

УДК 550.3

EDN EKVDEA

А. В. СОКОЛОВ, А. А. КРАСНОВ, А. Б. КОНОВАЛОВ,
А. Г. КАЗАНИН, Ф. Е. ЖИЛИН, Р. В. ЗАЛЬЦМАН

АЭРОГРАВИМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА С ГЕНЕРАЛЬНЫМ ОГИБАНИЕМ РЕЛЬЕФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРАВИМЕТРА «ЧЕКАН-АМ»

Описана методика выполнения аэрогравиметрической съемки с использованием гравиметра «Чекан-АМ». Обсуждаются особенности обработки аэрогравиметрических измерений, выполненных с огибанием рельефа местности. Представлены результаты детальной аэрогравиметрической съемки.

Ключевые слова: аэрогравиметрия, гравитационное поле, аномалия силы тяжести, гравиметр «Чекан-АМ», сглаживание.

Введение

В настоящее время перспективным и активно развивающимся методом исследований поля силы тяжести остается выполнение гравиметрических съемок с борта самолетов [1–3]. Преимущества данного метода очевидны – это возможность быстро и эффективно исследовать заданные области, включая труднодоступные районы Земли, где применение других методов ограничено или вовсе недоступно.

Мобильные гравиметры «Чекан-АМ» активно используются российскими и зарубежными компаниями для решения задач морской геологоразведки [4–7]. В 2005–2007 гг. была выполнена программная модернизация гравиметра «Чекан-АМ», позволившая производить аэрогравиметрические измерения [8]. В период 2007–2011 гг. с помощью гравиметров «Чекан-АМ» было проведено пять региональных гравиметрических съемок на шельфе о. Гренландия, а в 2015 г. – гравиметрическая съемка масштаба 1:500 000 в северной части Восточно-Сибирского моря [2, 9]. Помимо этого, гравиметры «Чекан-АМ» использовались в ряде опытно-методических работ, направленных на анализ возможности применения различных типов воздушных носителей для аэрогравиметрической съемки, в том числе и в высоких широтах [10, 11].

В 2024 г. компания АО «МАГЭ» осуществила в Якутии первую аэрогравиметрическую съемку над сушей с привлечением гравиметра «Чекан-АМ» в интере-

Соколов Александр Вячеславович. Доктор технических наук, генеральный директор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; СПбПУ Петра Великого (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0002-6423-1591.

Краснов Антон Алексеевич. Кандидат технических наук, начальник отдела гравиинерциальных и оптоэлектронных комплексов, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». ORCID 0000-0003-0298-2418.

Коновалов Алексей Борисович. Начальник лаборатории, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Казанин Алексей Геннадьевич. Кандидат технических наук, генеральный директор, АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (Мурманск).

Жилин Федор Евгеньевич. Заместитель генерального директора, АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция».

Зальцман Роман Владимирович. Ведущий геофизик, АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция».

сах геологоразведки. В связи с комплексным характером аэрогеофизических работ (гравиметрические и магнитометрические измерения) ее ключевой особенностью является генеральное огибание рельефа местности – традиционное для современных задач геологоразведки требование [12–14]. При этом высота полета должна составлять минимально допустимое значение над земной поверхностью исходя из условий, обеспечивающих безопасный полет.

Цель настоящей работы – описать возможности применения гравиметра «Чекан-АМ» для аэрогравиметрической съемки с генеральным огибанием рельефа на суше и оценить достигнутую при этом точность измерений. В статье анализируются также особенности и результаты выполнения измерений гравиметром «Чекан-АМ» в рамках рассматриваемой аэрогравиметрической съемки.

1. Общая характеристика условий выполнения съемки

Чувствительный элемент гравиметра «Чекан-АМ» построен на основе двойной кварцевой упругой системы, разработанной совместно со специалистами Института физики Земли РАН. Схема построения чувствительного элемента приведена на рис. 1.

