



Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт физики
Земли им. О. Ю. Шмидта РАН

Гравиметрические исследования в Арктике: история, методы, средства и перспективы

д.т.н., профессор В.Н. Конешов, к.т.н., П.С. Михайлов

III Всероссийская школа молодых учёных «Системный анализ
динамики природных процессов в российской Арктике»



РНФ
Российский
научный фонд



Карта геоида

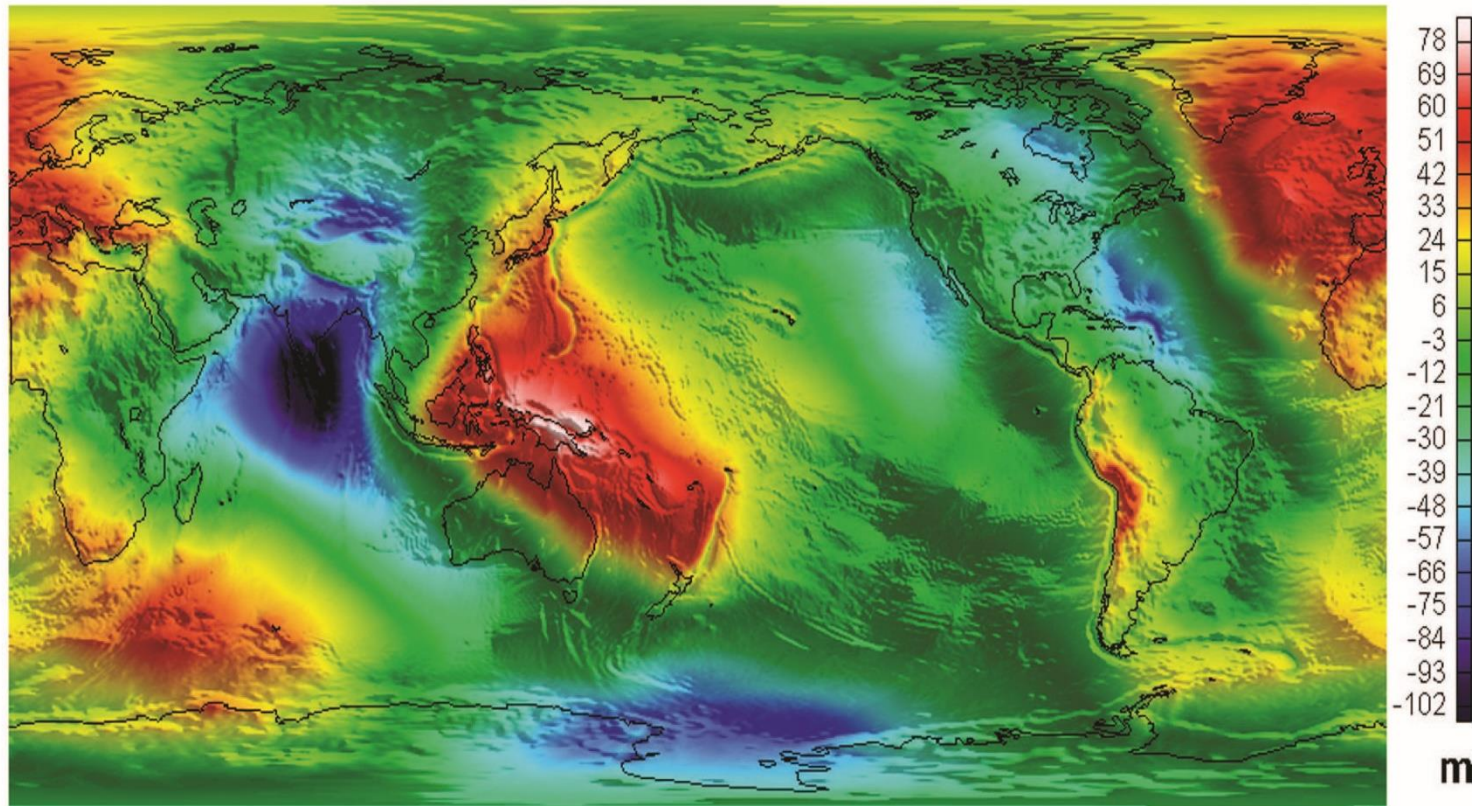


FIG. 3. The $15' \times 15'$ global geoid undulations produced by EGM96 (Lemoine et al., 1998). The undulations range from -107 m to 85 m. Black lines indicate coast lines.

Сухопутная гравиметрическая съемка

Сухопутная гравиметрическая съемка выполняется с густотой пунктов и погрешностью измерений, обусловленной заданным классом съемки (масштабом гравиметрической карты)

Первая съемка на льду

Распоряжением Совета Министров СССР № 645 от 3 февраля 1955 г. и Постановлением Совета Министров СССР № 383-232 от 3 марта 1955 г. «... предлагалось организовать Высокоширотную воздушную экспедицию 1955 года, в задачу которой входит выполнение на дрейфующих льдах гравиметрических и магнитных наблюдений в районе к северу от Шпицбергена, Земли Франца Иосифа и Северной Земли, включая полосу над подводным хребтом Ломоносова и район Северного Полюса...».

Первая съёмка на льду

Эта экспедиция получила название Высокоширотная воздушная экспедиция «Север-7».

Для обеспечения научных работ на дрейфующих льдах было задействовано 13 самолётов:

- 5 самолётов Ли-2 и 2 самолёта Ан-2 - подвижные группы.
- 2 самолёта Ан-2 - дежурство на Ледовых базах.
- 2 самолёта Ил-12 - обеспечение Ледовых баз горючим, продовольствием и снаряжением.
- 1 самолёт Ил-12 - связь Ледовых баз с исходными береговыми пунктами.
- 1 самолёт Ил-12 - авиаразведка.

Геофизическая группа должна была выполнить площадную гравиметрическую съёмку плотностью 1 пункт на 10000 км²

Первая съемка на льду

Планом предусматривалось определение ускорения силы тяжести в 105 точках, расположенных более-менее равномерно в западной части центральной Арктики, включая район Северного Полюса.

В соответствии с намеченным планом в районе работ подбирались достаточно прочное ледовое поле для временной Ледовой базы. Вокруг Базы выбиралось от 10 до 20 пунктов, на которых проводился весь комплекс предусмотренных планом измерений.

После отработки намеченных пунктов выбиралось новое место для Ледовой базы, и вокруг неё выполнялись измерения на очередных запланированных точках и т.д.

Ледовая база также служила местом, куда самолётами Ил-12 с материка доставлялись горюче-смазочные материалы, продукты питания, газовые баллоны и прочее необходимое экспедиционное снаряжение и оборудование. Кроме того, на Ледовой базе периодически проводился контроль смещения нуля-пункта всех экспедиционных гравиметров.

Первая съёмка на льду

Для контроля смещения нуль-пункта гравиметров подвижных групп и на Ледовой базе и его изменения во времени были организованы специальные рейсы самолёта Ил-12, на борту которого находились пять гравиметров СН-3.

Ускорение силы тяжести передавалось на Ледовую базу по мере необходимости, но не реже как через каждые 2-3 суток с береговых опорных пунктов определённых заранее: мыс Желания (остров Новая Земля), Нагурская (архипелаг Земля Франца Иосифа), Средний (остров Северная Земля) и мыс Челюскин.

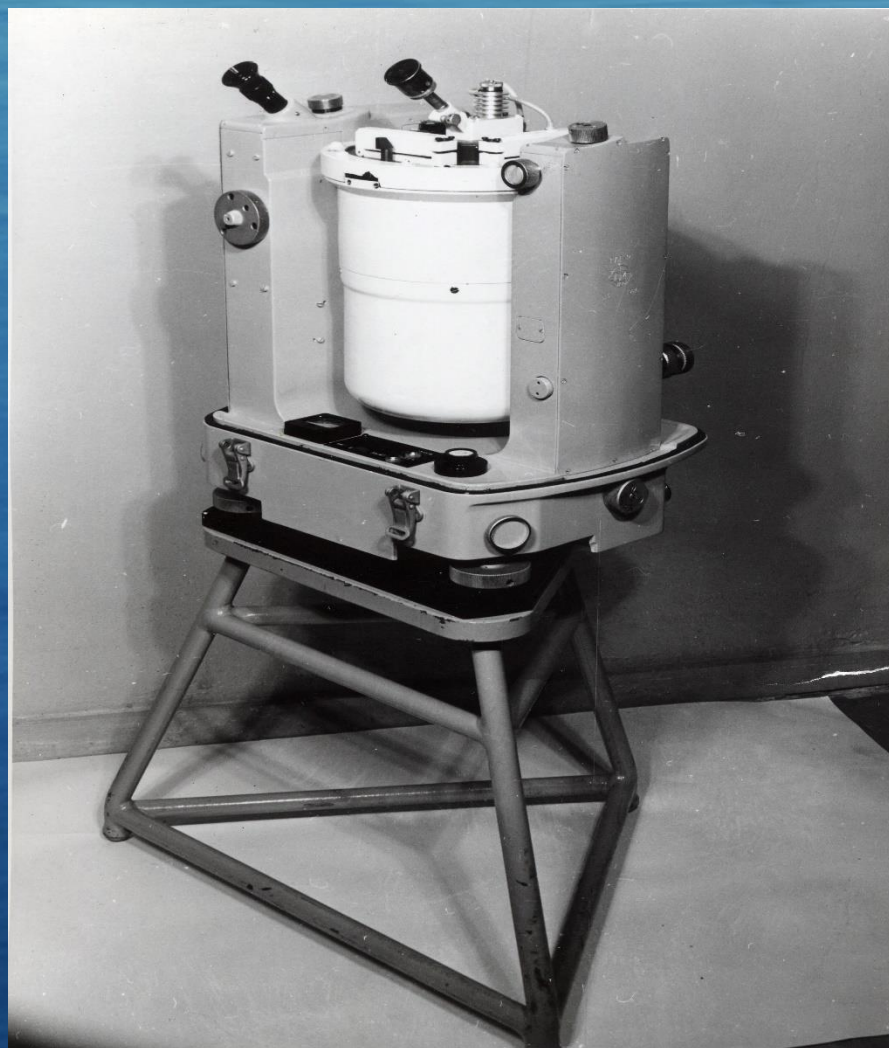
Геофизическая группа успешно выполнила предусмотренные планом работы. Всего за два сезона работ в российском секторе Полярного бассейна был определен 281 гравиметрический пункт.

