

АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА В АРКТИКЕ

Конешов В.Н.¹, Дробышев Н.В.¹, Железняк Л.К.¹, Михайлов П.А.¹, Макушин А.В.¹,
Непоклонов В.Б.^{1,2}, Погорелов В.В.¹, Соловьев В.Н.¹, Спесивцев А.А.², Дробышев
М.Н.¹, Вязьмин В.С.³

¹ *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики
Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН, Москва, Россия),
Лаборатория гравиметрических измерений ИФЗ РАН*

² *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский государственный университет геодезии
и картографии» (МИИГАиК, Москва, Россия)*

³ *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Московский государственный университет имени
М.В. Ломоносова» (МГУ, Москва, Россия), Лаборатория управления и навигации
Механико-математического факультета МГУ
slavakoneshov@hotmail.ru*

Развитие Арктической зоны России является важнейшей актуальной задачей, очень остро стоящей сегодня перед нашей страной по ряду причин (напр., [1]). Безусловно, Арктика - это мощная минерально-сырьевая база. Месторождения полезных ископаемых здесь требуют не только применения стандартных геолого-геофизических методов поиска и разведки, но также создания специальных технологий и приборов, позволяющих эффективно проводить исследования в особых географических и крайне тяжелых климатических условиях арктических акваторий и береговой зоны. Дальнейшая добыча напрямую связана с разработкой специальных комплексов – буровых, терминалов, флота, способных безопасно функционировать в условиях полярных широт.

Учитывая регресс в социальном развитии большинства населенных пунктов и обитаемых стационаров в пост-советское время, можно сказать, что нам предстоит заново прийти в Арктику. Многие задачи, хотя и на современном уровне, практически аналогичны тем, которые стояли перед великими советскими полярными исследователями. Среди них и организация северного морского пути, и разведка и разработка месторождений углеводородов в особых условиях, и повышение эффективности поисковых работ, и крайняя необходимость наращивания сети полярных аэродромов и портов, а также метеорологическое обеспечение и обеспечение безопасности.

Изучение гравитационного поля Земли в Арктике позволяет решать ряд задач фундаментальной науки, практической геолого-геофизической разведки и обороны:

- уточнение фигуры Земли и её глубинного строения;
- выявление плотностных неоднородностей и геологических структур, оценки перспективности регионов на наличие рудных и углеводородных месторождений, а также их поиска и разведки по аномалиям силы тяжести (АСТ);
- учет АСТ при пусках межконтинентальных баллистических ракет, а также при коррекции показаний инерциальных навигационных систем.

Гравиразведка, особенно выполняемая в комплексе с другими видами геофизических исследований, является мощным инструментом для поиска месторождений полезных ископаемых и выделения крупных целевых объектов [2].

Сотрудники Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН традиционно принимают участие в гравиметрических исследованиях арктических акваторий. При их непосредственном участии разработано 3 поколения отечественных морских

гравиметров, которые хорошо зарекомендовали себя при решении поисковых и стратегических задач.

С 2006 года ИФЗ РАН занимается аэрогравиметрическими исследованиями в высоких широтах Арктики. По сравнению с морской съемкой, исследования с воздуха обладают большей эффективностью с точки зрения их оперативного выполнения и обеспечивают возможность проводить измерения с использованием одного и того же комплекса оборудования на суше, на море, а также в зонах шельфа. На сегодняшний день можно с уверенностью говорить о «промышленной» съемке с борта самолета вплоть до масштаба 1:100 000...200 000 [3, 4], что является достаточным для создания геофизической основы для поисковых исследований на углеводороды на шельфе [5].

Морская съемка, как правило выполняется в комплексе с сейсмическими исследованиями и позволяет получать значительно более крупный масштаб, тем не менее, в соответствии с методическими особенностями ее проведения необходимо периодически выполнять заходы в порты с известными значениями силы тяжести для устранения смещения нуль-пунктов гравиметров. Данная процедура также приводит к увеличению стоимости съемочных работ.

Аэрогравиметрическая съемка с самолета требует непосредственного базирования на одном из близлежащих аэродромов, таким образом необходимость контроля корректности работы измерительной аппаратуры может быть решена при проведении ежедневных опорных измерений во время стоянки самолета непосредственно до и после вылета. Опираясь на достаточно богатый многолетний отечественный опыт выполнения морских гравиметрических исследований на акваториях Мирового океана, включая высокие широты Арктики, а также зоны высокого градиента аномалий силы тяжести (субдукционные зоны), можно уверенно заключить о пригодности современных морских гравиметрических комплексов для проведения гравиметрической съемки на высоком уровне. Российская аппаратура для проведения аэрогравиметрических измерений в последнее десятилетие проходит стадию активного совершенствования. Важным вопросом выбора направлений повышения детальности съемки с самолета является всестороннее изучение технических особенностей последних поколений приборов в самых разнообразных географических условиях и геотектонических обстановках.

Исследования гравитационного поля Земли с самолета активно проводятся за рубежом. Объем аэрогравиметрических работ, выполненных западными коллегами в Арктике, является весьма представительным. Например, в ходе Программы Арктических аэрогравиметрических исследований («Arctic airborne gravity measurement program», Naval Research Lab., Washington, D.C., USA) [6, 7] было выполнено более 210 тыс. погонных км съемки, покрывающей почти 2/3 площади Северного Ледовитого океана.

В цитируемой работе [7] проанализированы аэрогравиметрические исследования на двух группах протяженных профилей и обсуждено соответствие между моделью гравитационного поля Земли ERS 1998, полученной по результатам спутниковых измерений проектов ERS 1 и 2 (обеспечивают покрытие данными до 81,5 град. С.Ш.), данными аэрогравиметрических съемок 1996 г. и данными канадских ледовых съемок вдоль них. Аэрогравиметрические исследования выполнялись гравиметрами LaCoste and Romberg (LaCoste and Romberg LLC, США) [8]. По трем профилям первой группы, которые ориентированы на ССЗ, имеют протяженность около 600 км и проходят с 71 до 75 град. С.Ш. в районе моря Бофорта, показано, что имеется хорошее качественное соответствие между гравиметрическими измерениями, полученными по всем трем методам. Несмотря на то, что среднеквадратическое отклонение между ледовыми наблюдениями и результатами аэросъемок примерно на треть меньше, чем по сравнению с данными модели ERS 1998, (1,86 и 2,64 мГал, соответственно), аналогичное расхождение между спутниковой моделью и аэроизмерениями составили

2,55 мГал. Это свидетельствует о том, что при создании глобальной модели с использованием спутниковых данных для упомянутого региона большой вклад в коррекцию финальной модели поля мог внести учет результатов ледовых и морских съемок [9,10]. В пользу этого предположения также говорит и наличие короткопериодных аномалий в данных, соответствующих модели ERS 1998, учитывая, что разрешение гравиметрических данных оценено авторами длиной волны не менее 15 км. В этой связи данные аэросъемки и данные морских и ледовых съемок (один пункт на 3-10 км²) можно рассматривать в качестве независимых измерений, а отклонения модели ERS 1998 считать обусловленными региональными особенностями гравитационного поля. Обсужденная в работе степень соответствия пространственных морских данных показывает, что когерентность падает до 0,5 к ~28 и ~39 км для аэросъемки и модельного поля, соответственно. Такие значения могут говорить о том, что детальность данной аэросъемки далека от совершенства.

