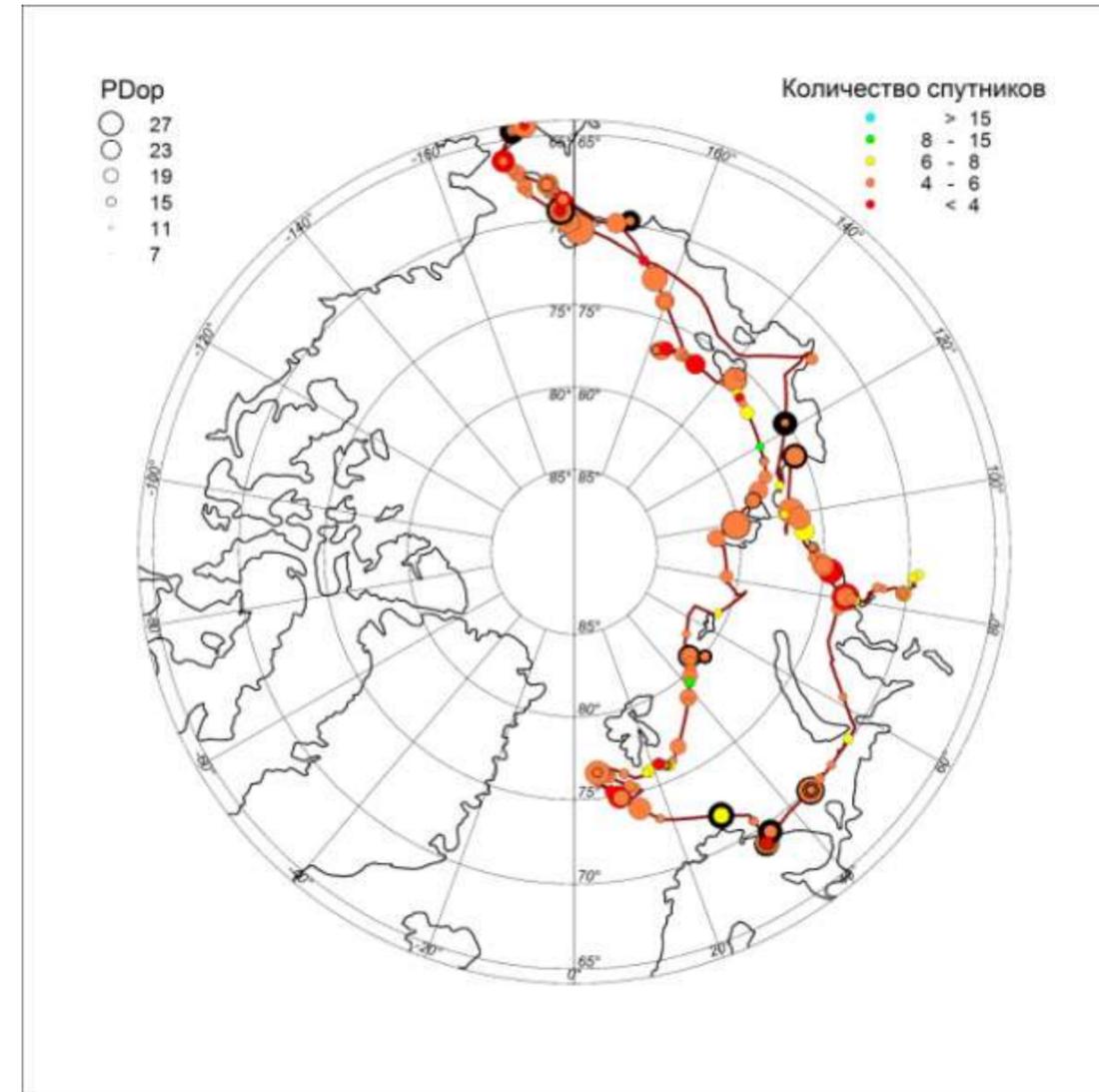
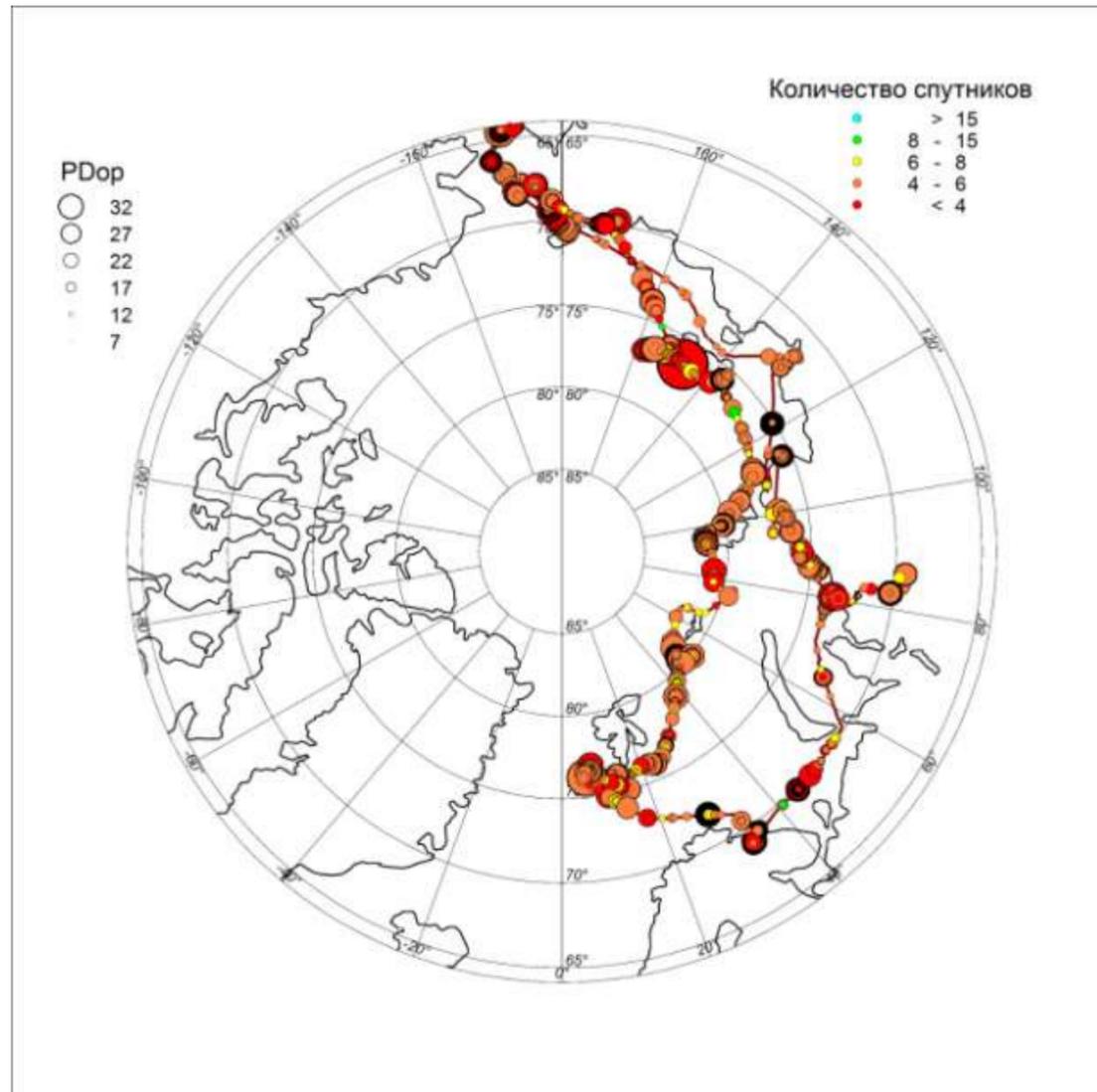
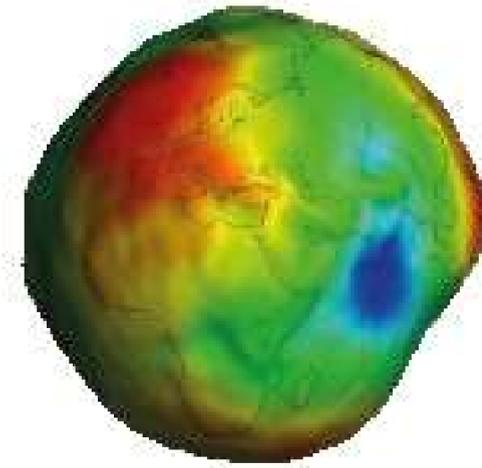
Геодезические высоты из спутниковых определений сначала были получены в стандартном режиме (**SPP**) в момент выполнения измерений. Затем, после получения уточненной эфемеридно-временной информации координаты и высоты были определены с использованием технологии **PPP**. Для аппроксимаций использовались оба типа данных: первичные и уточненные геодезические высоты.