Первая съёмка на льду

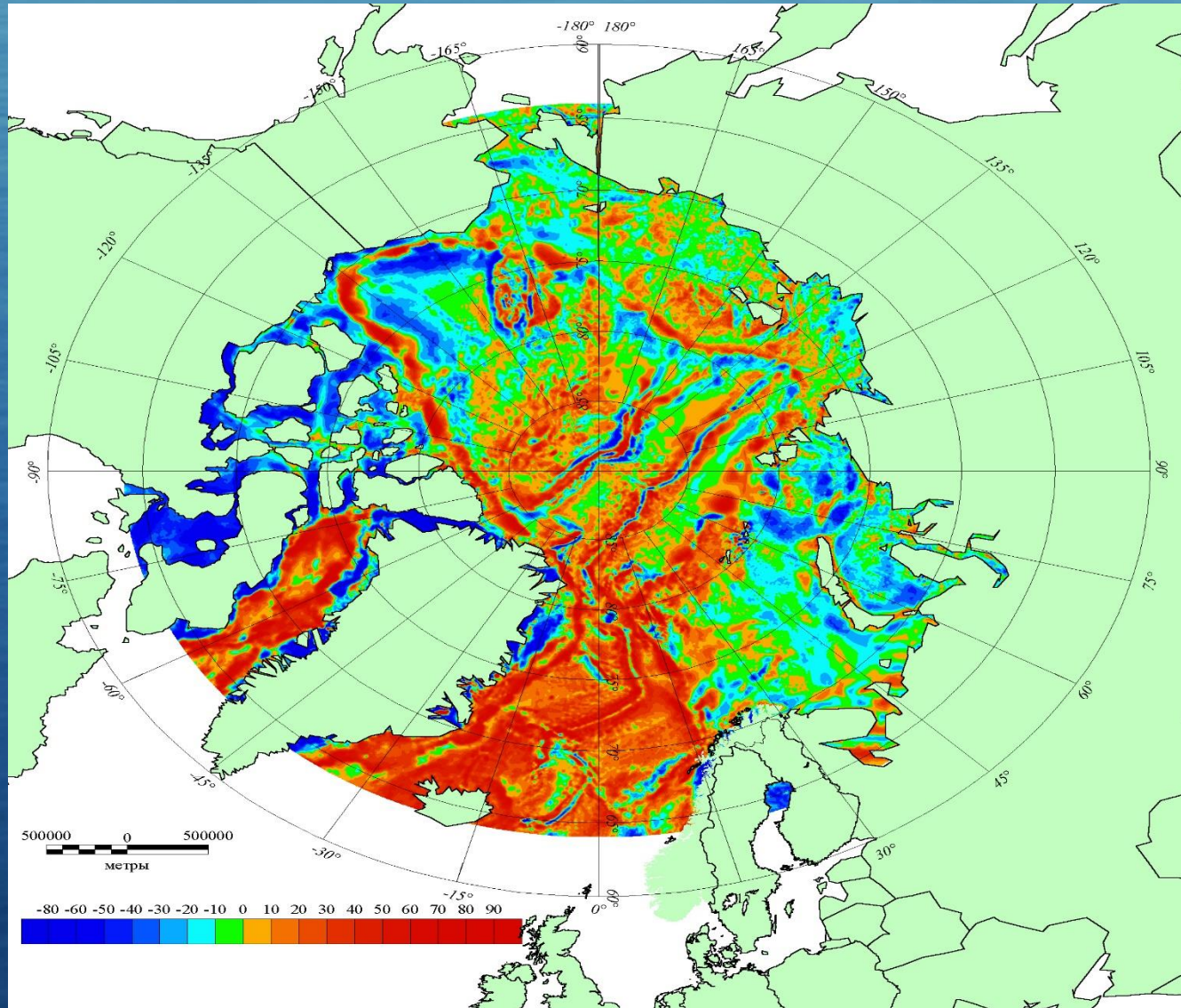
Точность гравиметрической съёмки оказалась в среднем 1,2 мгал. Координаты пунктов определялись астрономическим методом и получены со среднеквадратической ошибкой 0,1 минуты по планетам и звёздам и 0,6 угловой минуты по Солнцу.

В результате выполненных работ была создана первая гравиметрическая карта российского сектора Арктики масштабом 1:1 000 000.

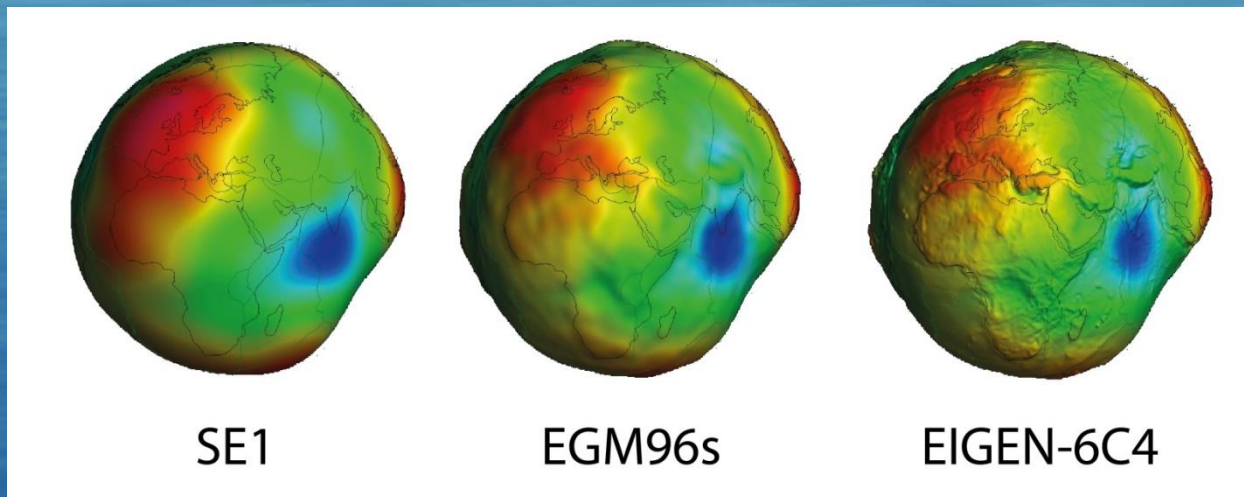
Аппаратура для создания опорной гравиметрической сети 1 класса в Арктике



Арктика, модель аномалий гравитационного поля



Ультравысокостепенные модели гравитационного поля



Наибольший интерес пользователей представляют современные комбинированные модели ГПЗ, включающие также данные альтиметрии, инструментальных съемок и глобальной топографии. От понимания природы модельных данных и методик их синтеза зависят области возможного практического применения глобальных моделей и решаемые с их помощью прикладные задачи.

К настоящему времени достижимой является разрешение моделей до 5540 степени разложения сферических гармоник, однако высокие значения их степени и порядка не всегда определяют достоверность представленных данных.

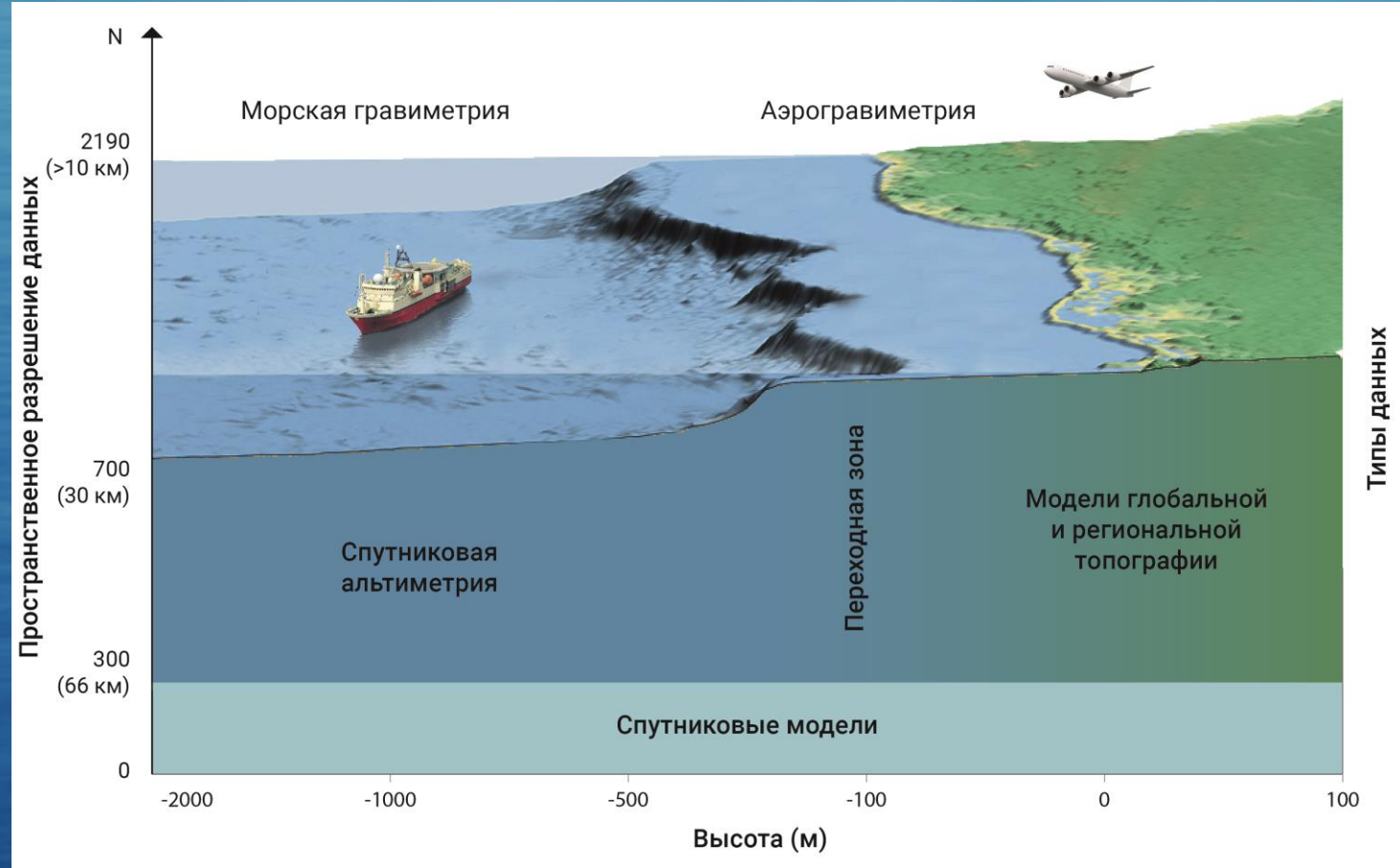
Источники данных для комбинированных моделей