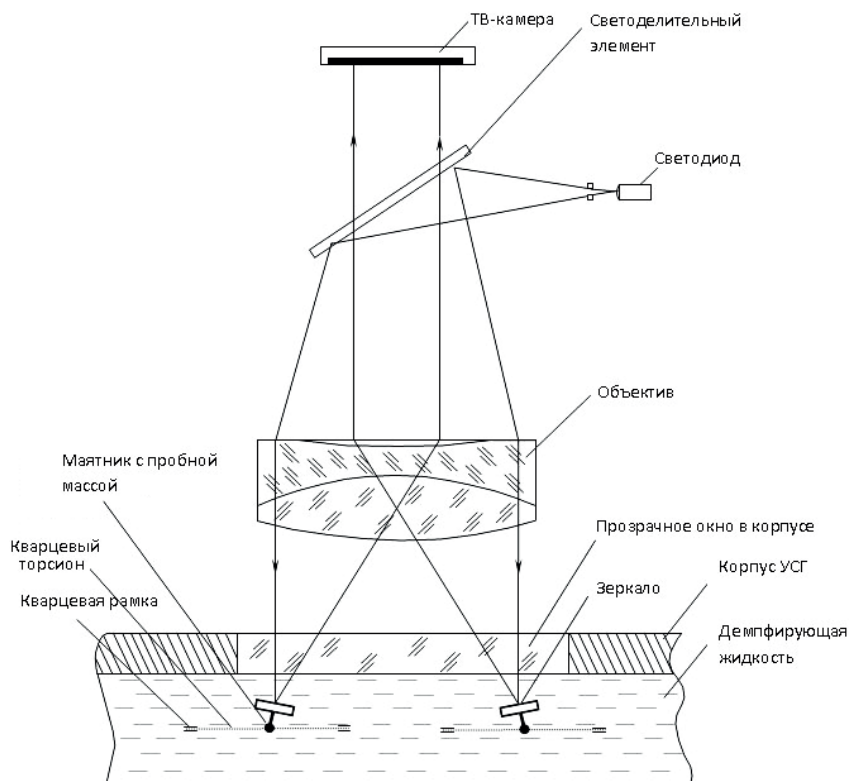


Рис. 1. Схема построения чувствительного элемента гравиметра

Особенностью данного типа гравиметрического датчика является жидкостное демпфирование его кварцевого чувствительного элемента, которое значительно усложняет обработку аэрогравиметрических измерений [15]. Кроме того, чтобы компенсировать орбитальный эффект, присущий всем измерительным системам

крутильного типа, упругая система гравиметра оснащена двумя идентичными системами из особо чистого кварцевого стекла, развернутыми в горизонтальной плоскости на 180° друг относительно друга.

Съем информации об угловом положении маятников упругой системы выполняется при помощи оптико-электронного преобразователя, работающего в автоколлимационном режиме. В качестве фотоприемника используется специализированная 5-мегапиксельная черно-белая КМОП-матрица [2, 16].

Гравиметрический датчик установлен в малогабаритном двухосном гиростабилизаторе с цифровым управлением. Аппаратная часть гравиметра «Чекан-АМ» идентична в его морской и авиационной модификациях.

Для выполнения съемки гравиметр «Чекан-АМ» был размещен в центральной части фюзеляжа самолета Cessna 182 (рис. 2). Навигационное обеспечение съемки включало в себя бортовой приемоиндикатор спутниковых навигационных систем фирмы Novatel, осуществляющий синхронизацию показаний гравиметра и вырабатывающий данные для коррекции гироскопической платформы гравиметра, а также две базовые станции того же производителя, размещенные в районе съемки. Учитывая, что полевой сезон был начат в апреле и продлился до ноября 2024 г., особое внимание было уделено стабилизации температуры в месте размещения гравиметра [17]. Эта задача была успешно решена, и диапазон изменения температуры в ходе полевых работ внутри самолета составил от $+10$ до $+25^\circ\text{C}$.



Рис. 2. Самолет Cessna 182

Аэропорт базирования находился в пределах района съемки. Средняя скорость полета во время измерений на галсах составляла 50 м/с с вариациями ± 5 м/с. Высота полета, продиктованная рельефом местности, варьировалась от 200 до 450 м. Важно отметить качество пилотирования воздушного судна, благодаря которому удалось обеспечить генеральное огибание рельефа при выполнении измерений. Так, и при удержании постоянной барометрической высоты, и при генеральном огибании рельефа местности, как показано на рис. 3, вертикальные скорости движения не превышали по модулю 2 м/с, а вертикальные ускорения составляли менее 200 Гал. Подчеркнем, что ранее аэрогравиметрические съемки гравиметром «Чекан-АМ» при таком значительном фоне инерционных ускорений не производились [11].

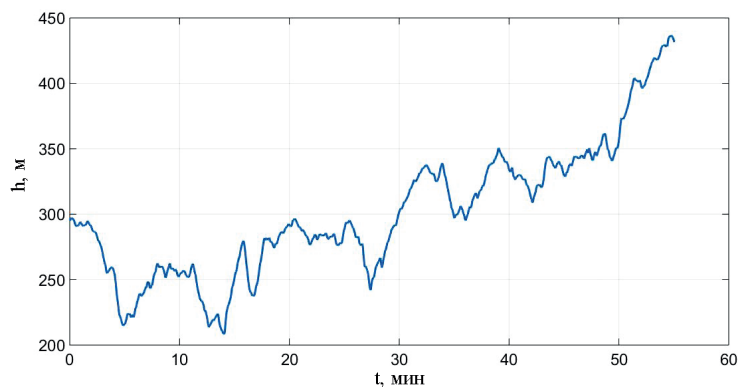


Рис. 3. Высота полета при выполнении галса во время съемки

Стоит, однако, отметить высокую динамику самолета Cessna 182 в условиях полета близко к земной поверхности. Несмотря на то что полеты выполнялись в отсутствие восходящих тепловых воздушных потоков в темное время суток, вариации углов крена и рыскания составляли до $\pm 5^\circ$ с периодами 15 с и 30 с соответственно.