Монтаж системы автоматической регистрации данных ГНСС высокой частоты дискретизации



Непрерывная регистрация высоты ледокола вдоль Северного Морского пути при помощи ГНСС



PDop и количество спутников в рабочем созвездии

Слева: данные с частотой регистрации 1 с (1 Гц)

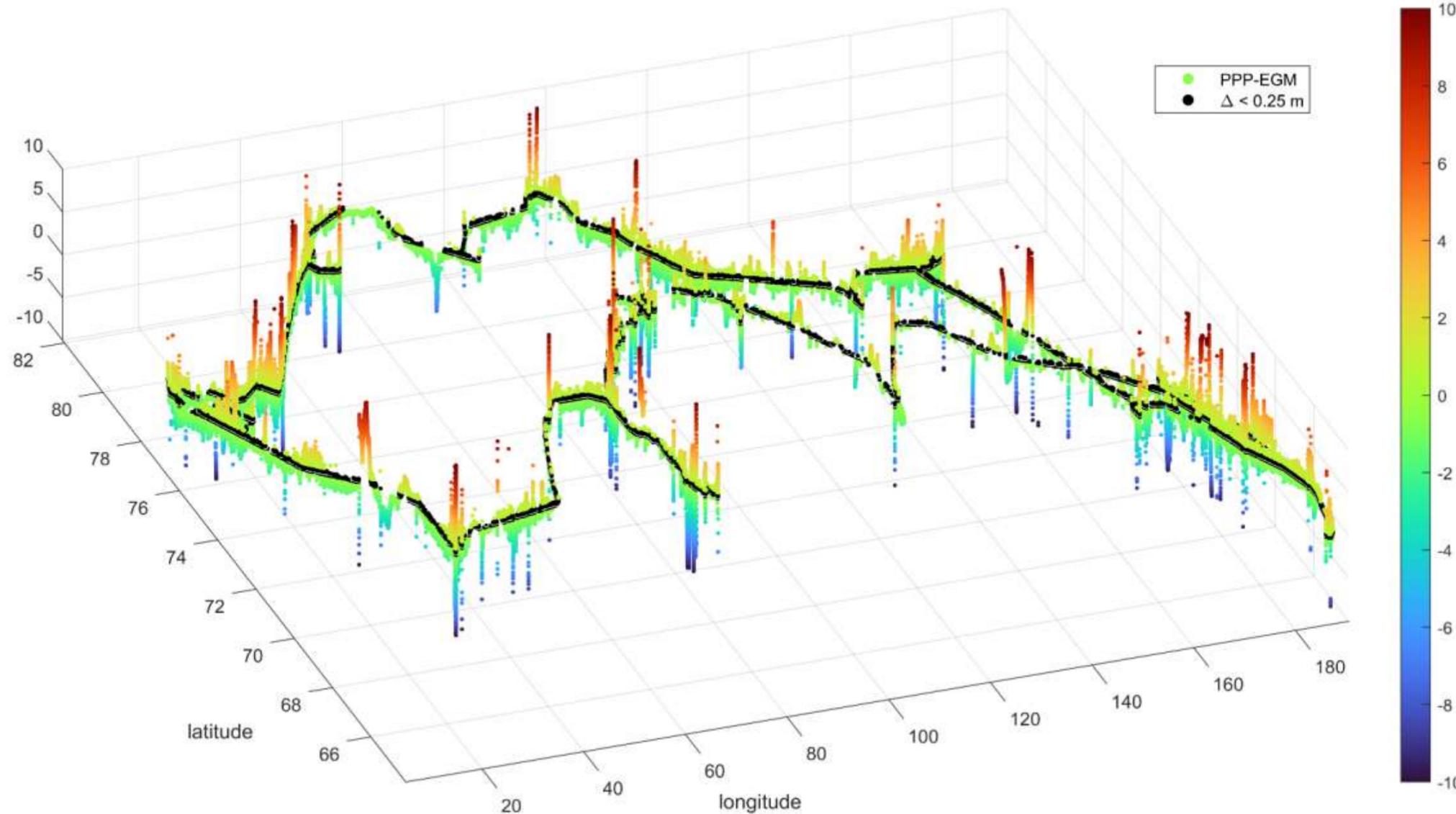
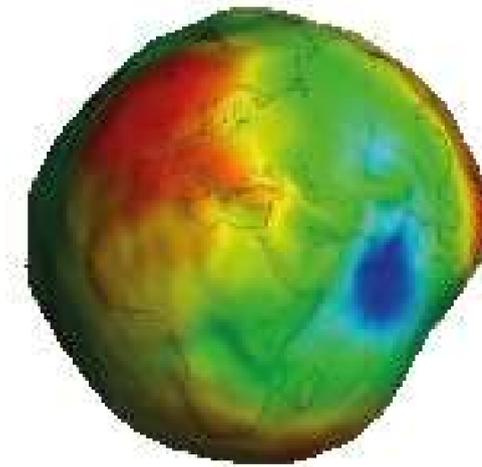
Справа: данные, прореженные до дискретности 100 с.

Качество данных:

PDop > 4 : 6,5 %

PDop > 7 : 0,6 % (~ 43000 точек)

Непрерывная регистрация высоты ледокола вдоль Северного Морского пути при помощи ГНСС



Разница между измеренной высотой PPP и моделью геоида EGM2008 вдоль всего трека ледокола (цветом разница в метрах).

В рамках натуральных измерений с борта ледокола был получен набор экспериментальных данных, содержащий значения моментов времени, а также плановые координаты и геодезическую высоту (над эллипсоидом WGS84) на протяжении всего маршрута экспедиции с периодом дискретизации 100 с.

На рисунке представлена разница между геодезической высотой, рассчитанной по технологии PPP и моделью высот геоида EGM2008, причем черным цветом отмечены отсчеты в которых модель и данные совпадают лучше чем 25 см. Области в которых отсутствуют данные измерений отображены белым цветом. В целом отметим качественное совпадение данных измерений высоты и модели геоида.