Современная модель является сложным комбинированным решением в разных длинах волн содержащая данные от различных по точности, разрешению и масштабу источников.

| | |
|--|--|
|  | Спутниковые модели |
|  | Гравиметрические сети |
|  | Инструментальные площадные и маршрутные съемки |
| | - Аэрогравиметрия |
| | - Морская гравиметрия |
|  | |
|  | Спутниковая альтиметрия |
|  | Модели рельефа |

Источники данных современных глобальных комбинированных моделей гравитационного поля Земли

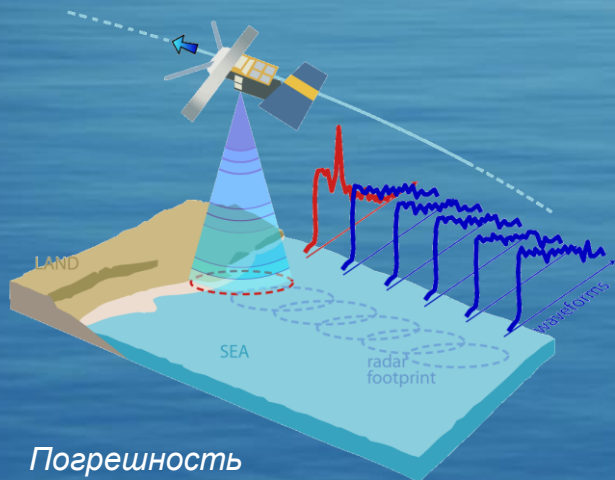
Структура современной комбинированной модели



Данные от различных источников определяют модельное представление гравитационного поля Земли в разных длинах волн аномалий.

Морские и аэрогравиметрические съемки используются в моделях в очень ограниченном объеме. В Мировом океане основным средством получения данных в диапазоне длин волн аномалий менее 66 км является **спутниковая альтиметрия**.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ В АЛЬТИМЕТРИИ



Погрешность
альтиметрических
измерений
на мелководье и в зоне
перехода «суша-море»

Области и структуры **априорно меньшей**
достоверности и точности выделяемых аномалий:



Прибрежные зоны, мелководье



Островные дуги



Шельфовые области и континентальные
склоны

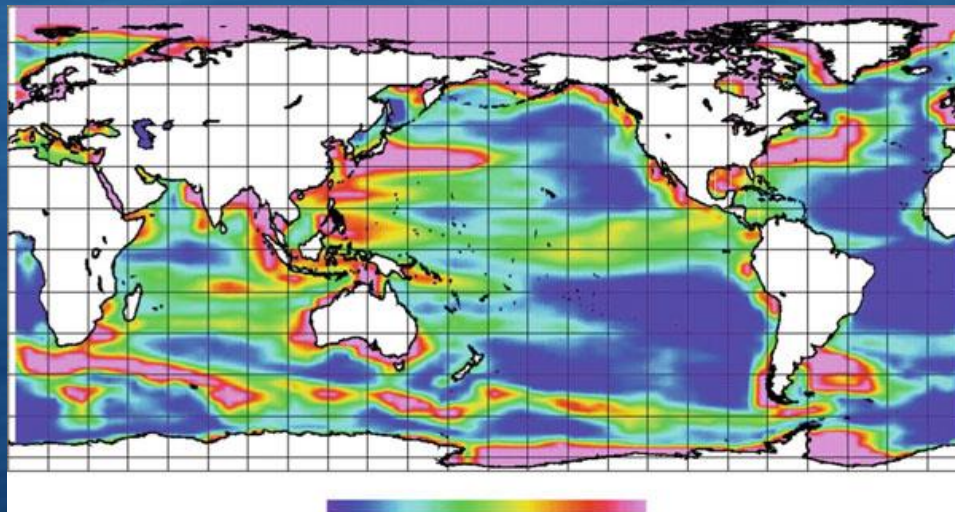


Высокие широты

Практическая оценка
каждой модели должна
выполняться в разных
акваториях и над
различными структурами,
**особенно с априорно
меньшей
достоверностью
альтиметрических
данных.**

*Распределение
ширины окна
фильтрации
альтиметрических
данных при расчете
модели
гравитационного
поля*

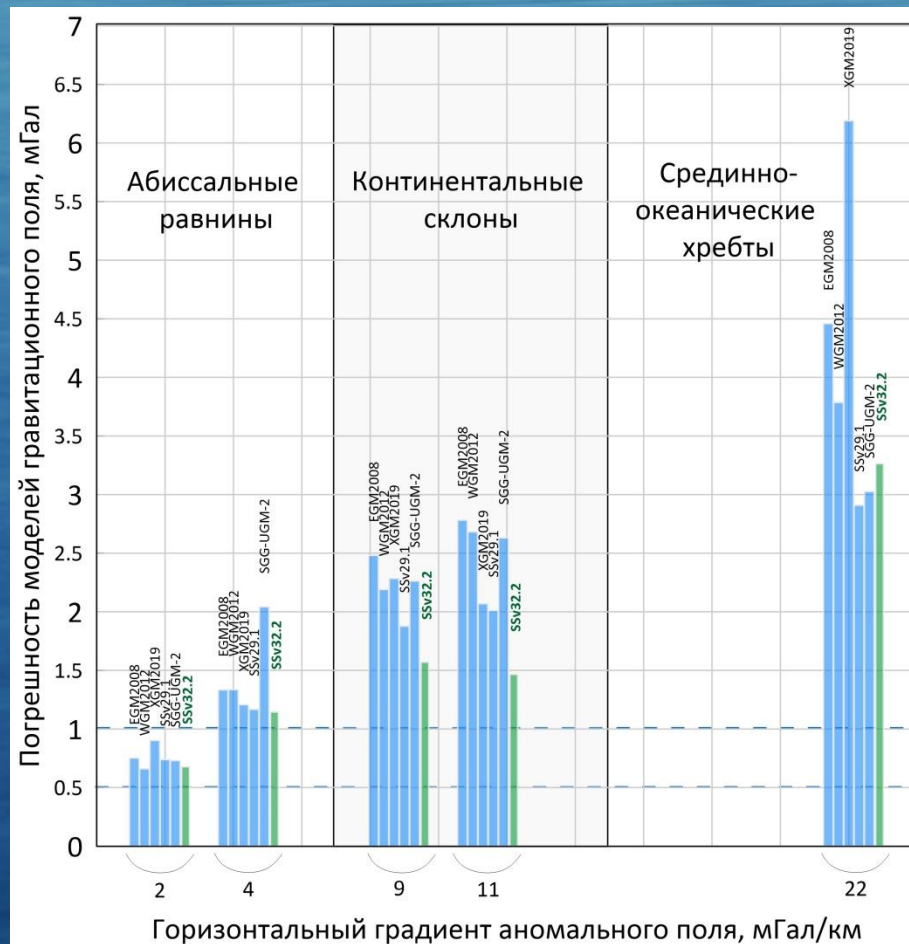
*(Andersen, O. B. Marine
Gravity and Geoid from
Satellite Altimetry. Geoid
Determination – Theory and
Methods)*



Оценки современных моделей ГПЗ

Важными особенностями современной модели ГПЗ являются **разные пространственные точности и детальности представления аномалий**. В связи с этим оценка моделей должна выполняться регионально и с учетом структуры аномального поля.

Наиболее эффективный способ получения данных о достоверности глобальных моделей ГПЗ на акваториях – сравнение модельных данных с высокоточными площадными морскими гравиметрическими съемками.