Интересным представляется другой эксперимент, описанный в цитируемой работе. Вторая группа из 5 профилей, расположенных с 76 по 79 град. С.Ш., была выбрана из аэрогравиметрической съемки 1997 г. Профили также имели длину около 600 км и проходят над зоной высокоградиентных аномалий Чукотского бордерленда [11] и акваторией Канадской котловины, которая характеризуется более спокойными вариациями амплитуд аномалий силы тяжести. Исследуемая область включала один из маршрутов атомной подводной лодки Cavalla проекта подводных исследований SCICEX (SCience ICe EXercise) [12], что позволило авторам [7] проанализировать измерения аномалий силы тяжести по результатам спутниковых, аэро- и подводных наблюдений. В данном обзоре получено однозначное увеличение амплитуд аномалий поля тяжести аэросъемки по сравнению с данными модели ERS 1998 при качественном соответствии их общей картины. Анализ подводных измерений показал большую детальность в области высокочастотных аномалий и превышение в значениях их амплитуд ~20 мГал по модулю на резкоградиентных структурах по сравнению с данными аэросъемки. Следует отметить, что по сравнению с аномалиями модели ERS 1998, распределение аномалий силы тяжести по результатам аэросъемки носит также более сглаженный характер, что свидетельствует о невысоком пространственном разрешении выполненных съемок.

Рене Форсбергом с коллегами в 1999-2001 гг. выполнены съемки вблизи побережья Гренландии, в ходе которых была достигнута точность ~2 мГал с пространственным разрешением около 6 км [13], что существенно превысило ранее выполненные [14,15] измерения (погрешность ~5 мГал при пространственном разрешении ~20 км). В ходе работ 1999-2001 гг. также проводились измерения вблизи архипелага Шпицберген [16,17]. Новые аэрогравиметрические данные хорошо соответствовали результатам морских съемок 90-х годов [18]. Проведенные исследования были успешно применены для уточнения и проверки более ранних съемок на различных носителях в ходе проекта по созданию детальной глобальной модели аномалий гравитационного поля Земли в редукции в свободном воздухе с разрешением 5'x5' ArcGP-2002 [19,20]. Благодаря уникальной возможности использования данных аэрогравиметрии масштабного проекта «Arctic airborne gravity measurement program» [21], а также других данных доступных гравиметрических исследований, в ArcGP-2002 вошла область полярной шапки выше 81,5 градуса С.Ш., не обеспеченная надежными данными миссий ERS. Глобальная модель гравитационного поля Земли (ГПЗ), созданная с использованием данных миссии GOCE [22], показала существенное возрастание коэффициента корреляции цифровых моделей геоида в областях арктической и антарктической полярных шапок выше 83 градуса [23]. Для устранения данных проблем в районе Южного полюса группой Р.Форсберга предложена к проведению аэрогравиметрическая съемка, которая позволила бы существенно дополнить

спутниковые данные и повысить качество глобальной модели гравитационного поля EGM 2008 для высоких широт.

В связи с актуализацией проблемы переопределения внешней границы континентального шельфа для уточнения строения земной коры в районе хребта Ломоносова в ходе выполнения проекта Lomgrav-09 западными коллегами был выполнен комплекс исследований [24], включающих аэрогравимагнитную съемку на площади более 550 тыс. км². Область съемки 2009 г. охватывает также район Северного Полюса, на который претендуют Россия и Норвегия. Аэрогравиметрические исследования выполнялись усовершенствованными аэрогравиметрами LaCoste and Romberg S99 и SL1 по сетке параллельных галсов с расстоянием между маршрутами 12-15 км субпараллельно хребту Ломоносова с норвежской стороны Северного Ледовитого океана и тремя секущими профилями. В результате после пост-обработки данных была достигнута точность съемки 1,7 мГал. Компиляция с использованием результатов более ранних измерений, проведенных на суше, со льда и с подвижных оснований позволили создать новую карту аномалий в свободном воздухе с на сетке 2,5x2,5 км и длиной корреляции 18 км. На основании этих результатов авторами [24] вблизи центральной части хребта Ломоносова (Гренландский сектор, 80-89 град. С.Ш.) были выявлены плотные системы линейных положительных аномалий через всю центральную часть хребта Ломоносова, некоторые из них трассируются до 300 км. Несколько линейных аномалий, не выраженных в батиметрии были проинтерпретированы (с учетом полученных сейсмических данных) как предположительно рифтовые структуры, погребенные под кайнозойскими осадками. Новые гравиметрические и магнитометрические данные, по мнению авторов, не свидетельствуют в пользу существования значимого сдвигового или трансформного разлома между хребтом Ломоносова и полярной окраиной моря Линкольна. Подобные исследования с целью выяснения тектонической структуры и происхождения бассейна Амундсена, а также положения континентальной окраины вблизи Гренландии описаны в работе [25].

Для обоснования уточнения границ континентального шельфа РФ аэрогравимагнитометрические исследования проводились над хребтом Ломоносова и поднятием Менделеева в 2005 и 2007 гг коллективом ВНИИОкеангеология [26, 27]. Аэрогравиметрические исследования 2005 г. выполнялись аэрогравиметрическим комплексом, включавшим 3 струнных гравиметра ГАМС, ГСД-М и струнный барометр (разработка ВНИИГеофизика). Аэросъемка над поднятием Менделеева проводилась на площади 240 x 640 км (~75 - 78 град. С.Ш.) по субмеридиональным профилям с межгалсовым расстоянием 10 км и ортогональными им секущими галсами через 20-30 км. Для детализации центральной части района было выполнено несколько дополнительных субмеридиональных галсов, обеспечивших сгущение межмаршрутного расстояния до 5 км. Аэрогравиметрическая съемка 2007 г. проводилась более современными гравиметрами «Чекан-АМ» (разработка ЦНИИ «Электроприбор», Россия). Исследуемая площадь располагалась вдоль геотраверса «Арктика -2007» в зоне сочленения хребта Ломоносова с прилегающим шельфом и покрывала участок ~78-84 град. С.Ш. (100 x 720 км) [27]. Используемые для увеличения точности позиционирования наземные корректирующие (или базовые) станции (НКС) были расположены на расстоянии около 500 км и 900-1200 км от районов работ 2005 и 2007 гг., соответственно, что, по мнению авторов, не позволило качественно реализовать дифференциальный режим (метод коррекции определения координат подвижного СНС-приемника с использованием наземных корректирующих станций). При этом гравиметрические комплексы «Чекан-АМ» показали стабильную работу в условиях высоких широт.

Из вышеизложенного можно заключить, что при проведении высокоширотных исследований в условиях Арктики существует определенная специфика планирования съемок, обуславливающая предпочтение субмеридиональных маршрутов при использовании регулярных сеток галсов, так как это позволяет эффективнее расходовать полетное время с учетом базирования экспедиции на континентальных и островных аэродромах, где есть возможность обеспечения летных работ необходимым количеством топлива. Это приводит к выполнению полетов на длинных профилях с затруднительным обеспечением равноудаленного наземного сопровождения.

Крайне важным условием является необходимость использования надежной гравиметрической аппаратуры, способной обеспечить высококачественные измерения в условиях Арктики. Дело в том, что определенной проблемой является часто используемая принудительная коррекция гироплатформы гравиметра по показаниям спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС, которые в свою очередь, могут содержать значительную помеховую составляющую, связанную с сильными возмущениями ионосферы, а также с особенностями конфигураций орбитальных группировок спутников.

Покрытие высокоширотных районов надежными данными аномалий силы тяжести другими методами (морские, наземные и ледовые съемки, модели с использованием спутниковых наблюдений) также нуждается в оценке пригодности для использования в качестве контрольных измерений. Следует отметить, что в последние несколько лет качество и детальность глобальных моделей гравитационного поля Земли существенно повысились, что делает эти модели эффективным инструментом для оценки систематических погрешностей съемки, а также позволяет ожидать возможности их использования для оценки влияния аномального поля «дальней зоны», корректный учет которого необходим при построении итоговой карты выполненных исследований.