Качество данных:

PPP-EGM < ±25 см : 33,3 %
PPP-EGM < ±50 см : 56,4 %

PPP-EGM < ± 3 м : 97,3 %
PPP-EGM < ±10 м : 99,3 %

Севморпуть: шум GPS с увеличением широты

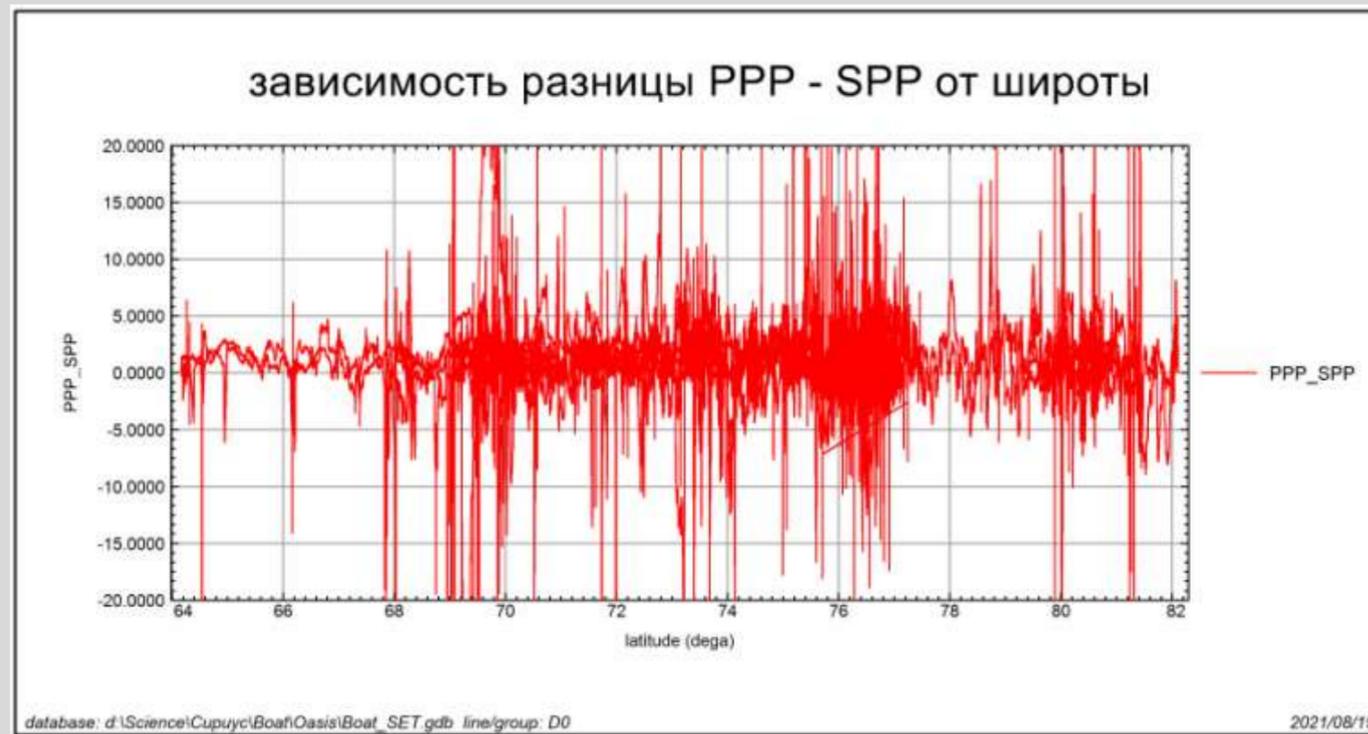
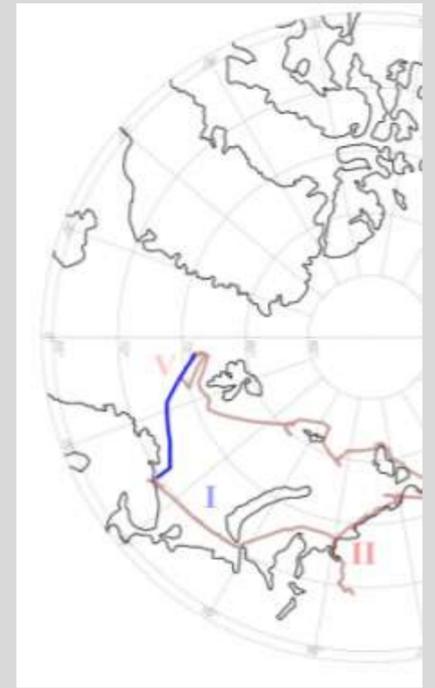
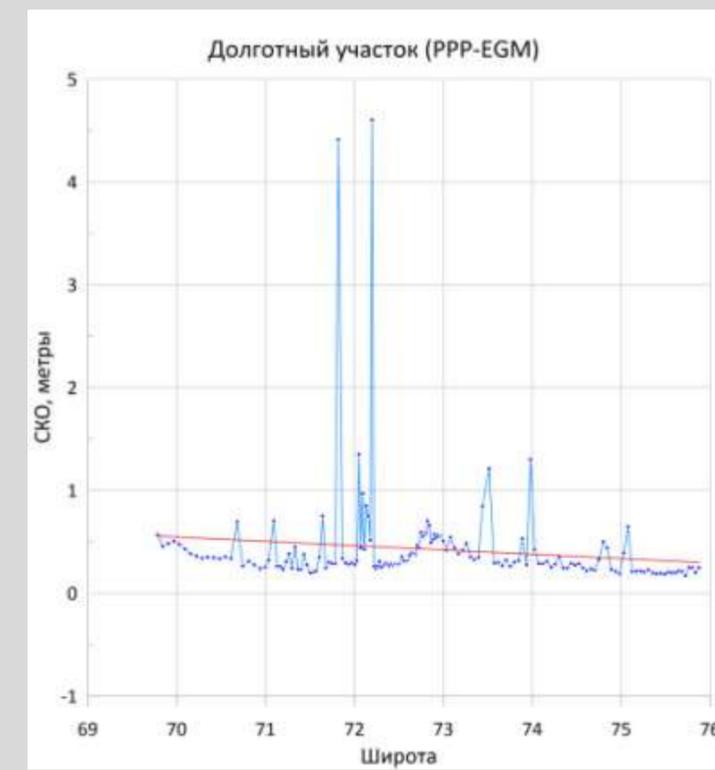
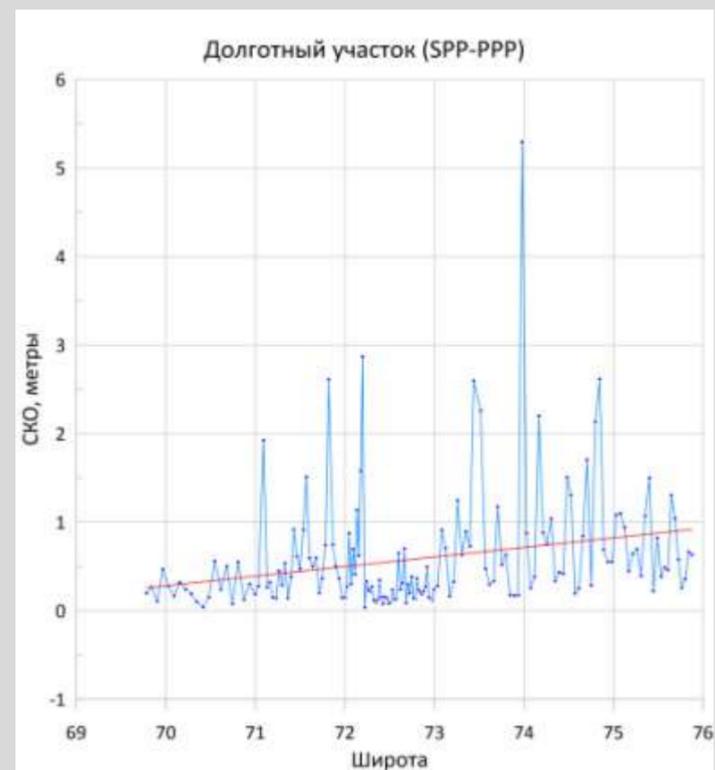
По маршруту ледокольного судна были проанализированы вариации разностей координатных определений высоты на геоиде WGS84.