Качка с указанными параметрами компенсировалась в реальном времени с помощью безредукторной следящей системы и аналитической системы выработки курса гироскопической гравиметра. Вариации угла рыскания приводят к изменениям поправки Этвеша величиной ± 25 мГал с аналогичным периодом, которые учитываются при совместной обработке показаний гравиметра и спутниковых навигационных данных [15].

2. Методические особенности съемки и алгоритмы обработки данных

На борту самолета гравиметр «Чекан-АМ» обслуживается одним оператором, в задачи которого входит предполетная подготовка, а также контроль ряда параметров при заходах самолета на съемочные галсы. Предполетная подготовка занимает один час и состоит из опорных наблюдений и определения готовности гравиметра к съемке. Все операции автоматизированы. Во время полета оператор переключает режимы коррекции системы стабилизации гравиметра по данным приемной спутниковой аппаратуры при заходах на съемочные галсы. Это необходимо, чтобы быстро привести систему стабилизации в установившийся режим после выполнения маневра по курсу.

После завершения полета вся гравиметрическая и навигационная информация и данные системы стабилизации гравиметра, записанные в реальном времени, подвергаются оперативному анализу с целью качественно определить их пригодность для дальнейшей камеральной обработки. Вся информация, полученная за время полета, объединяется и затем автоматически разделяется на съемочные профили, чтобы в дальнейшем анализироваться по каждому из них. Оцениваются около 20 параметров, в частности уровень погрешностей стабилизации на галсе, качество удержания самолета на заданной траектории, степень турбулентности и другие. Для каждого из оцениваемых параметров выработаны критерии, поэтому результаты оперативного контроля данных представляются оператору в виде «пригоден / не пригоден» (рис. 4). В случае наличия участков с некондиционными данными оператор имеет возможность выявить причину брака и исключить эти участки из обработки.

Камеральная обработка гравиметрических данных производится после компенсации остаточных погрешностей спутниковой навигационной информации в дифференциальном режиме. Эта компенсация выполнялась специалистами АО «МАГЭ» с использованием программного обеспечения поставщика спутниковой приемной аппаратуры. Погрешность определения вертикальной координаты на съемочных профилях в режиме постобработки составляла менее 5 см для 90% данных.

Камеральная обработка гравиметрических данных выполняется с помощью специально разработанного программного обеспечения Chekan_QC [18]. Программа позволяет рассчитать все необходимые поправки, вычислить и сгладить аномалию силы тяжести (АСТ) в свободном воздухе. Результаты обработки данных предоставляются пользователю в графическом и цифровом виде. Кроме того, благодаря программе формируются базы данных опорных наблюдений и съемки с оценкой внутренней сходимости данных. Блок-схема обработки информации, реализованная в программе Chekan_QC, приведена на рис. 5.