Основными направлениями аэрогравиметрических исследований в части развития этого метода являются:

- оценка особенностей работы измерительного оборудования и разработка методических приемов для выполнения съемки требуемого масштаба;
- оценка пригодности современных глобальных моделей гравитационного поля Земли для контроля качества аэрогравиметрических данных, определение региональных особенностей;
- оценка влияния удаления от базовых станций, обеспечивающих дифференциальный режим коррекции позиционирования воздушного судна;
- разработка методик надежного позиционирования или повышения достоверности позиционирования без использования наземных базовых станций;
- совершенствование методов представления комплексных моделей аномального гравитационного поля Земли по результатам аэросъемок и данным измерений другими методами (подробнее - ниже).

В этой связи проведение детальных исследований на протяженных контрольных профилях представляется крайне информативным.

При выполнении аэрогравиметрических измерений масштаба 1:200 000 и мельче по результатам анализа особенностей современного отечественного оборудования и проведенных нами сравнительных испытаний наше предпочтение было отдано аэрогравиметрическим комплексам типа GT-1A/2A (разработка НТП «Гравиметрические технологии», Россия) [28]. Эти комплексы хорошо зарекомендовали себя в ходе исследований по уточнению фигуры Земли над акваториями Баренцева и Карского морей, а также Архипелага островов Новая Земля, выполненных коллективом Лаборатории гравиинерциальных измерений ИФЗ РАН в 2006-2013 гг. с борта созданного самолета-лаборатории на базе воздушного судна типа

АН-26 БРЛ (рис.1) [29]. Следует отметить, что данные приборы также с успехом применяются для выполнения производственных работ в ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика», а также целым рядом зарубежных компаний.

Изучение особенностей съемки данными гравиметрами позволило нам сделать ряд рекомендаций по усовершенствованию измерительного оборудования, программно-математического обеспечения, используемого как в ходе съемки, так и на всех этапах последующей обработки результатов.

Выполнение работ по уточнению фигуры Земли в районе полуострова Камчатка в 2013-2014 гг. показало уверенную работу гравиметрических комплексов типа GT 1A/2A в зон крайне высокого градиента силы тяжести [30-32] и способность обеспечивать измерения для съемки масштаба 1:200000, соответствующей 1 классу [31].

Выявленные особенности работы оборудования позволили также предложить ряд специфических методических приемов, целесообразных при проведении аэрогравиметрических исследований упомянутыми комплексами в приполюсном районе, таких как предпочтительно меридиональное «веерное» направление съемочных галсов, целесообразное для обеспечения требуемой корректировки платформы гравиметра и упрощения вычисления поправки Этвеша [33]. В частности, наш опыт работы с указанными гравиметрическими комплексами говорит в пользу проведения экспериментальных исследований процессов отработки курса и тангажа гиростабилизированными платформами гравиметров при «штатном» совместном использовании с коррекцией спутниковыми навигационными системами.

Для отработки указанных методических приемов в ходе летных работ 2013 г. нами были выполнены измерения по маршруту «Архангельск- Амдерма- 78 град. С.Ш. (на долготе поселка Амдерма, НАО) - Амдерма – Архангельск» (рис.2 и 3). Участок профиля по маршруту «Архангельск-Амдерма» сопровождался параллельными GPS-наблюдениями на наземной базовой станции, размещенной в районе а/п «Талаги» (г. Архангельск). Позиционирование измерений на борту самолета-лаборатории на данном перелете проводилось в соответствии с отработанной методикой [29]. Из а/п «Амдерма» была выполнена площадная съемка над участком акватории Карского моря с использованием базовой станции в поселке Амдерма. Перелет по маршруту «Амдерма-78 град. С.Ш.» (прямой и контрольно-возвратный) пролегал в направлении меридиана по долготе 61,5 град. В.Д., частично проходя над изученной площадью (рис.3). Для исследования возможности позиционирования гравиметрических комплексов на борту воздушного судна без использования наземных базовых станций GPS коррекция инерциального управления гравиметра в составе измерительного комплекса на самолете осуществлялась четырехантенным GPS-приемником SigmaQ (SigmaQ for Quattro G3D, производство JAVAD GNSS Inc.). На обратном перелете из а/п Амдерма в Архангельск также использовался СНС-приемник SigmaQ.

Полученные данные позволили провести экспериментальную проверку работоспособности аэрогравиметрических комплексов типа GT 1A/2A в условиях высоких широт Арктики путем сравнения измерений с результатами площадной съемки в рамках выполненного полигона, а также с современными глобальными моделями гравитационного поля Земли EGM2008 и EIGEN-6C3 [34]. Выполненные измерения по указанному субширотному профилю показали информативность и целесообразность проведения аналогичных измерений на сверхдлинных профилях, а также несоответствие модельных и измеренных аномалий поля севернее 76 град. С.Ш. Важным итогом данной работы является принципиальная возможность осуществления коррекции гиростабилизированных платформ гравиметров для отработки курса по показаниям GPS с разнесенными антеннами.

Ввиду отсутствия экспериментальной оценки максимально допустимого расстояния от самолета-лаборатории до базовой станции при условии обеспечения необходимой

точности съемки, эти исследования были продолжены при подготовке и проведении съемочных работ в области зоны перехода «океан-континент» вблизи восточного побережья Камчатки. Размещение НКС было обусловлено необходимостью оперативного развертывания сети станций, удобством доставки оборудования, а также наличием возможности обеспечения их стабильной работы. Съемочные профили протяженностью около 400 км были выбраны в крест береговой линии и глубоководного желоба. Ввиду отсутствия обитаемых островов в районах съемок базовые станции были расположены лишь с западного края от исследуемых площадей. В результате анализа площадной съемки 2013 г. не было отмечено нарастания систематической ошибки в позиционировании самолета-лаборатории в зависимости от удаления от береговой линии. Сравнение аэрогравиметрических данных с моделью EGM2008 позволило продемонстрировать, что, несмотря на растущие точности глобальных моделей гравитационного поля Земли, в резкоаномальных областях различия в наблюдаемых значениях могут превышать 30 мГал, что является существенным и не позволяет в настоящее время говорить о сравнимости точности аэрогравиметрических исследований и современных глобальных моделей на основе спутниковых наблюдений в масштабе субрегиональных исследований. Анализ разностей между аэро-наблюдениями и моделью также показал, что на участках площади с относительно спокойными вариациями аномалий силы тяжести (например, в районе возвышенности Обручева в Тихом океане) не наблюдается значительных расхождений в амплитудах аномалий. Этот вывод позволяет рассчитывать на эффективность применения методики оценки смещения нуль-пунктов морских гравиметров, описанный нами в работе [35].

Исследования по оценке точности моделей ГПЗ и определению влияния удаления от базовых станций были продолжены на трансконтинентальных перелетах от аэропорта, в котором проводился монтаж оборудования (2013 г. - а/п «Архангельск (Талаги)», 2014 г. – а/п «Сыктывкар».) в аэропорт «Петропавловск-Камчатский» и обратно (рис.3). Маршрут перелетов 2013 г. проходил через аэропорты Сургута, Мирного (Якутия) и Магадана. На перелете на восток базовой станции не использовалось, на обратном перелете по маршруту «Петропавловск-Камчатский-Магадан-Мирный» использовалась только одна базовая станция, размещенная в г. Петропавловске-Камчатском. Пост-обработка материалов съемки показала, что в зависимости от удаления от базовой станции ошибка в определении высоты полета нарастает незначительно (учитывая примерное соответствие качества измерений масштабу 1:1000000). Таким образом, в ходе эксперимента 2013 г. не удалось оценить предельно допустимое расстояние от подвижного носителя до базовой станции. Несмотря на хорошее соответствие между моделями гравитационного поля Земли EGM 2008 и EIGEN-6C3 вдоль всего трансконтинентального перелета 2013 г., сравнение модельных значений аномалий поля с результатами аэрогравиметрических измерений показало более сглаженный характер моделей. На участке «Сургут-Мирный» при перелете на восток и обратно выявлена систематическая погрешность порядка 8-10 мГал относительно данных аэрогравиметрических измерений [36]. Данные наблюдения коррелируют с выводом авторов [5] о возможности проведения высокоточной съемки при размещении базовых станций на значительном удалении от площади работ, полученным на основании анализа результатов съемки ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика» над центральной частью акватории Охотского моря по протяженным меридиональным профилям длиной порядка 9 градусов по широте при удаленности базовых станций от района работ, достигавшей 700 км, ввиду отсутствия более оптимального варианта их размещения. С учетом опыта 2013 г., запланированные исследования прошлого года предполагали обеспечение измерениями на базовых станциях в ходе трансконтинентальных перелетов на восток и обратно. Маршрут перелета в Петропавловск-Камчатский в 2014