Основные анализируемые параметры:

- разность измеренных высот (SPP-PPP)
- разность измеренных высот (SPP) и модели геоида EGM2008

Для всего трека построена зависимость разницы высот по PPP и SPP от широты.

Предположения о монотонном возрастании шума с увеличением широты, а также о возможном колоколообразном характере распределения в области авроральных широт не подтвердились.



На долготном профиле (V) построены

- разность измеренных по GPS высот (SPP – PPP) и PPP - при этом отклонение PPP от модели убывает с увеличением широты.

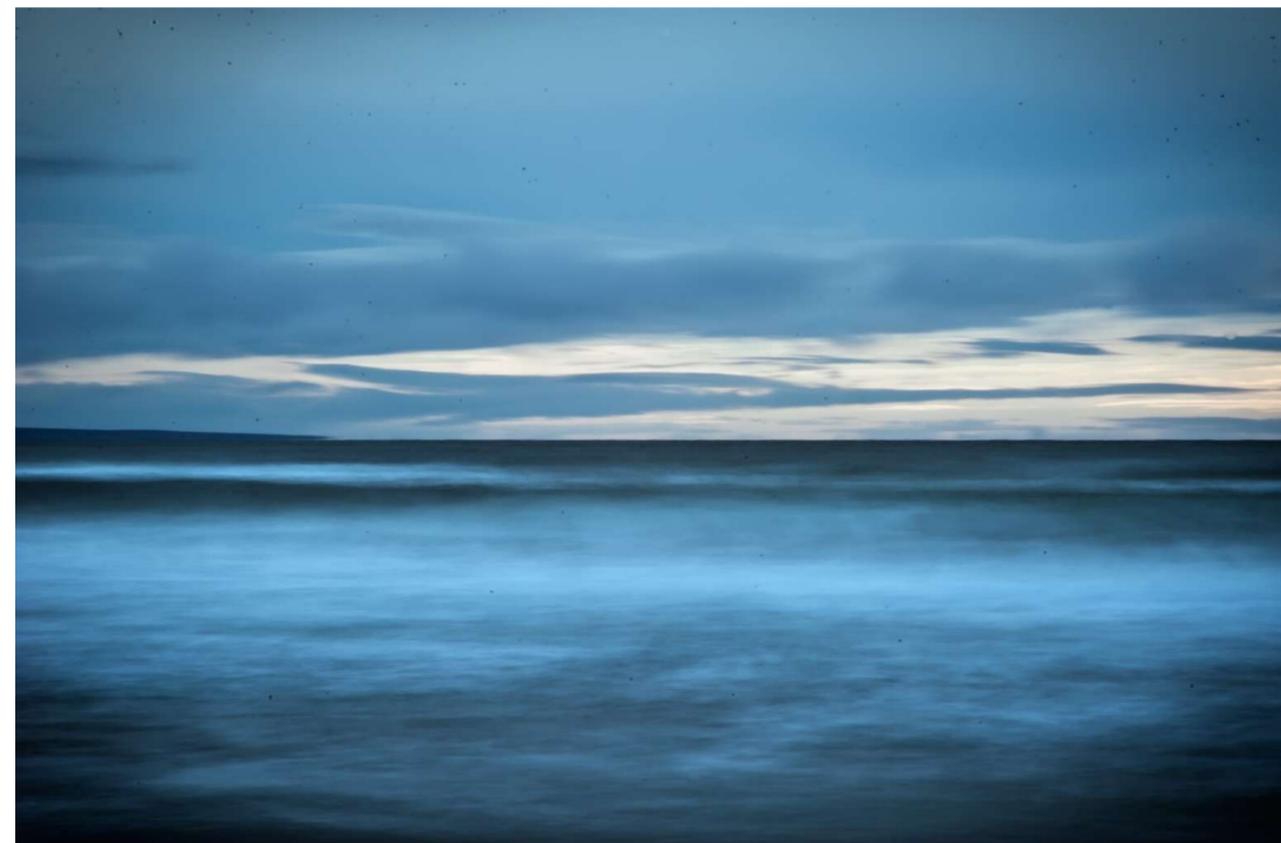
-- разность высоты и превышений геоида по EGM2008