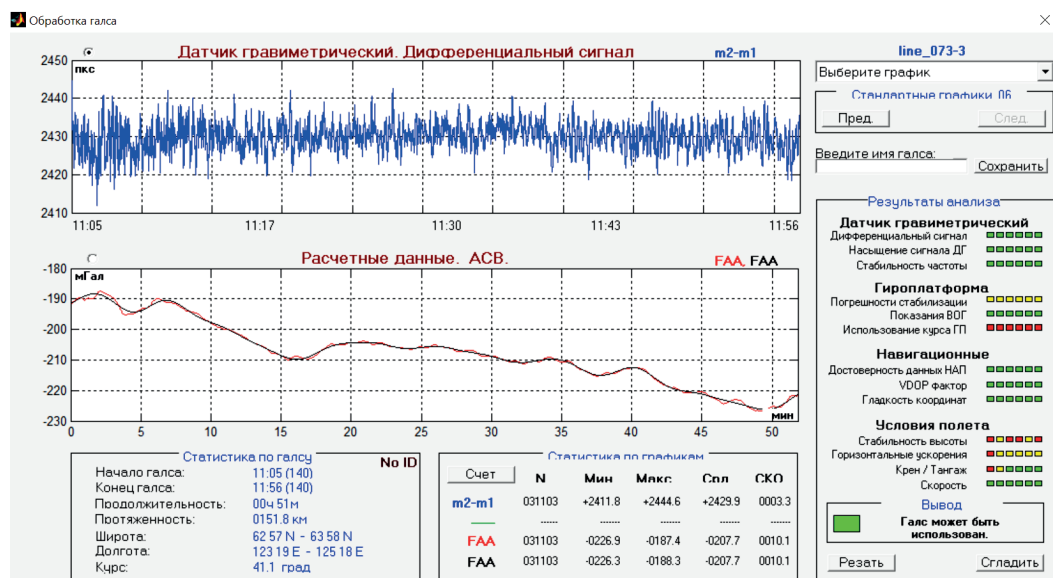


Рис. 4. Окно оперативной обработки данных

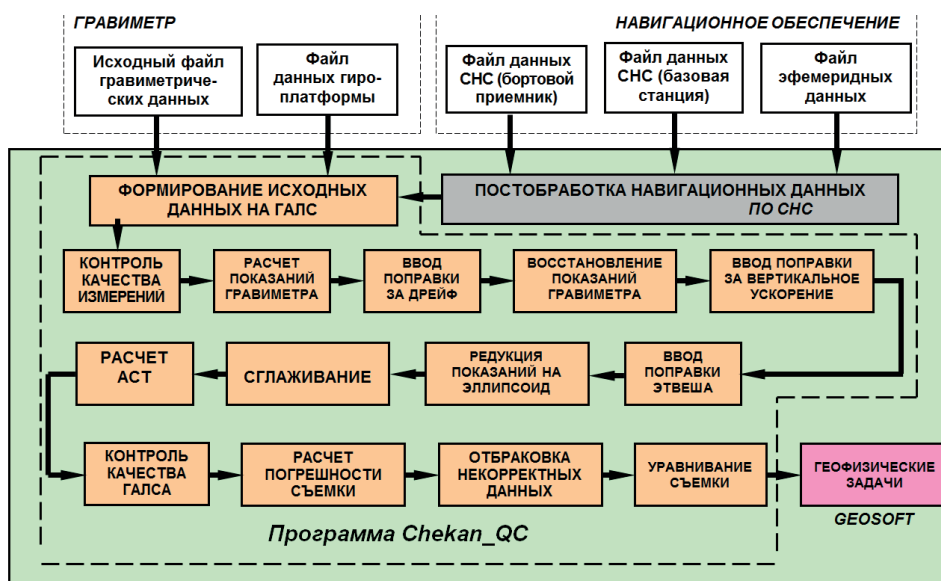


Рис. 5. Блок-схема обработки гравиметрических данных

Все действия программа выполняет автоматически, однако у оператора есть возможность вывести соответствующий график и проконтролировать значение любого параметра или сигнала на каждом этапе обработки данных.

В отличие от ранее выполненных аэрогравиметрических съемок в [19] из-за огибания рельефа местности впервые дополнительно осуществлялась компенсация орбитального эффекта с использованием формулы

$$\Delta g_{ОРБ} = k(m_2 - m_1)W_X,$$

где $k = 3,15 \cdot 10^{-5}$ рад/пикс – коэффициент преобразования от пикселей к углу поворота маятника упругой системы гравиметра; m_1 , m_2 – текущие отсчеты в пикселях маятников упругой системы гравиметра; W_x – продольное горизонтальное ускорение, которое регистрируется по показаниям акселерометра гиросплатформы гравиметра.

Учет данной поправки позволил повысить итоговую точность аэрогравиметрических измерений и обеспечить требуемую частоту среза сглаживающего фильтра, что дало возможность выполнить съемку масштаба 1:100 000.

3. Результаты аэрогравиметрической съемки и оценка точности

В соответствии с методикой аэрогравиметрических работ перед началом каждого полета выполнялись опорные измерения гравиметром «Чекан-АМ» в течение одного часа. На рис. 6 приведен фрагмент базы данных за 1 месяц опорных наблюдений. Статистические оценки опорных наблюдений за весь период полевых работ таковы: скорость смещения нуля-пункта гравиметра составила 0,94 мГал/сут, а ее среднеквадратическое отклонение не превысило 0,1 мГал/сут. Это позволило обрабатывать результаты съемки без дополнительной корректировки скорости нуля-пункта гравиметра.