г. пролегал через города Сыктывкар, Сургут, Красноярск, Мирный (Якутия) и Охотск. На перелете в г. Петропавловск-Камчатский наземные измерения проводились на базовых станциях в Петропавловске-Камчатском и в п.Козыревск, на обратном перелете – вблизи п. Мильково и в поселке Козыревск (рис. 4). Профили, построенные на указанных трансконтинентальных перелетах, были обработаны в 2014 г. Это позволило получить дополнительные данные для последующего сопоставления с существующими моделями гравитационного поля. Результаты исследований планируется опубликовать в 2015 г.

Анализ дальнего действия базовых станций показал, что базовые станции вносят положительный эффект для повышения точности позиционирования по крайней мере до 4 тыс. км (при соответствующей точности выполненных измерений). На перелетах на восток и обратно получено, в что при приближении к Сыктывкару вклад помеховой составляющей значительно нарастает и не обеспечивает коррекции координат самолета-лаборатории в дифференциальном режиме.

На перелетах 2014 г. была оценена возможность применения технологии Precise Point Positioning (PPP) [37]. PPP позволяет определять абсолютные координаты по данным только с одного СНС-приемника с использованием файлов «точных» эфемерид, получаемых на сервере службы IGS, необходимых для исключения ошибок координат спутников.

Сравнение поправок в значения высоты полета на участках «Охотск-Петропавловск-Камч.», «Сургут-Сыктывкар» и «Сургут-Нижневартовск» трансконтинентальных перелетов 2014 г. при использовании дифф.режима и методом PPP с применением программного обеспечения gLAB [38] приведено на рисунке 5. Можно отметить, что на перелете «Охотск-Петропавловск» со стороны Петропавловска, (рис. 5а), то есть, при приближении к наземным базовым станциям GPS, наблюдается различие в характере поведения разностей между некорректированным значением высоты и с коррекцией упомянутыми способами: если разность между данными по методу PPP нарастает при приближении к восточному краю маршрута, то при использовании дифф.режима она, напротив, падает. Разница в значениях поправки показывает, что PPP в данных измерениях корректирует высоту в большую сторону. Подобная закономерность также отмечается на перелете из Петропавловска-Камчатского на запад, при этом расхождения между обсуждаемыми корректирующими значениями уменьшились по амплитуде вдвое, а характер их изменения стал подобным.

Анализ семейства графиков (рис. 5б), соответствующих обсужденным поправкам, при рассмотрении перелета из аэропорта базирования в Сыктывкаре на восток и в обратном направлении позволяет отметить схожий характер PPP-коррекции на этом участке перелета, несмотря на то, что они состоялись с промежутком более месяца. Скачки на графиках, относящихся к дифф.коррекции, соответствуют уменьшению числа общих спутников, видимых бортовым приемником и базовыми станциями. Таким образом, можно сказать, что метод PPP обладает определенными преимуществами, так как использует дополнительную уточненную информацию о погрешностях и работает в условиях крайней удаленности от базовых станций, что обеспечивает его стабильность. Но различие в характере корректирующих поправок к наблюдаемым значениям высот, полученных с использованием дифф. режима вблизи расположения базовых станций, а также систематичное превышение определяемой высоты на 10-15 м в сравнении с обработкой в дифф.режиме не позволяет однозначно выступить в пользу его применимости на данном уровне развития этой технологии.

На сегодняшний день гравиметрическая съемка с самолета уступает по детальности морской гравиметрии. Следует учитывать высокую производительность аэрогравиметрии, что обуславливает целесообразность ее применения для построения карт перспективных площадей в масштабе 1:500 000 ...1:200 000. Важным доводом

является возможность обеспечения современных точностей позиционирования и проведение измерений с использованием современных гравиметрических комплексов по регулярной сетке галсов. В качестве иллюстрации применимости аэрогравиметрической съемки в решении задач поиска и доразведки месторождений УВ на шельфе на одном из перспективных участков в западной части Карского моря нами была рассмотрена возможность использования данных различных морских съемок 80-90-х гг. (рис.6) для построения карты АСТ регионального масштаба. Оцифрованным профилям выполненных морских гравимагнитных съемок были сопоставлены данные аномалий гравитационного поля в соответствии с моделью EGM2008. По полученным синтетическим данным были составлены карты, соответствующие масштабу 1:500 000, затем они сравнивались с исходной моделью EGM2008, приведенной к сетке аномалий того же масштаба. Таким образом проводилась оценка возможности создания карты заявленного масштаба только из условия достаточности покрытия (без учета погрешностей позиционирования, систематических погрешностей отдельных съемок и оценки достоверности имеющегося фактического материала). Оценка невязок показала, что отклонения в АСТ для синтетической карты, полученной по имеющейся конфигурации профилей, могут превышать 6 мГал. Расположение экстремальных отклонений тяготеет к площадям с более редким покрытием профилями. Стандартное отклонение при этом составило более 0,5 мГал. При использовании регулярной сетки широтных профилей с шагом 5 км стандартное отклонение составило 0,13 мГал, а максимальная амплитуда отклонений - около 1 мГал. Полученные невязки, в том числе, демонстрируют корректность используемой нами методики камеральной обработки наблюдаемых данных.

Аэрогравиметрические съемки предназначены для локального определения аномалии силы тяжести и других характеристик аномального гравитационного поля (потенциал, уклонение отвесной линии и пр.) в исследуемом районе. Широко распространено использование аномалий силы тяжести и их трансформаций для комплексной интерпретации геолого-геофизической информации с целью поиска и разведки полезных ископаемых. Трансформации являются наиболее распространенными способами преобразования и формального разделения полей и сводятся к фильтрации наблюдаемого поля с целью выделения полезной информации и подавления помех [39]. Многие трансформации, как известно, являются некорректными задачами, например аналитическое продолжение поля в нижнее полупространство, вычисление высших производных потенциальных полей. Для возможности построения их корректного приближенного решения требуется нелокальная информация о региональных особенностях гравитационного поля и ее учет при обработке аэрогравиметрических данных. В свете появления глобальных моделей высокого пространственного разрешения задача комбинирования разномасштабных гравиметрических данных становится весьма актуальной. Информацию о гравитационном поле Земли с использованием глобальных моделей, как правило, получают из данных, основанных на представлении поля силы тяжести в виде ряда из сферических (шаровых) функций. Однако, использование глобальных моделей в виде гармонического разложения технически сложно и не всегда корректно. Сравнительно новые подходы к локальному определению аномалии силы тяжести основаны на использовании сферических вейвлет-разложений (напр., [40]). На основе этого метода возможна разработка эффективных и быстрых алгоритмов комбинирования разномасштабных данных аэрогравиметрии и глобальной модели гравитационного поля Земли, позволяющих определять характеристики аномального поля силы тяжести в локальном районе съемок, пригодных для геолого-геофизической интерпретации.