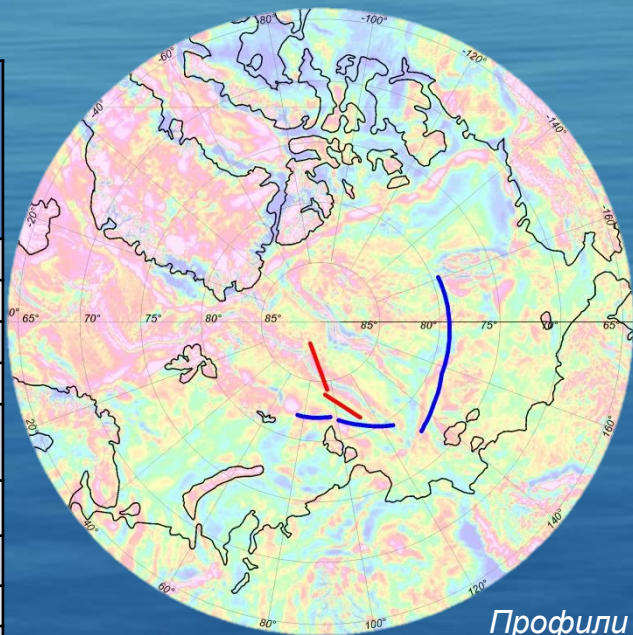


Оценки моделей ГПЗ полученные в ИФЗ РАН с использованием высокоточных площадных морских съемок.

Оценки моделей в Арктике

Из анализа высокоширотных данных можно сделать вывод, что в Мировом океане модели наименее достоверны в полярных областях Северного Ледовитого океана закрытых постоянным льдом.

| Съемка | Широта и длина профилей | Макс. градиент поля на профилях (мГал/км) | Модель | Мин. (мГал) | Макс. (мГал) | СКО (ст. откл.) (мГал) |
|-------------------------------------|----------------------------|---|-----------|-------------|--------------|------------------------|
| Суб-Меридиональный полярный профиль | 77° - 79° с. ш. 1500 км | 3 | EGM2008 | -20.477 | 9.247 | 4.059 |
| | | | WGM2012 | -17.401 | 7.364 | 3.300 |
| | | | XGM2019 | -11.051 | 5.699 | 2.682 |
| | | | SSv29.1 | -10.694 | 7.667 | 2.968 |
| | | | SGG-UGM-2 | -13.788 | 7.031 | 2.566 |
| Суб-меридиональный полярный профиль | 79° - 82° с. ш. 820 км | 3 | EGM2008 | -19.174 | 16.840 | 5.896 |
| | | | WGM2012 | -15.107 | 12.903 | 3.894 |
| | | | XGM2019 | -12.372 | 13.752 | 4.845 |
| | | | SGG-UGM-2 | -19.771 | 18.005 | 5.846 |
| Субширотные полярные профили | 81° - 88° с. ш. 850 км | 5 | EGM2008 | -27.014 | 36.933 | 7.168 |
| | | | WGM2012 | -25.564 | 29.856 | 6.290 |
| | | | XGM2019 | -24.181 | 33.354 | 7.711 |
| | | | SGG-UGM-2 | -28.385 | 33.591 | 7.089 |



Оценки глобальных моделей гравитационного поля Земли в высоких широтах

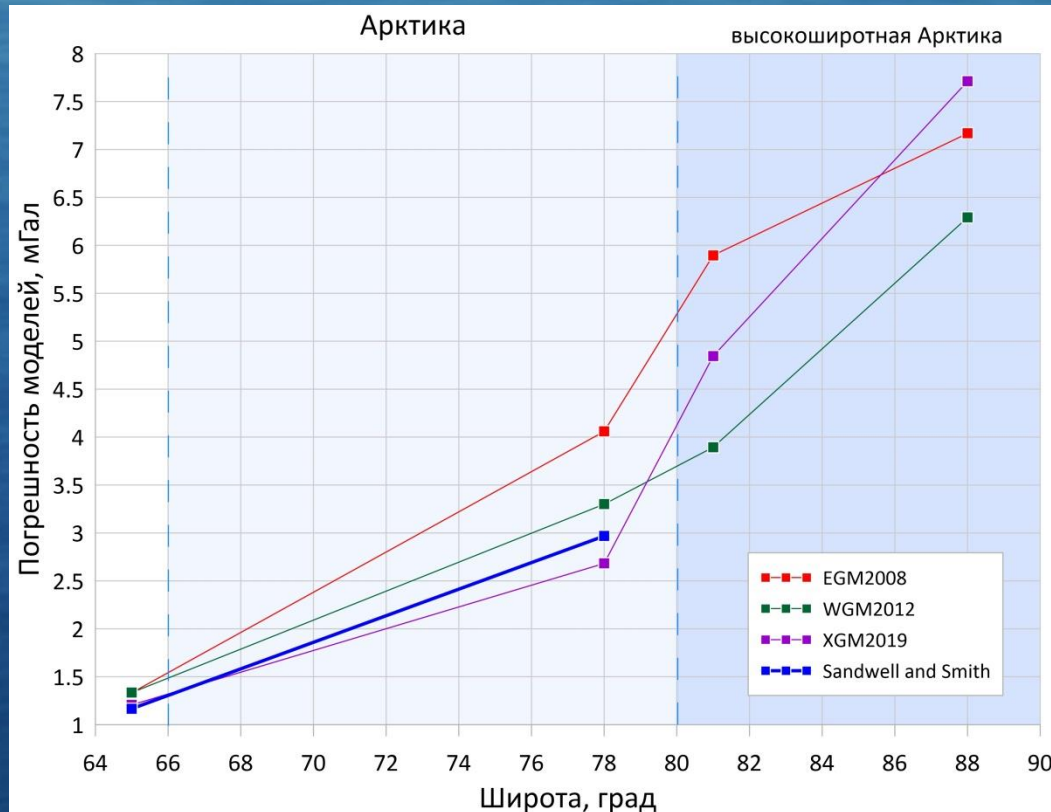
Профили для оценки моделей в высоких широтах Арктики

Следовательно, задача высокоточного определения параметров гравитационного поля в высокоширотной Арктике должна, как и прежде решаться прямыми инструментальными измерениями с различных носителей.

Оценки современных моделей ГПЗ

По результатам исследований было выявлено отсутствие зависимости точности современных моделей от широты за исключением Арктического региона.

В высоких широтах Арктики выявлен значительный рост погрешности модельных данных относительно прочих акваторий над похожими структурами с градиентом поля от 3 до 5 мГал/км.



За последние десятилетия морская гравиметрия в Арктике пробует ответить на два вопроса:

- насколько достоверны современные модели аномалий гравитационного поля на этот регион;
- как зависят погрешностей моделей от широты места, характера аномалий, градиента поля и других условий.

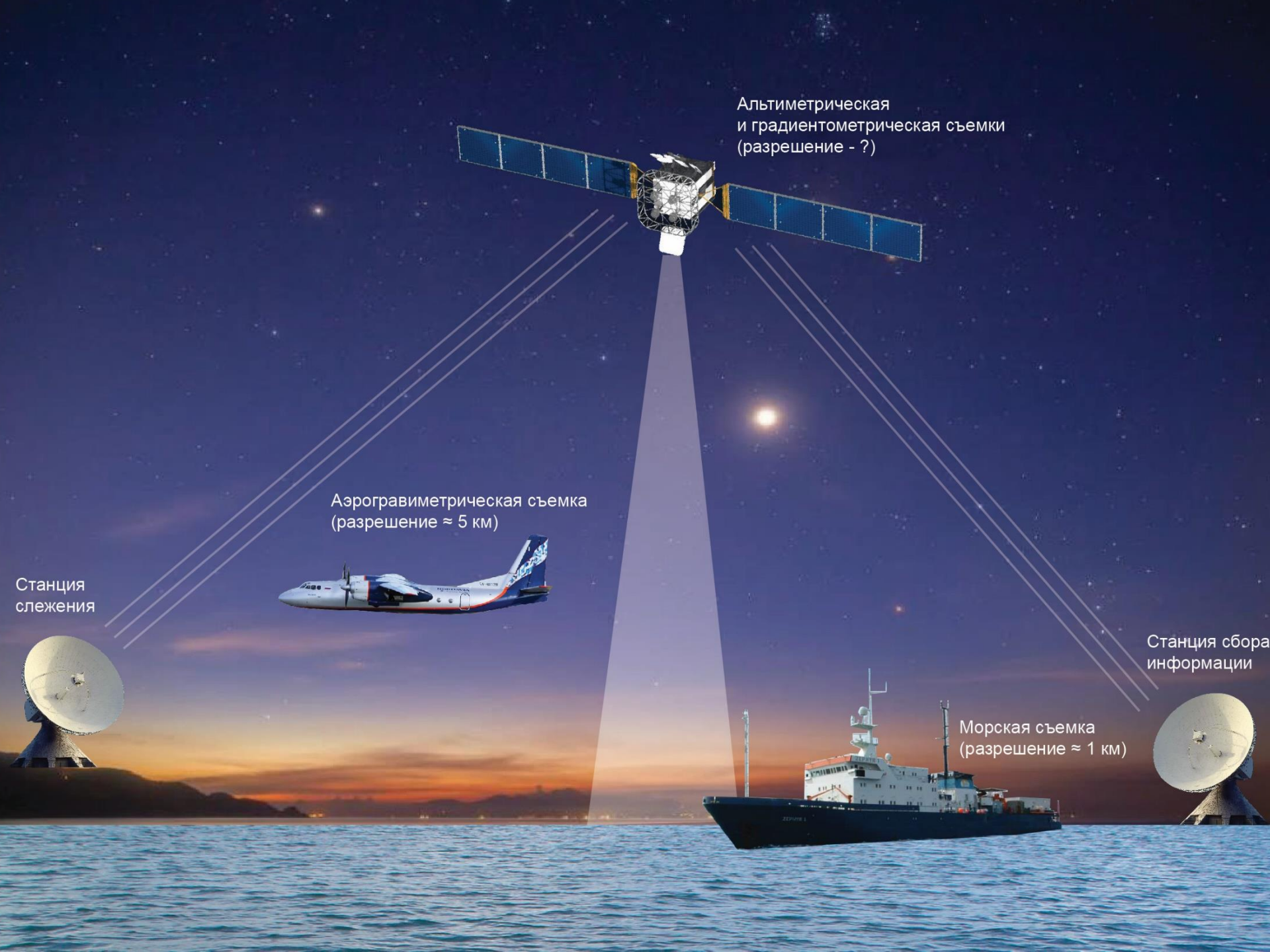
Альтиметрическая
и градиентометрическая съемки
(разрешение - ?)