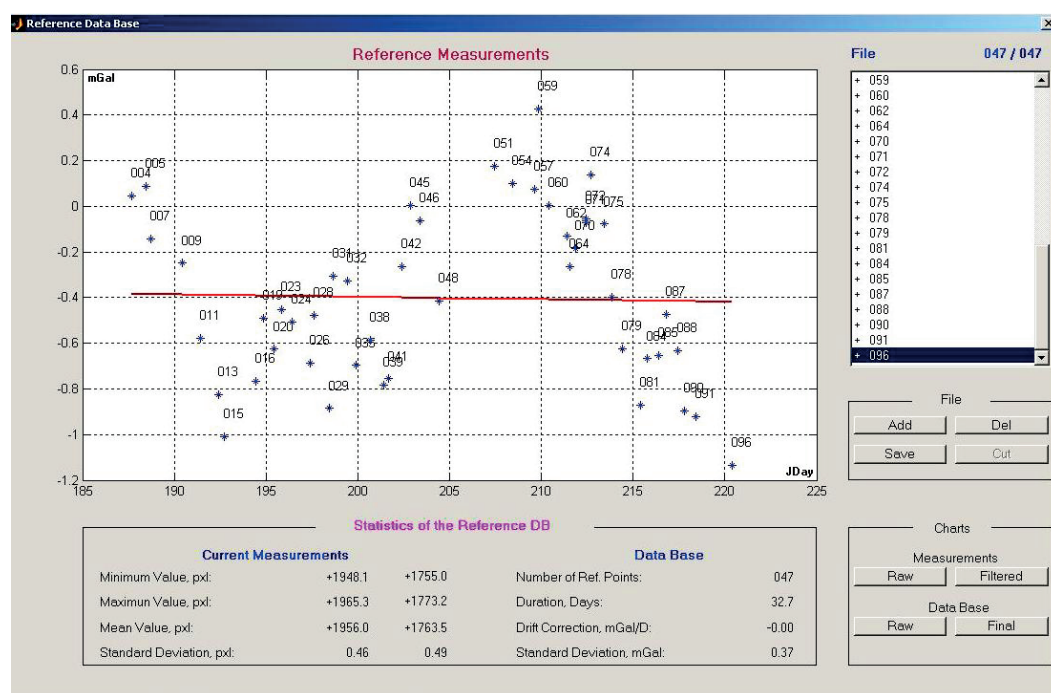


Рис. 6. База данных опорных наблюдений

Из-за погодных условий и лесных пожаров работы в рамках аэрогравиметрической съемки были распределены неравномерно:

- март–август – 8000 км;
- сентябрь – 19 000 км;
- октябрь – 9000 км;
- ноябрь – 9000 км.

Всего выполнено измерений на 319 галсах основного покрытия и на 10 контрольных галсах общей протяженностью 45 000 км при средней производительности работ 250 км/сут. При этом фактическая производительность за один полет, с учетом вылета, заходов на галсы и возвращения на место базирования, составила 100 км/ч.

Точность аэрогравиметрических измерений оценивалась по разностям в точках пересечения основных и контрольных галсов съемки, а также на повторных галсах. Из-за небольшого количества контрольных галсов число точек пересечения составило 355, среднеквадратическая погрешность определения АСТ – 1,94 мГал.

На рис. 7 представлены аномалии силы тяжести, полученные по результатам измерений на повторном галсе протяженностью 125 км, выполнявшихся во время полетов 19 мая и 7 июня 2024 г.

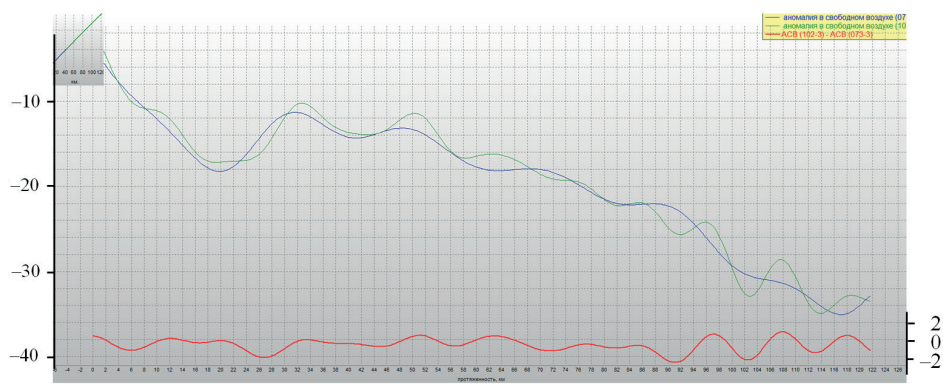


Рис. 7. Кривые аномалий силы тяжести по результатам измерений на повторном галсе (синяя и зеленая, шкала слева) и их разность (красная, шкала справа)

Среднеквадратическое отклонение результатов измерений на повторном галсе составило 0,83 мГал при 422 повторных пунктах. Среднее значение разности измерений – 0,35 мГал. При обработке данных применяется низкочастотный фильтр с частотой среза 0,01 Гц [15]. С учетом скорости полета 50 м/с пространственная разрешающая способность измерений равна 2,5 км [20].

Дополнительно на рис. 8 показано влияние орбитального движения на данные гравиметра. Видно, что ввод предложенной выше поправки изменяет оценки приращений силы тяжести на величину до 10 мГал.