Отличительным свойством сферического вейвлет-разложения [40] является возможность пространственно-частотной локализации функции, что удобно при работе с локальными аэрогравиметрическими данными. Основу концепции составляет набор базисных функций специального вида (так называемых скейлинг-функций и вейвлетов), определенных во внешнем пространстве сферы. В частности, скейлинг-функции и вейвлеты в этой концепции являются гармоническими функциями вне сферы и, таким образом, могут использоваться при решении разных задач трансформации. Основным достоинством данного метода применительно к задаче комбинирования разномасштабных гравиметрических данных является свойство многомасштабного анализа, на основе которого возможно выделение общих участков спектра (в разложении по шаровым функциям) аномалии силы тяжести, получаемой из аэрогравиметрических данных и из глобальной модели поля. За счет этого становится возможным повысить точность локального определения аномалии силы тяжести в районе съемок [41].

С использованием указанной технологии по данным глобальной модели гравитационного поля и результатам аэрогравиметрических съемок на участок площадной съемки 2013 г. над акваторией Карского моря была построена комбинированная модель аномалий гравитационного поля. Карта аномалий, восстановленной по скейлинг-коэффициентам, оцененным из авиа-данных на максимальном уровне детализации $J=11$, приведена на рисунке 7а. Среднеквадратическое отклонение восстановленных аномалий гравитационного поля от наблюдаемых составило $\sim 0,05$ мГал.

Сравнение результатов выполненной авиасъемки с комбинированной моделью и эталонной моделью, построенной с использованием морских измерений (рис. 7в) показывает, что данный инструмент нуждается в дальнейшей разработке и позволяет ожидать повышения эффективности обработки комплекса гравиметрических данных (спутниковых, аэро- и морских измерений) в рамках единого подхода комплексирования методов разной детальности. Очевидно, данная технология может быть полезна на всех стадиях работы с данными: при планировании, на этапе пост-обработки и на этапе интерпретации материалов.

В ходе выполнения проекта в 2014 г. была проанализирована целесообразность проведения аэрогравиметрических исследований по профилю «Амдерма-Земля Франца-Иосифа - Северный Полюс» и рассмотрена возможность обеспечения наземного сопровождения базовыми станциями. Эти исследования позволили бы получить экспериментальную оценку работоспособности гравиметрических комплексов GT-1A/2A в высоких широтах Арктики, оценить соответствие современных глобальных моделей гравитационного поля Земли, построенных по данным спутниковых измерений, а также на фактическом материале изучить возможность повышения точности позиционирования с использованием обсужденных технологий коррекции определения положения спутниковыми навигационными системами ГЛОНАСС/GPS.

Таким образом, в ходе выполнения проекта «Аэрогравиметрическая съемка в высоких широтах Арктики» Программы Президиума РАН 44П "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации" в 2014 году были получены следующие основные результаты:

- 1) По материалам работ 2013 г. по профилю «Амдерма -78 град. С.Ш.» оценена применимость отечественных авиационных гравиметров типа GT-1A/2A [42] и приборно-методического обеспечения в приполярных районах. Рассмотрена возможность применения четырех-антенного GPS-приемника Sigma-Q (JAVAD) для позиционирования самолета-лаборатории без корректирующих базовых станций [34].

2) Проведено сравнение аэрогравиметрических данных на протяженных профилях с современными глобальными моделями гравитационного поля Земли, построенными на основе спутниковых наблюдений. Показано, что спутниковые модели имеют качественно хорошее совпадение с измеренными данными на трансконтинентальном и меридиональном профилях. Установлено, что в резкоаномальных областях различия модельных и наблюдаемых значениях могут превышать 30 мГал. Для выявления региональных особенностей и оценки точности современных глобальных моделей поля в высоких широтах Арктики аэрогравиметрические исследования на длинных профилях могут являться эффективным инструментом [36].

3) Учитывая сложность развертывания наземных корректирующих станций (НКС) в Арктике, для экспериментальной оценки максимально допустимого удаления самолета-лаборатории от НКС с учетом требований аэросъемки выполнены наблюдения вдоль контрольных трансконтинентальных профилей [32].

4) Рассмотрены возможности применения современных моделей гравитационного поля Земли, построенных с использованием спутниковых данных, для планирования и проведения детальных гравиметрических исследований.

Выполненные работы свидетельствуют о повышении эффективности в части методов и оборудования аэрогравиметрической съемки в Арктике, накопленные в 2014 г. экспериментальные данные требуют дальнейшей обработки (в 2015 г., с выходом на публикацию материалов), а запланированные летные испытания с учетом сделанных в текущем году рекомендаций целесообразны к проведению не только для обозначения российских интересов в арктических исследованиях, но и для обеспечения соответствия высокоширотных исследований мировому уровню.

Авторы благодарны сотрудникам Камчатского филиала Сейсмологической службы РАН и коллективу гидрологического пункта «Верхнекамчатск» Камчатского УГМС за содействие в проведении наблюдений на базовых станциях в ходе выполнения измерений на трансконтинентальных профилях, а также коллективу лаборатории Сейсмологии ИЭПС УрО РАН, проводящей на протяжении нескольких лет сейсмологический мониторинг на архипелаге островов Земля Франца-Иосифа (ЗФИ), за обсуждение возможности размещения и обеспечения работы базовых станций на ЗФИ для наземного сопровождения измерений по маршруту «Амдерма-ЗФИ-Северный полюс».

Исследования выполнены при частичной поддержке Программы Президиума РАН 44П "Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации" на 2014 г., Проект "Аэрогравиметрическая съемка в высоких широтах Арктики".

Литература

1. В.И. Павленко. *Арктика. Экология и экономика*, 2013, **4(12)**, 16-25.
2. П.С. Бабаянц, Ю.И. Блох, В.А. Буш, А.А. Трусов. *Разведка и охрана недр*, 2006, **5**, 32-35.
3. Н.В. Дробышев, В.Н. Конешов, В.В. Погорелов, Ю.Е. Рожков, В.Н. Соловьев. *Физика Земли*, 2009, **№8**, 36-41
4. В.Е. Могилевский, Д.В. Каплун, С.А. Павлов, А.Н. Камков. *Разведка и охрана недр*, 2006, **5**, 32-35.
5. В.Е. Могилевский, С.А. Павлов. Официальный сайт НПП "Аэрогеофизика". Электронная публикация, 2009, http://www.aerogeo.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=76%3A2009-10-15-13-37-44&catid=18%3A2009-06-23-04-49-37&Itemid=21&lang=ru