Аэрогравиметрическая съемка
(разрешение ≈ 5 км)

Морская съемка
(разрешение ≈ 1 км)

Станция сбора
информации

Станция
слежения



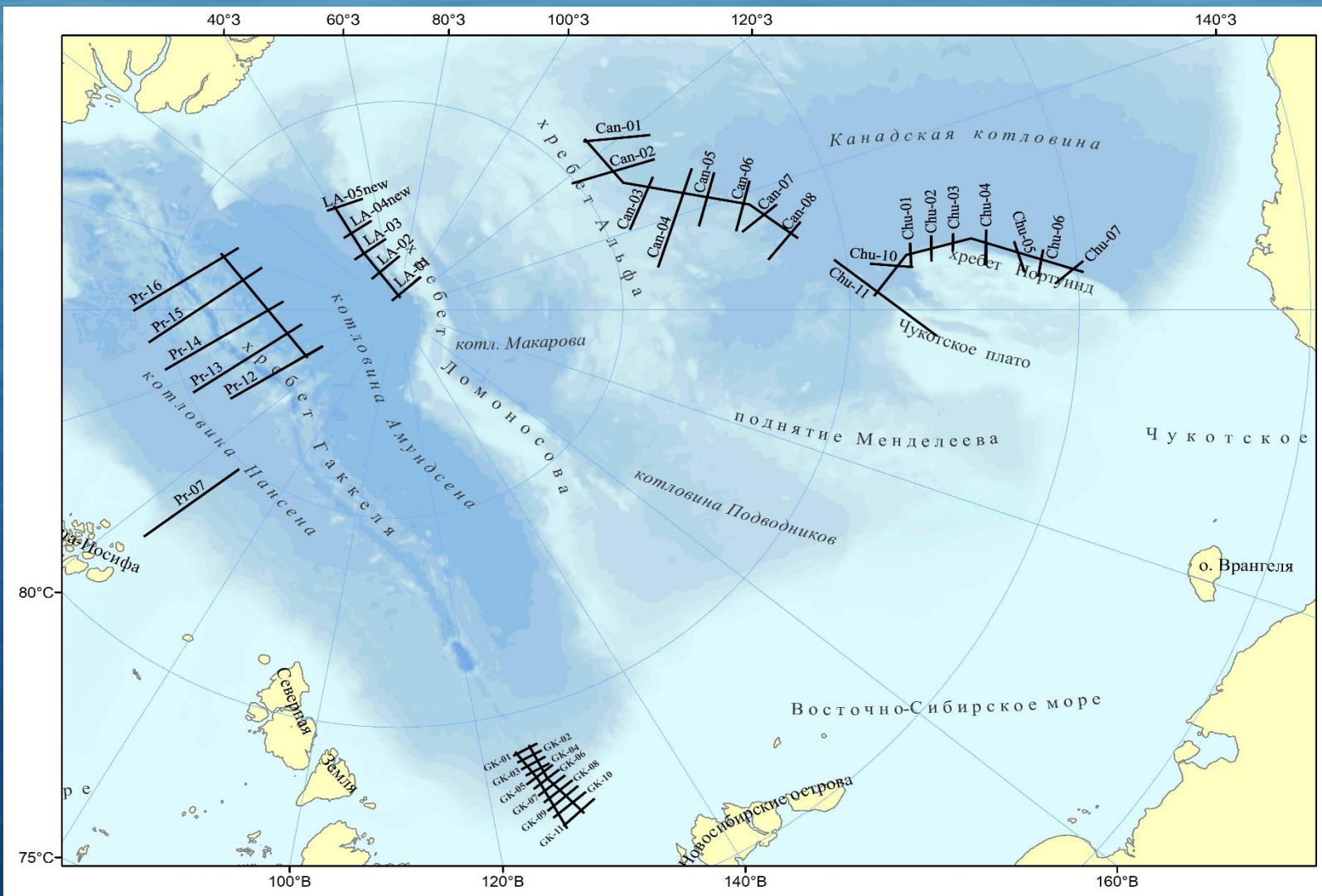
Морские измерения в Северном Ледовитом океане

На протяжении нескольких десятилетий в Арктике выполняются морские площадные и маршрутные гравиметрические съемки.

Во многих из них принимали участие сотрудники ИФЗ РАН.

Выполнялись экспедиции и на подводной лодке и на обитаемом подводном аппарате.

Пример объема запланированных работ



Пример расположения гравиметрической аппаратуры на борту научно-исследовательского судна



Научно-исследовательское судно «Горизонт»



В ИФЗ РАН разработаны методические приемы применения моделей для решения прикладных задач

Определения скорости смещения нуль-пункта.

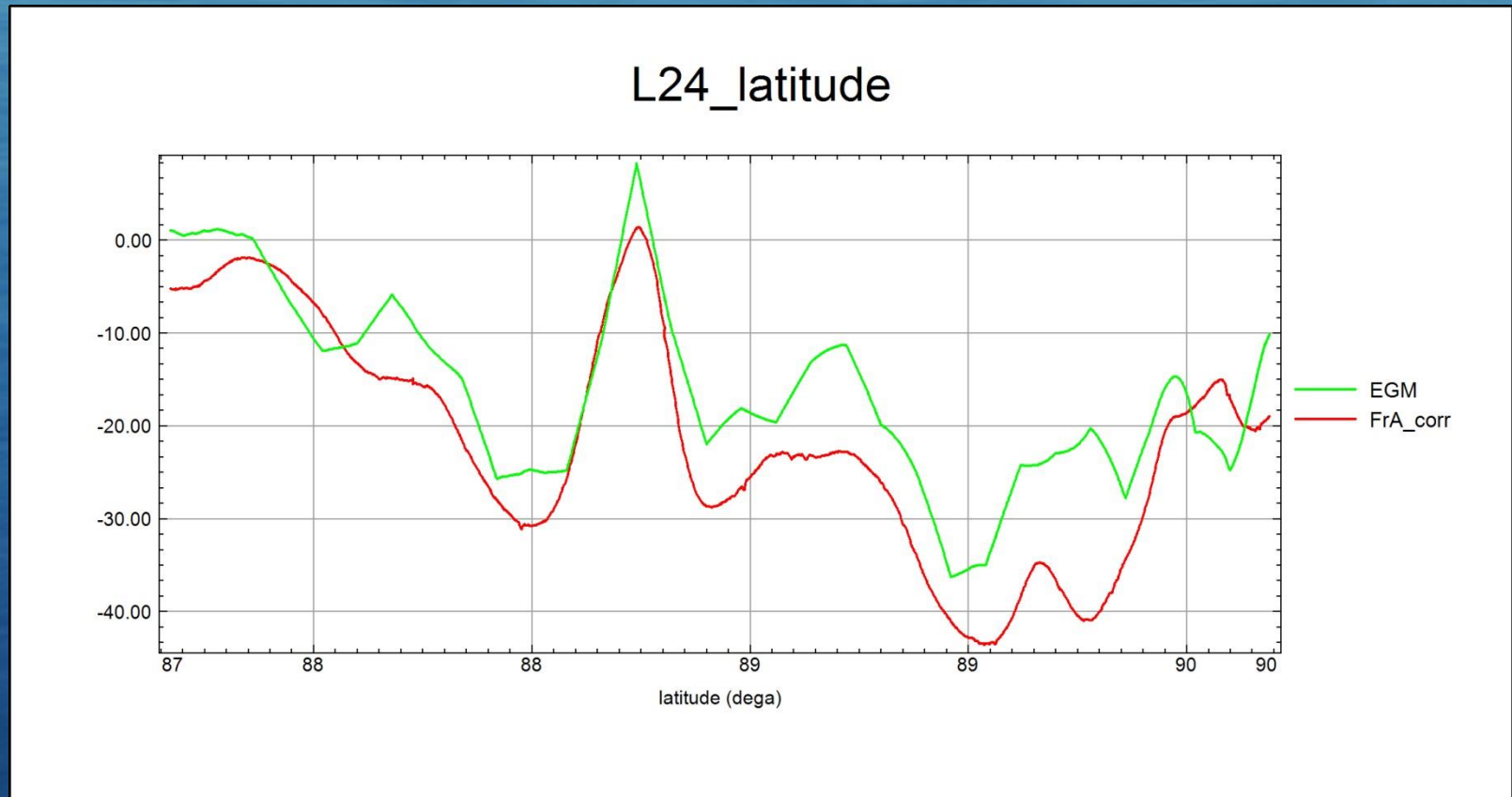
Контроля уровня морской съемки.

Привязки съемки к уровню модельного поля в случае отсутствия надежных абсолютных значений в порту выхода.

Контроля корректности работы приборов.

Выполнения съемок с погрешностями, позволяющими получать гравиметрические карты масштаб **1:50 000**

Пример сравнения модели с профилем, выполненным в крест простираения градиентной структуре вплоть до Северного полюса в 2020 году



Предварительные выводы по всем сравнительным оценкам модельных данных с использованием материалов морских гравиметрических съемок

Сферические модели представлены на весь Земной шар, включая полюса. Популярная сферическая модель EGM2008 в самых высоких широтах (выше 80° с. ш.) все же имеет систематическое и нелинейное отклонение в уровне, которое вблизи Северного полюса достигает $\approx +3$ мГал, то есть модельная сила тяжести на полюсе выше, чем инструментально измеренная.