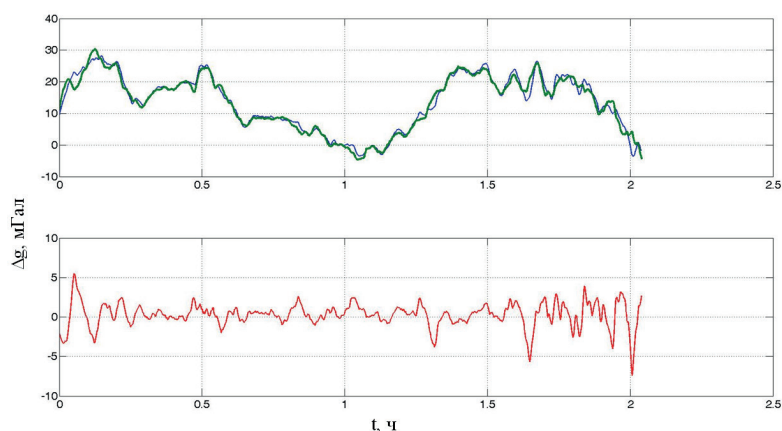


Рис. 8. Кривые аномалий силы тяжести без ввода поправки за остаточный орбитальный эффект (синяя) и с вводом (зеленая), а также их разность (красная)

По полученной аэрогравиметрической информации была построена карта АСТ масштаба 1:100 000 на условном уровне (рис. 9). Перепад АСТ в районе съемки составил 40 мГал. При этом район съемки характеризуется различной пространственной изменчивостью гравитационного поля: от десятых долей миллигала на километр в северной части района до 10 мГал/км в южной.

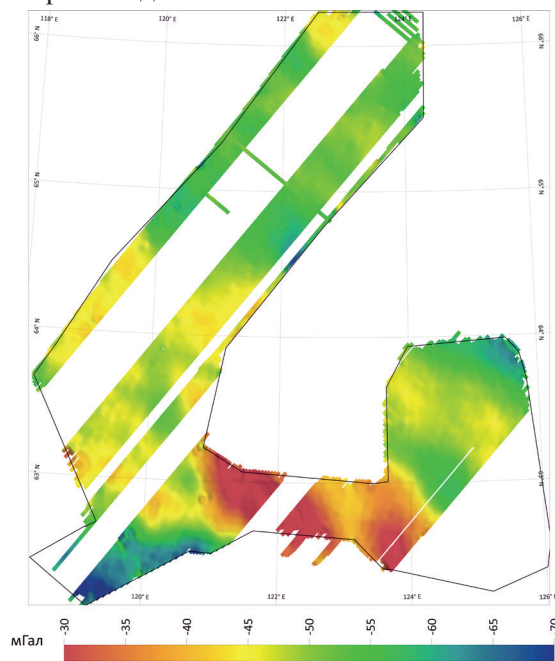


Рис. 9. Карта АСТ, построенная по результатам съемки первого полевого сезона

4. Сравнение результатов измерений с глобальной моделью

На рис. 10 показан фрагмент поля АСТ, измеренного в рамках обсуждаемой аэрогравиметрической съемки, и поле АСТ для этого района по данным глобальной модели EGM2008.

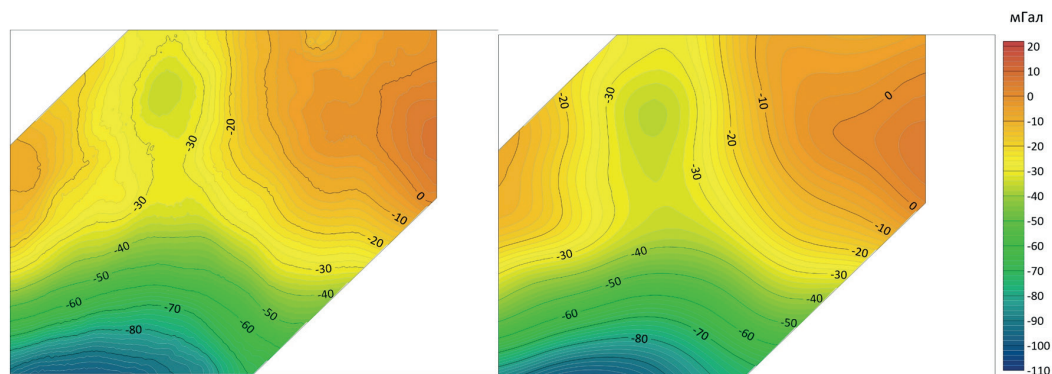


Рис. 10. Фрагмент карты АСТ по результатам съемки (слева) и по данным глобальной модели (справа)

Из разности измеренного и модельного поля АСТ (рис. 11) видно, что для слабоаномальных участков модель и измерения совпадают до единиц миллигалов.