6. J.M. Brozena, R. Salman. *Arctic airborne gravity measurement program. Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, 1996, **IAG series 117**, 131-139.
7. V.A. Childers, D.C. McAdoo, J.M. Drozena, S.L. Laxon. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**, № **B5**, 8871-8886.
8. A.V. Olesen, R. Forsberg, A. Gidskehaug. *Proc. Int. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, 1997, 613-618.
9. S.W. Laxon, and D.C. McAdoo. *Science*, 1994, **265**, 621-624.
10. S.W. Laxon, and D.C. McAdoo. *Eur. Space Agency Spec. Publ.*, 1997, **SP-414**, 1547-1552.
11. A.O. Mazarovich, S.Yu. Sokolov. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2003, **V.5. #3**, 185-203.
12. T.E. Pyle, M. Ledbetter, B. Coakley, and D. Chayes. *Arctic Ocean/Science, Sea Technol.*, 1997, **39**, 10-15.
13. A. Olesen, R. Forsberg, K. Keller, A.H.W. Kearsley. *Visitas for Geodesy in the new millennium*, 2001, **IAG series 125**, 205-210.
14. J. Brozena. *From Mars to Greenland: Charting Gravity with Space and Airborne Instruments*, 1992, **IAG Symposium Series 110**, 203-214.
15. R. Forsberg, J.M. Brozena. *Geodesy and Physics of the Earth, International Association of Geodesy Symposia*, 1993, **vol.**, 171-175.
16. R. Forsberg, K. Keller, S.M. Hvidegaard and A. Olesen. *National Survey and Cadastre – Denmark (KMS)*, 2002, 28 pp.
17. R. Forsberg, A.V. Olesen, K. Keller and M. Møller. *Technical report no.18. National Survey and Cadastre – Denmark*, 2003.
18. R. Forsberg, A.V. Olesen, K. Keller, M. Møller, A. Gidskehaug, D. Solheim. *Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, 2001, 586-593.
19. S. Kenyon, R. Forsberg. *Gravity, Geoid and Geodynamics 2000, International Association of Geodesy Symposia*, 2000, **vol. 123**, 391 – 395.
20. Веб-страница Arctic Gravity Project на официальном сайте Датского национального космического центра http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/agp/hist_agp.html
21. J.M. Brozena, R. Salman. *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, 1996, **IAG series 117**, 131-139.
22. Веб-страница проекта GOCE. Официальный сайт Европейского космического агентства. http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/GOCE
23. R. Forsberg, A.V. Olesen, H. Yildiz, C.C. Tscherning. *Proc. of 4th International GOCE User Workshop*, 2011, **ESA SP-696**.
24. A. Dossing, J.R. Hopper, A.V. Olesen, T.M. Rasmussen, and J. Halpenny. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2013, **14**, 4044-4065.
25. A. Dossing, T.M. Hansen, A.V. Olesen, J. R. Hopper, T. Funck. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, **408**, 132-145.
26. Ежегодный обзор. ВНИИОкеангеология, 2006, 16-19.
27. Труды НИИГА–ВНИИОкеангеология, 2011, **т. 220**, 21-25.
28. Н.В. Дробышев, В.Н. Конешов, В.В. Клевцов, В.Н. Соловьев, Е.Ю. Лаврентьева. *Сейсмические приборы*, 2008, **Т.44 № 3**, 5-19.
29. Н.В. Дробышев, В.Н. Конешов, И.В. Конешов, В.Н. Соловьёв. *Вестник Пермского университета. Серия «Геология»*, 2011, **№ 3**, 37-50.
30. В.Н. Конешов, Д.В. Абрамов, Н.В. Дробышев, В.В. Клевцов, Н.В. Кузнецова, Е.Ю. Лаврентьева, А.В. Макушин, В.В. Погорелов, В.Н. Соловьев. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 2013, **№ 2. Вып. № 22**, 232-237.

31. В.Н. Конешов, В.Н. Соловьев, В.В. Погорелов, Д.В. Абрамов, А.В. Макушин, Н.В. Дробышев, В.В. Клевцов. *Геофизические исследования*, 2014, том **15**, № **3**, 5-12.
32. В.Н. Конешов, Д.В. Абрамов, Н.В. Дробышев, Н.В. Кузнецова, А.В. Макушин, В.В. Погорелов, В.Н. Соловьев. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 2014, № **2**. Вып. № **24**, 204-210.
33. В.Н. Конешов, И.В. Конешов, В.В. Клевцов, А.В. Макушин, Ю.Л. Смоллер, С.Ш. Юрист, Ю.В. Болотин, А.А. Голован. *Физика Земли*, 2013, № **21**, 81-83.
34. В.Н. Конешов, В.В. Клевцов, В.Н. Соловьев. *Физика Земли*. 2015. №**3** (принята в печать)
35. Л.К. Железняк, П.С. Михайлов, В.Н. Соловьев. *Физика Земли*. 2014, № **2**, 63–65.
36. В.Н. Конешов, В.Б. Непоклонов, В.Н. Соловьев. *Гироскопия и навигация*, 2014, №**2(85)**, 86-94.
37. G.Seeber. *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*. Walter de Gruyter, 2003.
38. J.Sanz, A.Rovira-Garcia, M.Hernandez, J.Juan, J.Ventura-Traveset, C.Lopez, G.Hein, *6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies Multi-GNSS Navigation Technologies*. Proc., Noordwijk, the Netherlands. Dec. 2012.
39. Ю.И. Блох. *Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Пособие для студентов*. 2009, 232 с. <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-interp.pdf>
40. W.Freeden, F.Schneider, *Math. Meth. in the Appl. Sci.*, 1998, vol. **21**, 129–165.
41. Ю.В. Болотин, В.С. Вязьмин. *Геофизические исследования*, 2014, Т **15**, №**3**, 38-49.
42. Д.В. Абрамов, В.Н. Конешов. *Сейсмические приборы*, 2014, Т. **50**, № **2**, 39-44.



Рисунок 1 - Самолет-лаборатория ИФЗ РАН на базе АН-26 БРЛ: *а)* внешний вид, *б)* GPS-антенны в блистере над фюзеляжем самолета, *в)* внешний вид измерительного блока гравиметрического комплекса типа GT 1А/2А, *г)* рабочее место оператора на борту самолета-лаборатории.

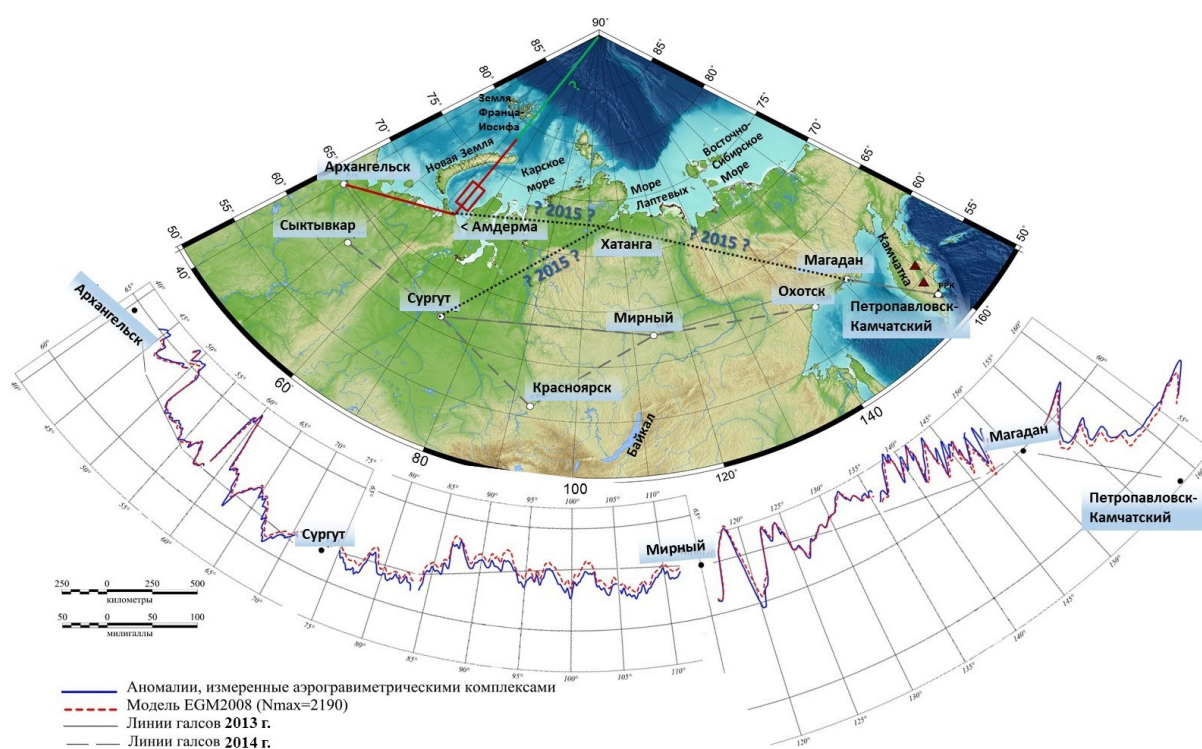


Рисунок 3 - Выполненные и планируемые трансконтинентальные профили с указанием промежуточных и конечных пунктов. На схеме: треугольниками обозначены базовые станции 2014 г. на Камчатке, кружками отмечены аэропорты, через которые проходили перелеты (комментарии в тексте). Сплошной бордовой линией обозначено положение профилей «Архангельск-Амдерма» и «Амдерма - 78 град. С.Ш.» (рис.2), бордовым прямоугольником схематично обозначен район площадной съемки 2013 г. над акваторией Карского моря. Сплошной серой линией на схеме обозначен трансконтинентальный профиль 2013 г, и ниже приведены аномалии в свободном воздухе вдоль него – измеренные и в соответствии с моделью EGM2008. Пунктиром обозначен маршрут перелетов 2014 г. Точечными линиями обозначены возможные маршруты перелетов 2015 г.