Экспериментальные результаты,
полученные в ходе
аэрогравиметрических
экспедиций ИФЗ РАН

Самолет-лаборатория для выполнения гравиметрических работ



Специфические условия работы самолета при аэрогравиметрической съемке в Арктике:

- большие перепады температур;
- изменение режимов работы двигателей и уровней возникающих вибраций;
- частые обледенения самолета, изменяющие электромагнитную совместимость приемников GPS со штатными самолетными радиосистемами;
- непредсказуемые погодные условия, изменяющие уровень инерциальных ускорений;
- неустойчивая радиосвязь.

Гравиметрическая аппаратура внутри самолета-лаборатории



Отсек стоек питания



Антенны в блистере в самолете



Программа Президиума РАН I.32П

"Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации

Проект «Аэрогравиметрическая съемка в высоких широтах Арктики»

Выполнение площадных съемок масштаба 1 : 200 000 (2014-2017 гг.)

Руководитель: заместитель директора ИФЗ РАН, д.т.н., проф. Конешов Вячеслав Николаевич

Организация-исполнитель:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук



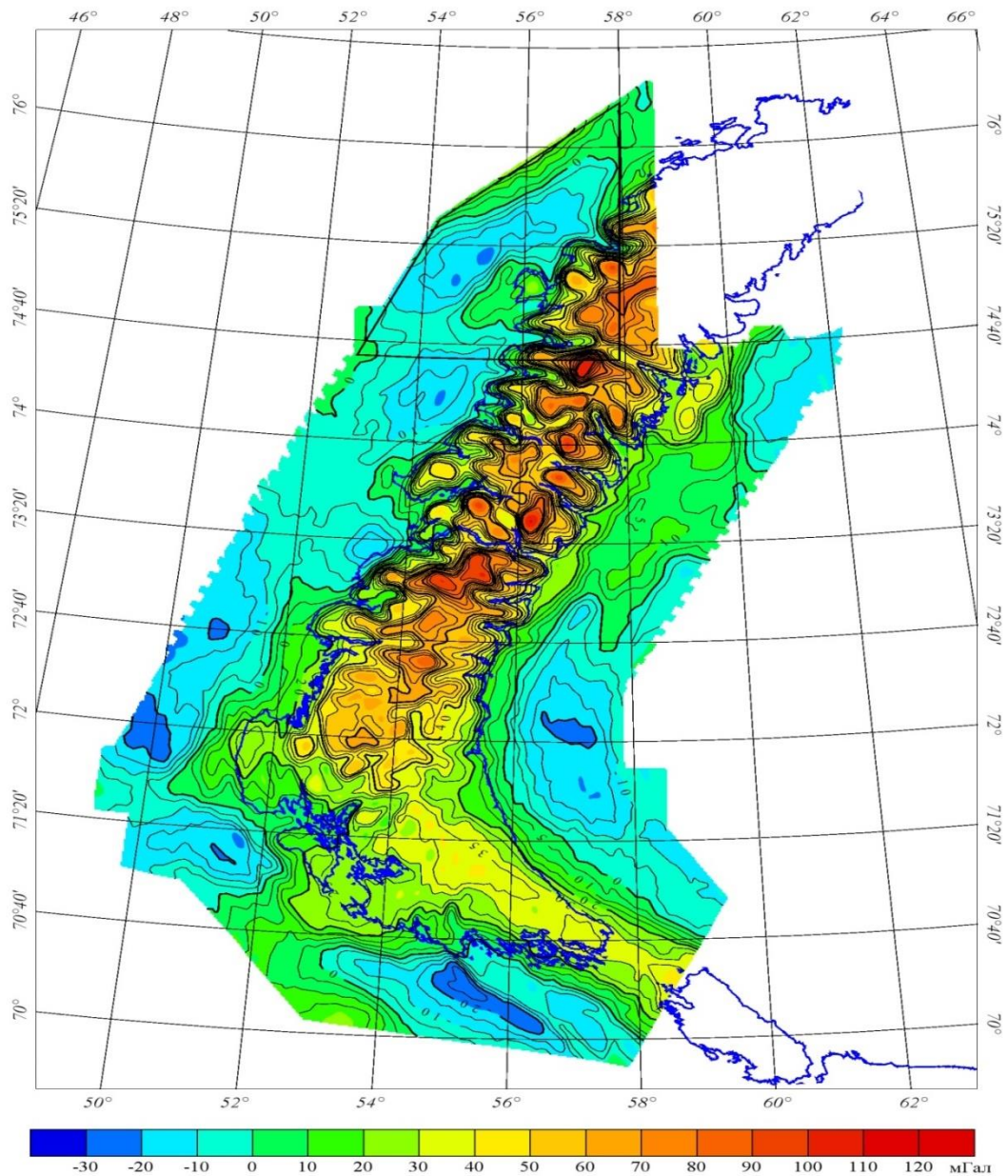
Задача проекта:

Совершенствование метода аэрогравиметрической съемки для исследований в условиях Арктической зоны, включая высокие широты Арктики

Основные направления проекта:

1. Выполнение аэрогравиметрических съемок масштаба 1:200 000 над архипелагом Новая Земля и акваторией Карского моря
2. Изучение региональных особенностей современных моделей гравитационного поля Земли по профилю Мурманск – Архангельск – Сургут – Мирный – Магадан – Петропавловск-Камчатский
3. Экспериментальное исследование допустимого удаления самолета-лаборатории от базовой станции при аэрогравиметрических измерениях

Проект карты по результатам съемок 2006 - 2010 годов



Центральная и южная части о.Новая Земля и прилегающие акватории Баренцева и Карского морей

ГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ КАРТА АНОМАЛИЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В РЕДУКЦИИ В СВОБОДНОМ ВОЗДУХЕ

(сечение изолиний 5 мГал)

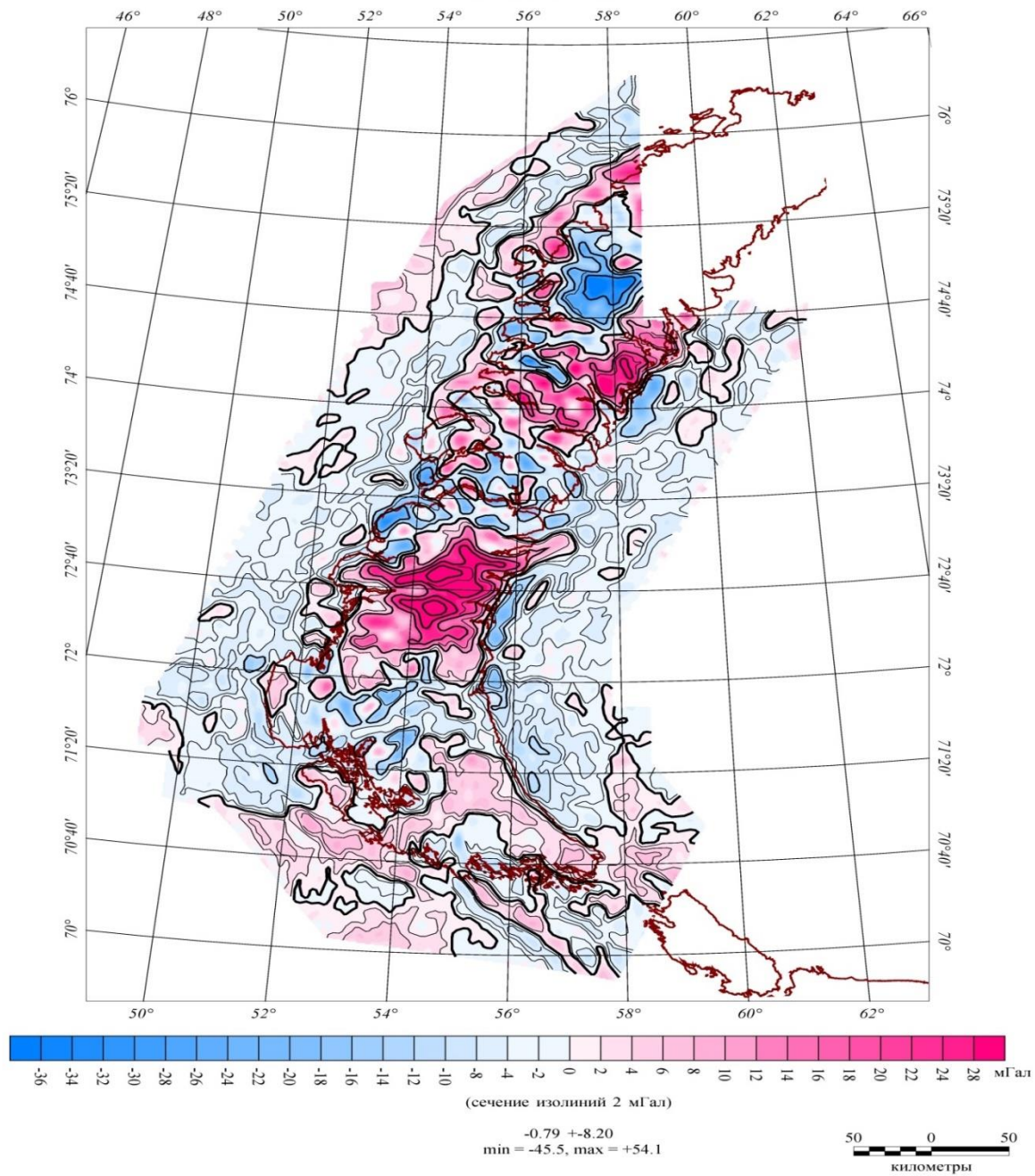


Проекция Гаусса-Крюгера, зона 10

Аэрогравиметрические съемки ИФЗ РАН архипелага островов Новая Земля

ИФЗ РАН с 2006 по 2010 года выполнил аэрогравиметрические съемки архипелага островов Новая Земля. Съемки были выполнены впервые и была получены гравиметрические карты в свободном воздухе масштаба 1:200 000. Было выполнено сравнение с существующими моделями аномалий на этот регион.