На долготном профиле (V) наблюдается монотонный рост разности (SPP – PPP), при этом отклонение PPP от модели EGM2008 убывает с увеличением широты.

При анализе всех измерений четкой зависимости от широты не выявлено.

Основные результаты

1. Показана принципиальная возможность удаления от временных наземных базовых станций на расстояния до 3000 км (при благоприятных условиях) –
- актуально при выполнении работ на удаленных акваториях, включая высокие широты Арктики
2. Опробована методика аэрогравиметрических исследований на протяженных профилях. Протяженные профили могут быть использованы для оценки качества современных моделей гравитационного поля Земли, анализа работоспособности геодезических и гравиметрических решений, а также анализа воздействия ионосферных возмущений на работу навигационных систем



3. Успешно опробованы технологии, повышающие автономность навигационного обеспечения аэрогравиметрических работ (автономные базовые станции, использование данных постоянных станций СДКМ, PPP; многоантенные ГНСС-приемники)

Важным вопросом для повышения автономности регистрации ГНСС-измерений является корректный учет ионосферных факторов

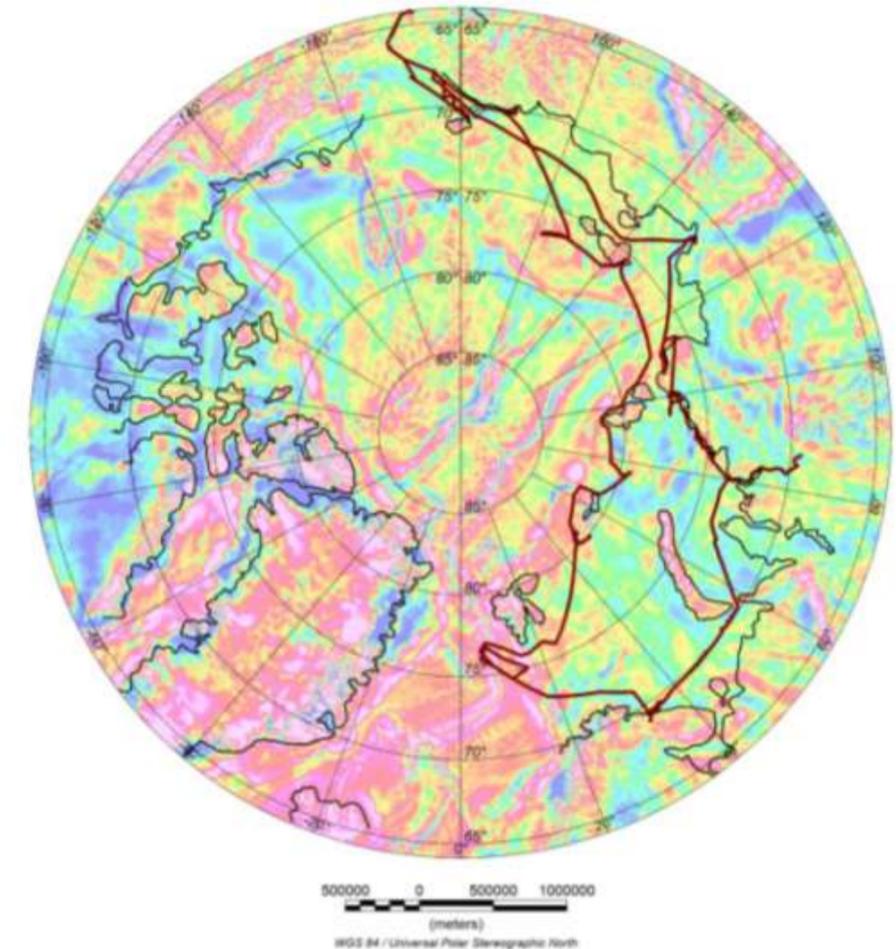
Полученные результаты имеют перспективы для развития геодезических и геофизических технологий, пригодных для работ в Арктической зоне, включая высокие широты Арктики