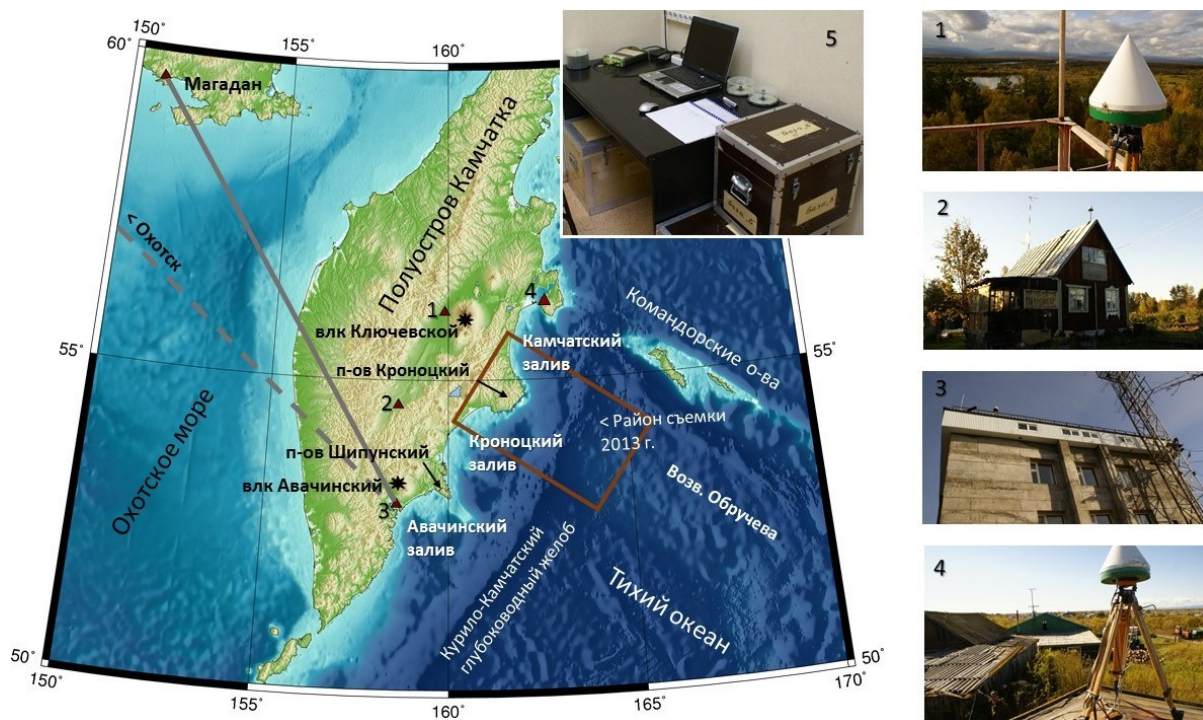


Рисунок 4 - Базовые станции, использовавшиеся при проведении площадной съемки на Камчатке, а также для наземного сопровождения исследований на трансконтинентальных профилях. 1 – антенна на территории сейсмостанции «Козыревск», 2 – гидрологический пункт «Верхнекамчатский», 3 – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в г. Петропавловск-Камчатский, 4 – размещение антенны на сейсмостанции «Крутоберегово» (2013 г.), 5 – рабочее место оператора базовой станции и комплект оборудования для обеспечения бесперебойного питания и защиты от пиковых нагрузок от сети электрического тока. На схеме серыми линиями обозначены участки маршрутов полетов 2013 г. – в Магадан, 2014 г. – на Охотск. Прямоугольником обозначен район съемок 2013 г. на котором проводился предварительный площадной анализ влияния базовых станций в зависимости от удаления.

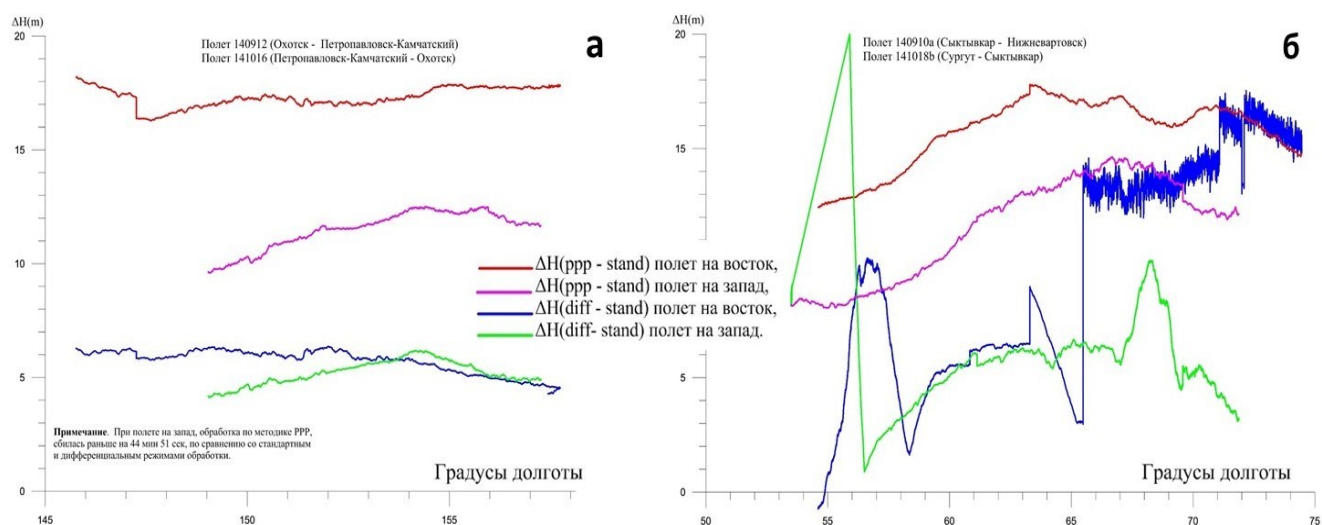


Рисунок 5 - Анализ методов повышения точности позиционирования измерений на подвижном основании. Поправки в значения высоты полета с использованием дифф.режима – зеленый и синий графики; и технологии Precise Point Positioning (PPP) – красный и фиолетовый графики: а) на участке Петропавловск-Камч. - Охотск (Магадан); б) на участке Сыктывкар- Сургут (Нижневартовск).