На участках с градиентом АСТ более 2 мГал/км отклонение модельных значений АСТ от результатов измерений по модулю может достигать 10 мГал. Это подтверждает недостаточную детальность современных моделей гравитационного поля Земли и перспективность высокоточных аэрогравиметрических работ [21].

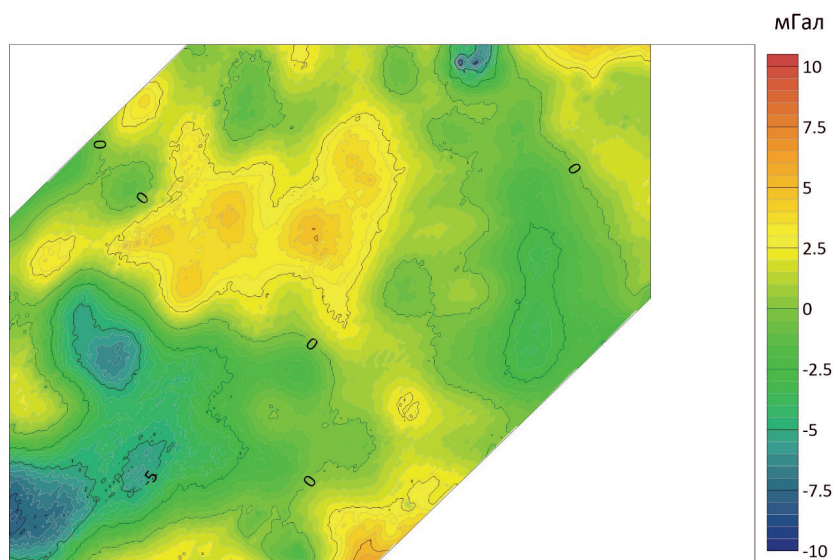


Рис. 11. Карта разности измеренных и модельных АСТ

Заключение

Результаты анализа данных аэрогравиметрической съемки подтвердили возможность применения гравиметра «Чекан-АМ» модели «Шельф-Э» для выполнения работ масштаба 1:100 000. Огибание рельефа местности в ходе съемки несколько снижает точность измерений, однако не является ограничительным фактором для проведения аэрогравиметрических измерений. Съемка с огибанием рельефа местности впервые осуществлялась с использованием гиросtabilизированного гравиметра.

Произведенная в 2024 г. АО «МАГЭ» аэрогравиметрическая съемка показала, что гравиметр «Чекан-АМ» можно задействовать не только для решения ранее поставленных задач изучения фигуры Земли [22–29] и разведки углеводородов на шельфе [2–7], но и для поиска нефтегазоносных структур на суше, что открывает новые перспективы применения демпфированных гравиметров этого типа. В настоящее время в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» ведутся исследования, направленные на повышение точности аэрогравиметрических измерений с привлечением алгоритмов калмановской фильтрации и сглаживания [20].

ЛИТЕРАТУРА

1. Forsberg, R., Olesen, A., Airborne gravity field determination, *Sciences of Geodesy – Advances and Future Directions*, 2010, Springer, pp. 83–104.
2. **Современные методы и средства измерения** параметров гравитационного поля Земли / Степанов О.А., Пешехонов В.Г. и др.; под ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.