Вместо Заключения: модели

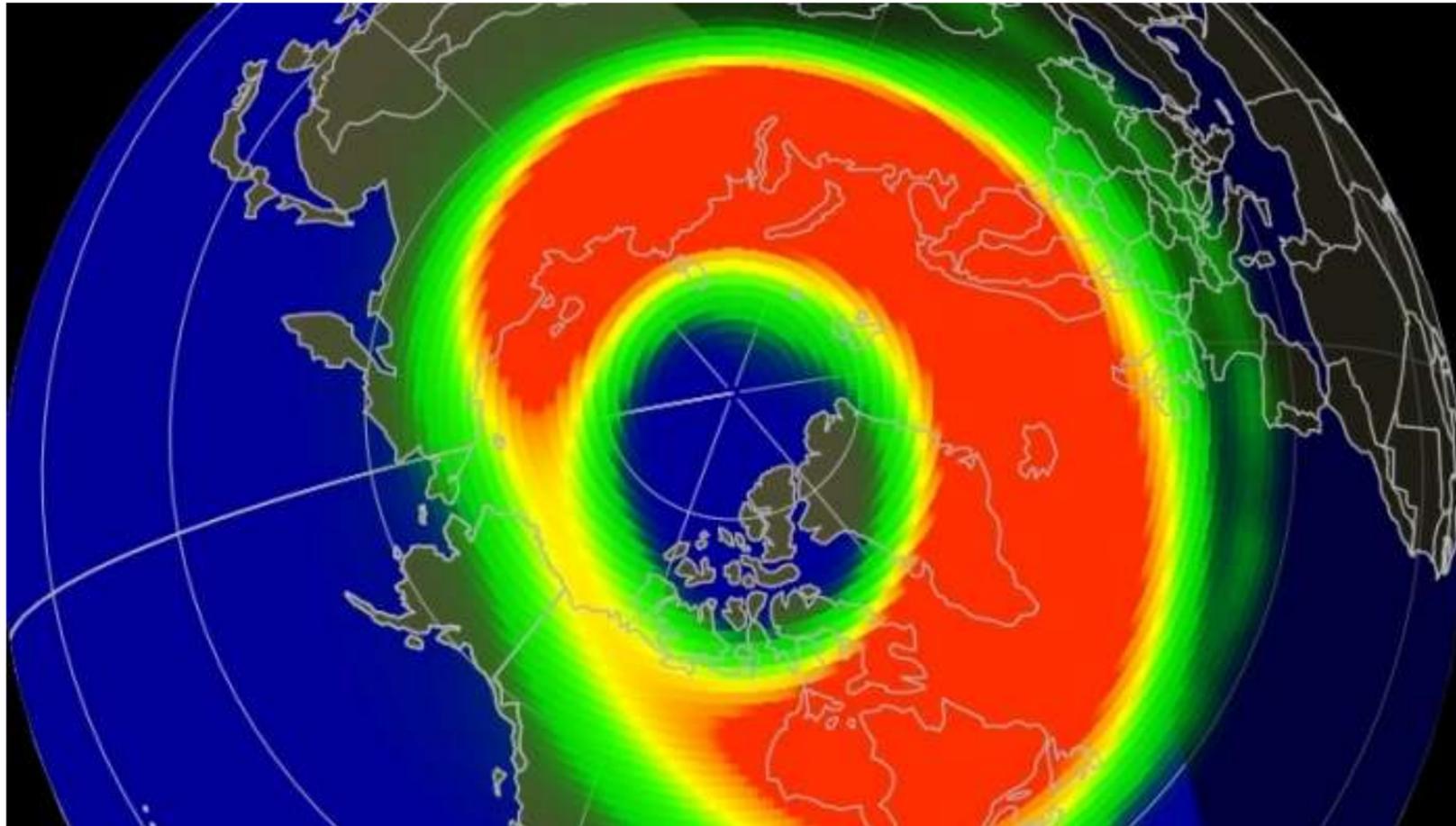
Маршрутные измерения, выполняемые Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН различным измерительным оборудованием и с различных по своим возможностям носителей, предоставляют хорошую возможность изучить и достоверно оценить существующие геофизические и геодезические модели.

Так, **измерения с борта воздушного судна исследуют модели гравитационного поля, измерения с использованием автомобиля – цифровые модели рельефа, а с ледокола – глобальные модели геоида.** Такие исследования носят междисциплинарный характер - в процессе решения навигационных задач выполняется сбор и анализ разнородной геопространственной геофизической и геодезической информации.