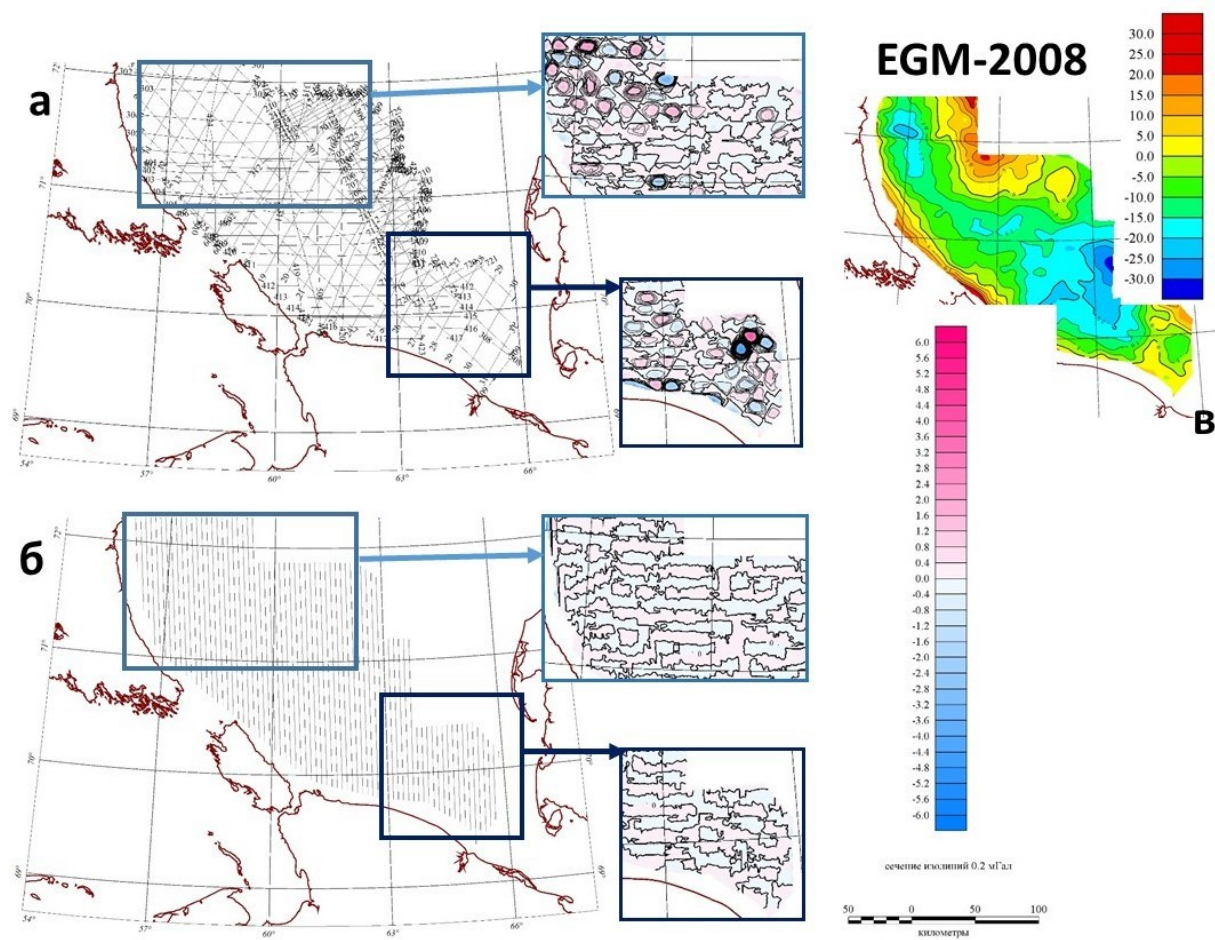


Рисунок 6 – Применение глобальной модели гравитационного поля Земли EGM2008 для оценки качества исходной информации: а) сетка профилей выполненных морских съемок 80-90-х гг. и распределение невязок синтетической карты АСТ на их основе; б) распределение невязок синтетической карты АСТ, построенной по регулярной сетке профилей; в) схематическая карта аномалий гравитационного поля на юго-западную часть Карского моря по модели EGM2008, использовавшаяся для создания синтетической модели.

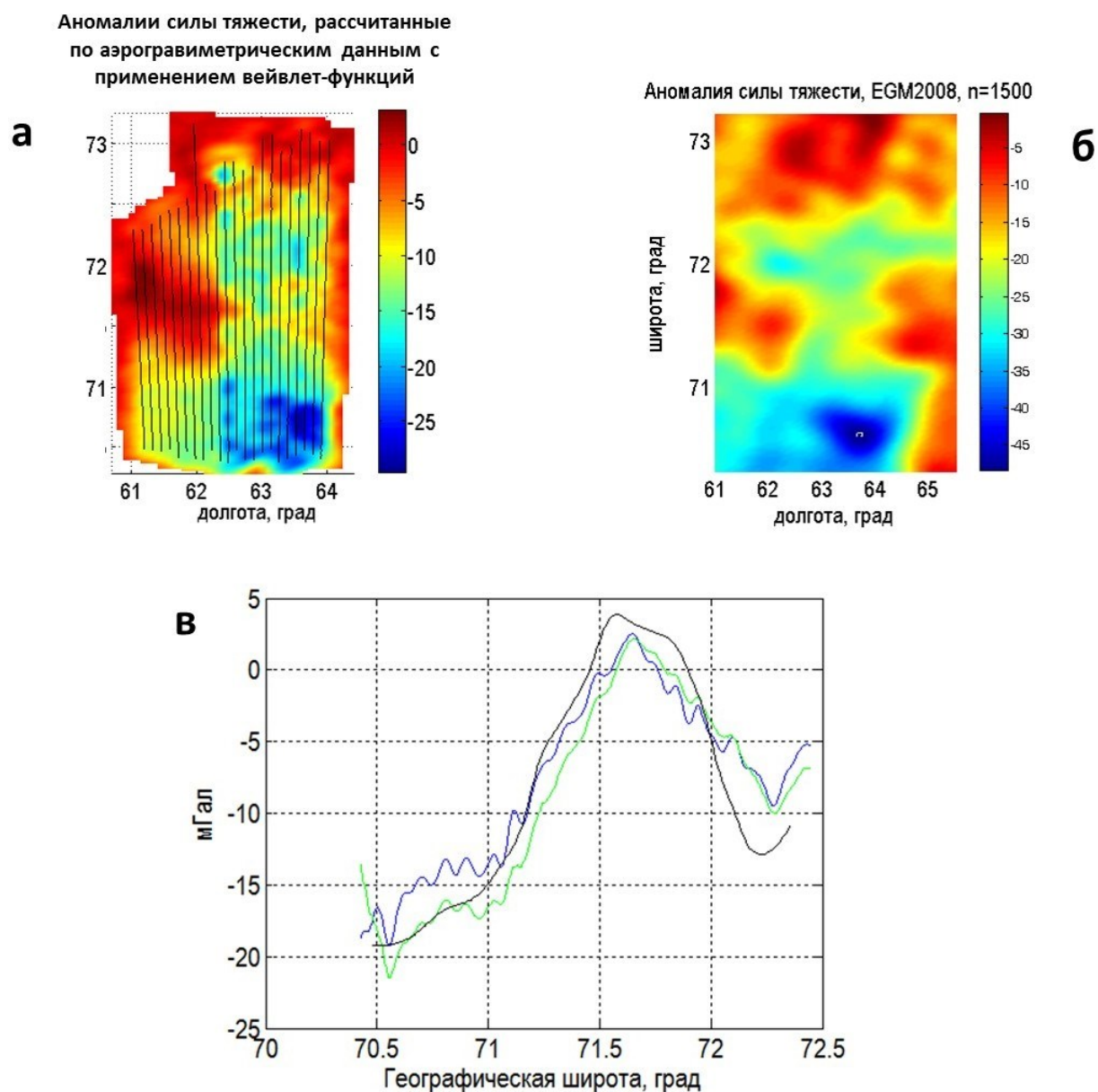


Рисунок 7 – Создание комбинированной модели гравитационного поля с использованием сферических вейвлет-разложений: а) карта аномалии силы тяжести, восстановленной по скейлинг-коэффициентам, оцененным из аэрогравиметрических данных на максимальном уровне детализации $J=11$, мГал; б) карта аномалий силы тяжести по модели EGM2008 (использовано 1500 гармоник); в) сравнение результата комбинирования с эталонными данными. Графики аномалии по комбинированным данным (зеленым), аэрогравиметрическим-данным (синим), эталонным данным (черным)