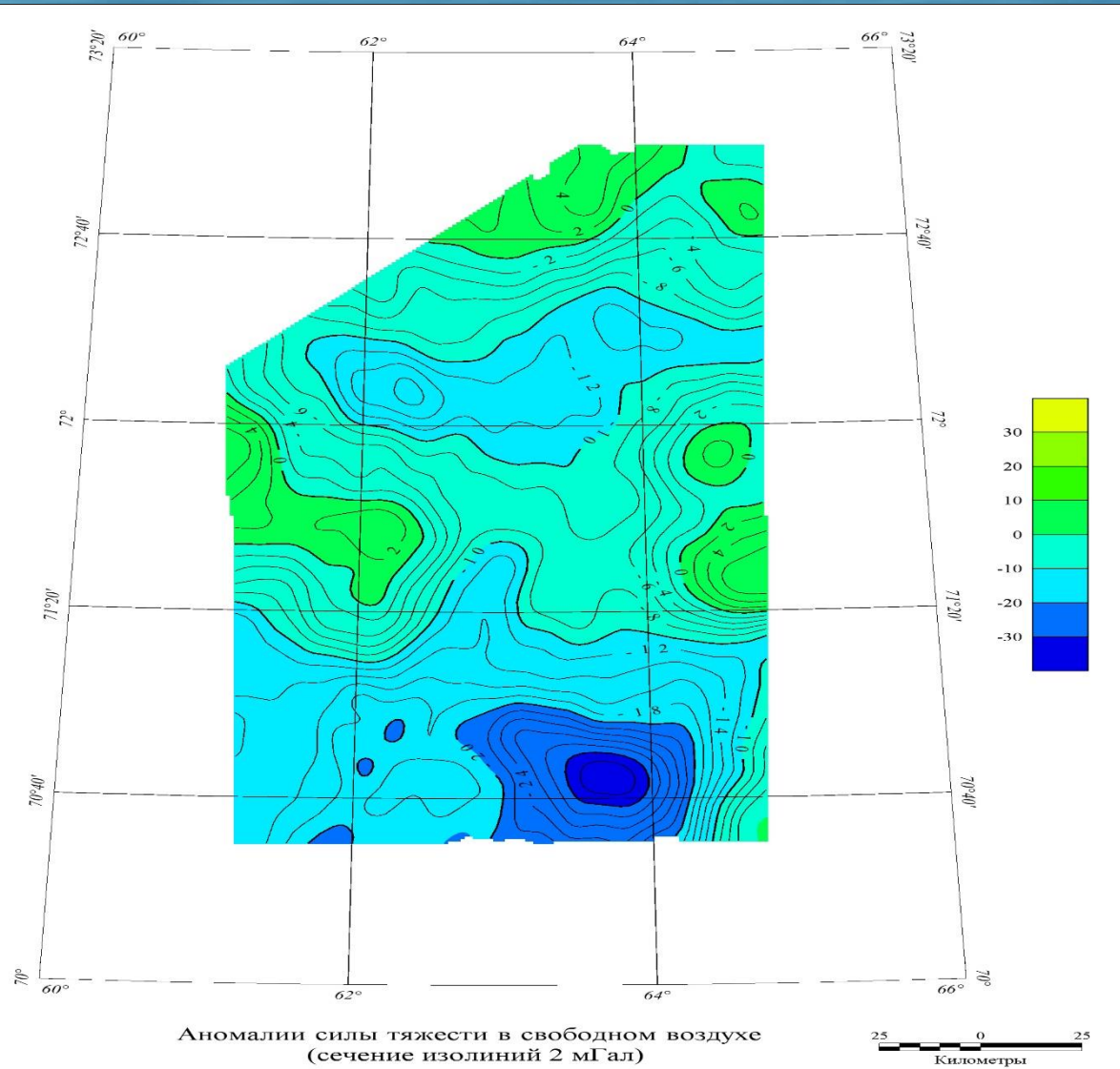
Карта невязок между измеренными АСВ и моделью EGM2008
полигоны 2006 - 10 гг.



Аэрогравиметрические съемки ИФЗ РАН акватории Карского моря

- ИФЗ РАН с 2010 по 2013 года выполнил аэрогравиметрические съемки акватории Карского моря. Съемки были выполнены впервые и были получены гравиметрические карты в свободном воздухе масштаба 1:200 000. Было выполнено сравнение с существующими моделями аномалий на этот регион.

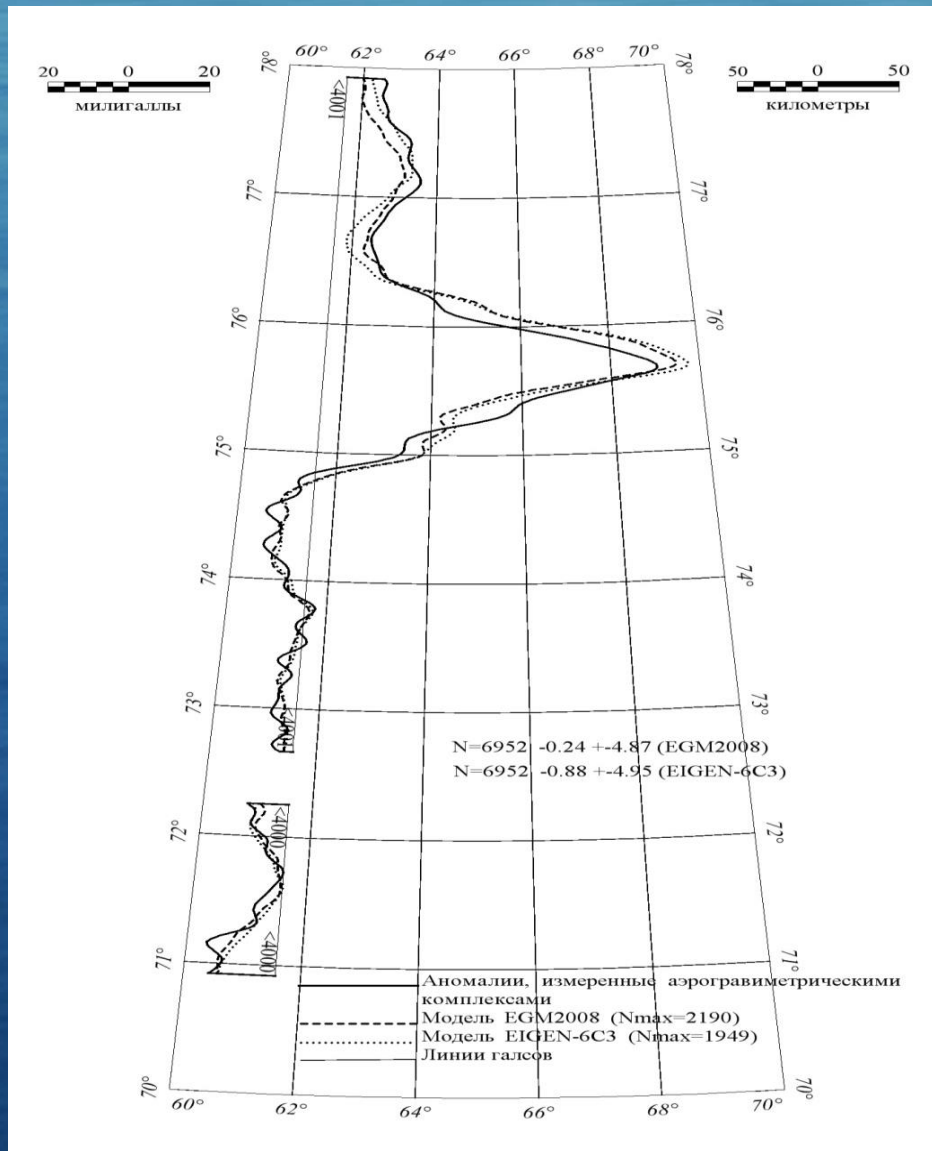
Карта аномалий в свободном воздухе на район Карского моря



Проверка значений сферических моделей над акваторией Карского моря

ИФЗ РАН в 2014 году выполнил маршрутную аэрогравиметрическую съемку акватории Карского моря до широты архипелага островов Земли Франца Иосифа. Съемка была выполнена впервые. Было проведено сравнение с существующими моделями аномалий на этот регион.

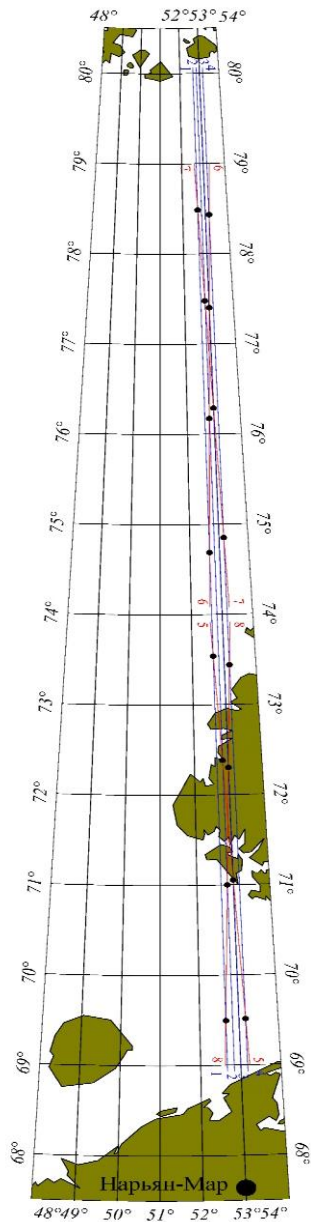
Пример полета от аэродрома Амдерма до ЗФИ



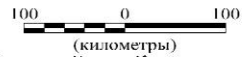
Проверка значений сферических моделей над акваторией Баренцева моря

ИФЗ РАН 2021 году выполнил аэрогравиметрическую съемку акватории Баренцева моря до широты архипелага островов Земли Франца Иосифа. Съемка была выполнена впервые. Было выполнено сравнение с существующими моделями аномалий на этот регион.