Масштабы выполняемых измерений вместе с разработанными в ИФЗ РАН методами их математической аппроксимации, позволяют использовать эти данные как возможные инструменты для оценки и коррекции глобальных моделей геопотенциала и ЦМР в задачах их дальнейшего использования.



Вместо Заключения: Ионосфера



https://xras.ru/project_diary.html?post_id=2597

11 мая 2024, 00:45 мск

Происходит магнитная буря уровня G4.7.

Полярные сияния на широтах до 40 градусов.

Лаборатория солнечной астрономии
(ИКИ РАН и ИСЗФ СО РАН)

И тем не менее.

Если ионосфера вносит существенный вклад в ошибку позиционирования GPS, то:

- Как его оценить ?
- Как его устранить с использованием базовых станций на длинных профилях ?
- Что является критерием кондиционности данных при определении координат подвижного объекта?
- Где территориально это влияние может быть существенным?

Или при отсутствии сверхэкстремальных событий космической погоды

ее влияние не столь существенно?

Список литературы:

1. Погорелов В.В., Соловьев В.Н., Конешов В.Н., Михайлов П.С. Экспериментальное исследование допустимого удаления самолета-лаборатории от базовой станции при аэрогравиметрической съемке // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97, № 4, с. 41–75. DOI: 10.21455/std2018.4-3
2. Конешов В.Н., Соловьев В.Н., Погорелов В.В., Непоклонов В.Б., Афанасьева Л.В., Дробышев М.Н. Об использовании аэрогравиметрических измерений для оценки региональных погрешностей аномалий силы тяжести, полученных по современным моделям гравитационного поля Земли // Геофизические исследования. 2016. Т. 17. № 3. С. 5-16.
3. Спесивцев А.А., Михайлов П.С., Погорелов В.В., Алешин И.М., Иванов С.Д., Передерин Ф.В. Экспериментальное исследование методики высокоточного навигационного обеспечения, основанного на технологии Precise Point Positioning, с использованием автомобиля-лаборатории // Наука и технологические разработки. 2020. Т. 99. № 4. С. 53–68. <https://doi.org/10.21455/std2020.4-3>
4. Передерин Ф.В., Алёшин И.М., Погорелов В.В., Холодков К.И. Маршруты мобильной регистрации ГНСС данных и сравнение полученных данных с ЦМР // Научная конференция молодых ученых и аспирантов ИФЗ РАН: Тезисы докладов. Москва, ИФЗ РАН, 9-11 ноября 2022 г. М.: ИФЗ РАН, 2022. - С.48.
5. Михайлов П.С., Погорелов В.В., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Передерин Ф.В. Экспериментальная оценка моделей геоида в Арктике по данным ГНСС – измерений // В сборнике: «Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей» Материалы 49-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского - В.Н. Страхова, 23 - 27 января 2023 г. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. 2023. - С. 191-195.
6. Михайлов П.С., Погорелов В.В., Передерин Ф.В., Преснов Д.А. Статистические и спектральные оценки вертикальных координат и высот геоида, полученных с помощью ГНСС и EGM2008 // Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 29 ноября – 03 декабря 2021 г. Радиотехника и компьютерные технологии / сост.: К.С. Слободчук, С.О. Рускин / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет). Москва–Долгопрудный-Жуковский: МФТИ, 2021. – С. 51-53.
7. Погорелов В.В., Михайлов П.С., Спесивцев А.А., Преснов Д.А., Лиходеев Д.В., Жостков Р.А., Передерин Ф.В., Холодков К.И. Экспериментальные оценки глобальной модели геоида с использованием подспутниковых измерений на подвижном основании // Материалы 19-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2021. - С. 255-256.
8. Патент на изобретение RU 2799518 С2 «Устройство для регистрации и передачи геофизических цифровых данных». Авторы: Передерин Ф.В., Алёшин И.М., Иванов С.Д., Корягин В.Н., Погорелов В.В., Холодков К.И., Холодков И.Н. Патентообладатель: ИФЗ РАН. Заявка: 2022118712. Опубликовано: 05.07.2023 Бюл. № 19
9. Передерин Ф.В., Алешин И.М., Иванов С.Д., Михайлов П.С., Погорелов В.В., Холодков К.И. Портативный комплекс регистрации сигналов ГНСС с высокой частотой опроса: полевые испытания и перспективы применения // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97. № 4. С. 28-40. DOI: 10.21455/std2018.4-2
10. Алешин И.М., Передерин Ф.В., Холодков К.И. «Программа оперативного наблюдения и контроля работы регистратора ГНСС» / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014616491 Правообладатель: ИФЗ РАН. 2014.
11. Передерин Ф.В., Алёшин И.М., Холодков К.И., Бургучев С.С., Соловьев А.А. Программная реализация удаленного управления процессами регистрации и оперативной передачи геомагнитных измерений // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 4. С. 76–82.
12. Конешов В.Н., Погорелов В.В., Спесивцев А.А., Ермошенко С.А., Родченко А.О. Опыт использования постояннодействующих станций шСДКМ при аэрогравиметрических исследованиях на протяженных профилях // Труды Шестой научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017 г. - С. 353-356.





Спасибо за внимание