Расположение профилей съемки от Нарьян-Мара до ЗФИ



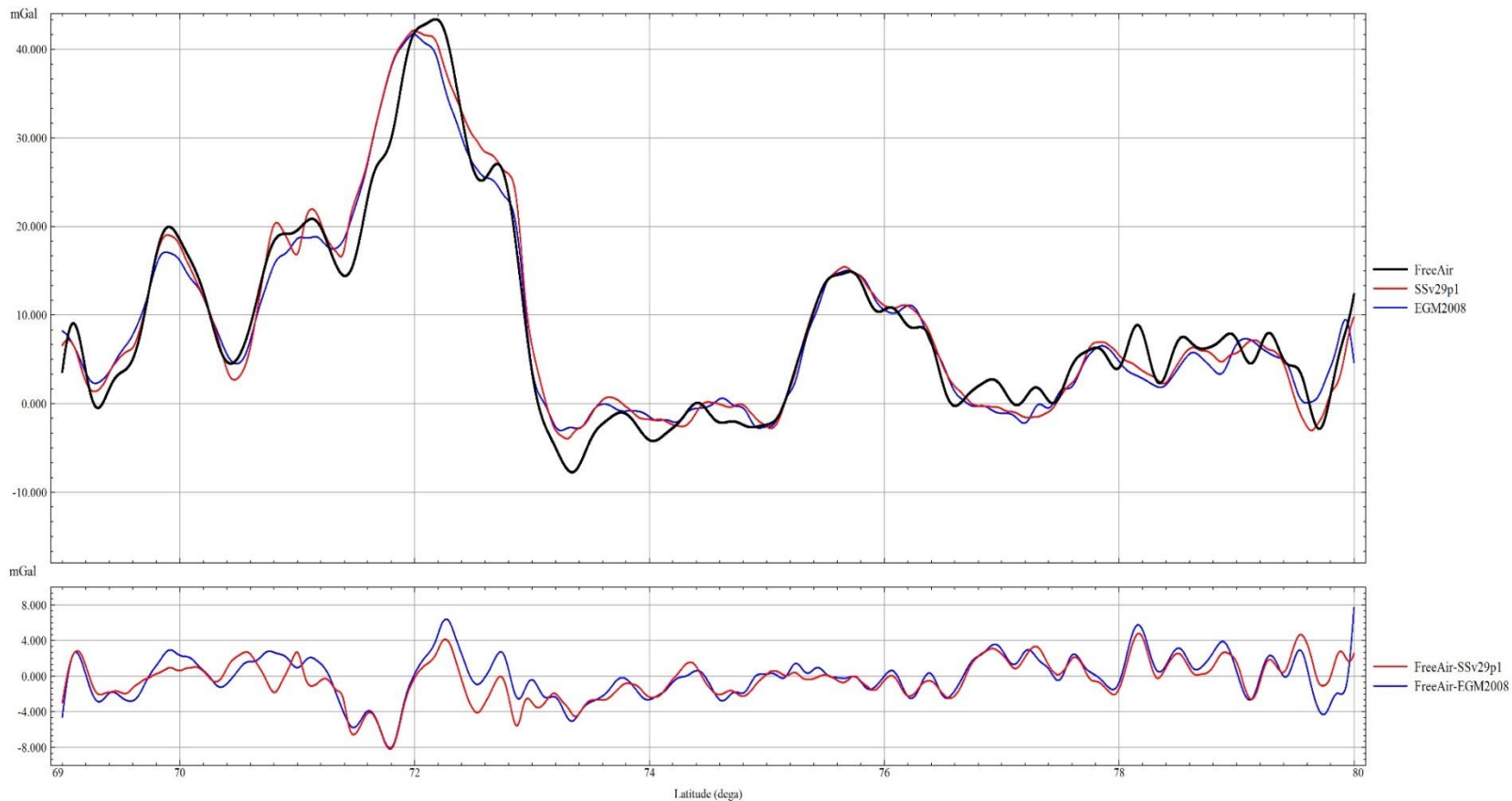
Полигон 2021 г. Нарьян-Мар - Земля Фрацца Иосифа

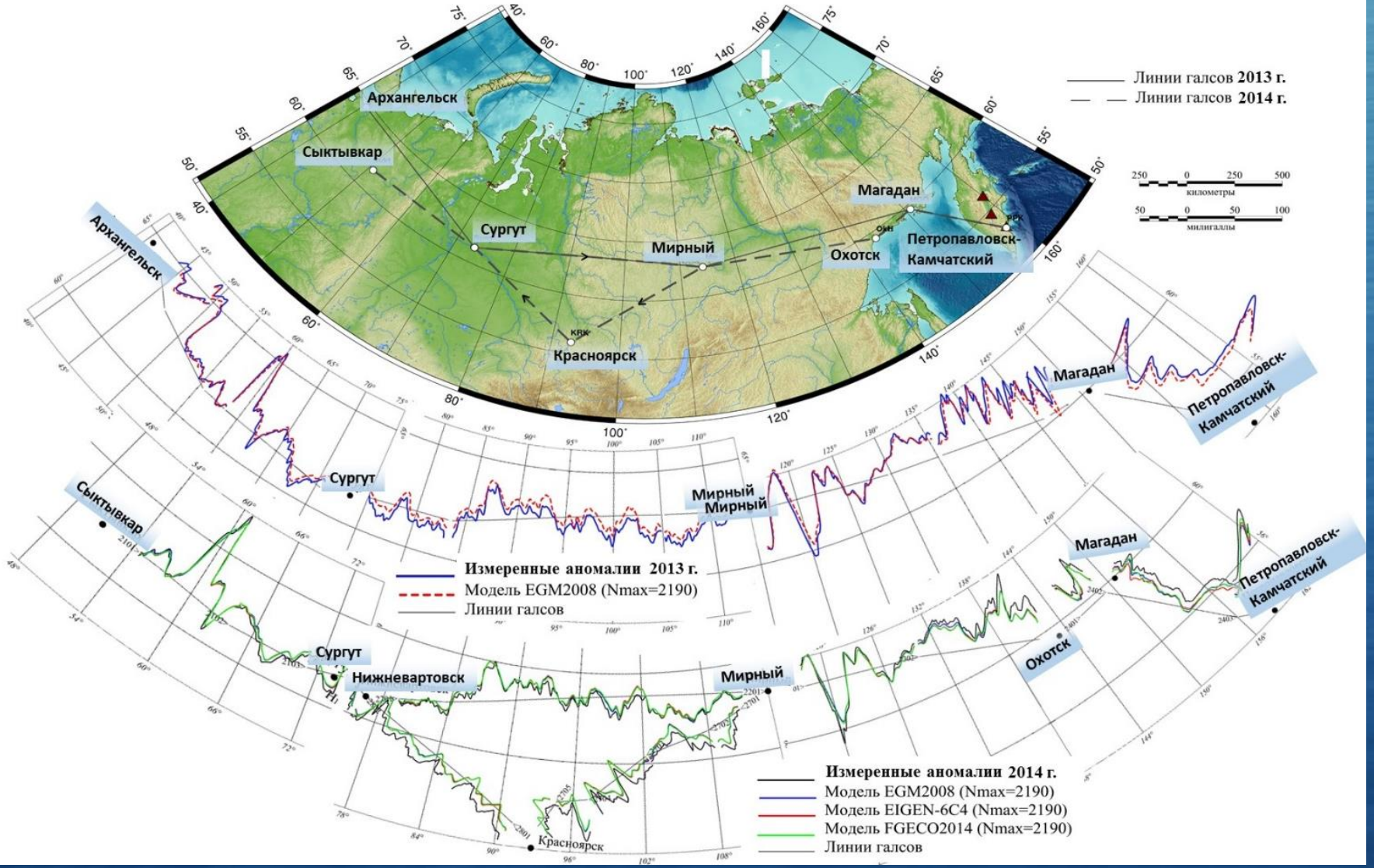


Проекция Гаусса-Крюгера, зона 9

Пример профиля в аномалиях от аэропорта Нарьян-Мар до ЗФИ

Гале 102





Выводы по материалам аэрогравиметрических съемок

Разработанные ИФЗ РАН методики аэрогравиметрических съемок позволяют:

- выполнять аэрогравиметрические съемки в труднодоступных районах суши и переходных зонах суша-океан;
- выполнять сравнение значений аномалий высокостепенных моделей с полученными картами аномалий в труднодоступных районах суши и переходных зонах суша-океан;
- выполнять сравнение значений аномалий высокостепенных моделей с полученными аномалиями на протяженных маршрутных профилях без базовых GPS станций.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В настоящее время несмотря на рост разрешающей способности и достоверности современных моделей основным способом высокоточного определения параметров гравитационного поля в высокоширотной Арктике все еще решается прямыми инструментальными измерениями с различных носителей.

Современные глобальные модели в Арктическом регионе требуют комплексной проверки и оценки по данным выполненных измерений.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ



РНФ
Российский
научный фонд