3. **Бабаянц П.С., Контарович О.Р., Трусов А.А.** Современные аэрогеофизические технологии при прогнозе, поисках и оценке месторождений твердых полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. 2020. №11. С. 30–40.
4. **Казанин Г.С., Заяц И.В., Иванов Г.И., Макаров Е.С., Васильев А.С.** Геофизические исследования в районе Северного полюса // Океанология. 2016. Т. 56. №2. С. 333–335.
5. **Казанин Г.С., Барабанова Ю.Б., Кириллова-Покровская Т.А., Черников С.Ф., Павлов С.П., Иванов Г.И.** Континентальная окраина Восточно-Сибирского моря: геологическое строение и перспективы нефтегазоносности // Разведка и охрана недр. 2017. №10. С. 51–55.
6. **Кулинич Р.Г., Валитов М.Г.** Морская гравиметрия в акваториях Японского и Охотского морей // Технические проблемы освоения Мирового океана. Т. 7. 2017. С. 222–226.
7. **Журавлев В.А., Челышев С.В., Кочетов М.В.** Опыт использования гравиметра ЧЕКАН и перспективы развития морской гравиметрии в ОАО МАГЭ // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. Материалы 47-й сессии Международного научного семинара Д.Г.Успенского – В.Н.Страхова. Воронеж, 2020. С. 124–127.
8. **Heyen, R., Stelkens-Kobsch, T., Krasnov, A.A., Nesenjuk, L.P., and Sokolov, A.V.,** Test results of the airborne gravimeter, *Proceedings of International Symposium Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, 2007, pp. 21–27.
9. **Krasnov, A.A., Sokolov, A.V., Usov, S.V.,** Modern Equipment and Methods for Gravity Investigation in Hard-to-Reach Regions, *Gyroscopy and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 3, pp. 178–183.
10. **Соколов А.В., Краснов А.А., Ржевский Н.Н.** Опыт выполнения гравиметрических измерений с борта дирижабля // Сейсмические приборы. Т. 50. №4. 2014. С. 36–42.
11. **Соколов А.В., Краснов А.А., Коновалов А.Б.** Измерения ускорения силы тяжести с борта воздушных носителей различных типов // Измерительная техника. 2016. №6. С. 10–13.
12. **Бабаянц П.С., Бровкин Г.И., Контарович О.Р., Вязьмин В.С., Голован А.А.** Методические особенности современных аэрогравиметрических съемок // Материалы XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб., 2022. С. 113–122.
13. **Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Розенцвейн В.Г., Краснов А.А., Соколов А.В.** Современное состояние разработки в области бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. №4 (119). С. 3–35.
14. **Голован А.А., Вязьмин В.С.** Методика проведения аэрогравиметрических съемок и обработки первичных данных бескарданного аэрогравиметра // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31. №1 (120). С. 58–75.
15. **Соколов А.В., Краснов А.А.** Методика и программное обеспечение камеральной обработки аэрогравиметрических измерений // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2013. №27. С. 487–491.
16. **Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Железняк Л.К., Береза А.Д., Краснов А.А.** Вклад навигационных технологий в создание мобильных гравиметров // Гироскопия и навигация. 2019. №4. С. 162–180.
17. **Железняк Л.К., Конешов В.Н., Михайлов П.С., Дробышев М.Н., Соловьев В.Н.** Влияние температуры и влажности окружающей среды на точность гравиметра «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30. №2 (117). С. 58–70.
18. **Краснов А.А., Соколов А.В.** Современный комплекс программно-математического обеспечения мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. 2015. №2 (89). С. 118–131.
19. **Соколов А.В., Краснов А.А., Железняк Л.К.** Методы повышения точности морского гравиметра // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №2 (105). С. 70–81. DOI 10.17285/0869-7035.2019.27.2.070-081.
20. **Соколов А.В., Степанов О.А., Моторин А.В., Краснов А.А.** Сопоставление винеровского и калмановского подходов при решении задачи обработки результатов морской гравиметрической съемки // Гироскопия и навигация. 2024. Т. 32. №1 (124). С. 15–40. EDN KMMYOO.
21. **Михайлов П.С., Конешов В.Н., Соловьев В.Н., Железняк Л.К.** Новые результаты оценок современных глобальных ультравысокостепенных моделей гравитационного поля Земли в Мировом океане // Гироскопия и навигация. Т. 30. №4 (119). 2022. С. 36–53. DOI 10.17285/0869-7035.00102.
22. **Forsberg, R., Olesen, A., Ferraccioli, F., Jordan, T., Matsuoka, K., Zakrajsek, A., Ghidella, M., Greenbaum, J.,** Exploring the Recovery Lakes region and interior Dronning Maud Land, East Antarctica, with airborne gravity, magnetic and radar measurements, *Geological Society*, London, Special Publications, 20 September 2017, 461, 23–34.
23. **Форсберг Р., Оlesen А.В., Эйнарссон И.** Проведение аэрогравиметрических измерений гравиметрами «ЛАКОСТА-РОМБЕРГ» и «Чекан-АМ» с целью определения геоида // Гироскопия и навигация. 2015. №3 (90). С. 19–29.

24. Железняк Л.К., Конешов В.Н., Михайлов П.С. Экспериментальное определение вертикального градиента силы тяжести ниже поверхности моря // Физика Земли. 2016. №6. С. 83–85.
25. Barthelmes, F., S. Petrovic, H., Pflug First Experiences with the GFZ New Mobile Gravimeter Chekan-AM, *Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements*, 2013, pp. 18–19.
26. Barzaghi, R., Albertella, A., Carrion, D., Barthelmes, F., Petrovic, S., Scheinert, M., Testing Airborne Gravity Data in the Large-Scale Area of Italy and Adjacent Seas., *IGFS 2014. International Association of Geodesy Symposia*, 2015, vol. 144.
27. Lu, B., Barthelmes, F., Petrovic, S., Forste, C., Flechtner, F., Luo, Z., He, K., Li, M., Airborne gravimetry of GEOHALO mission: data processing and gravity field modeling, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth Solid Earth*, 2017, 122, 10, 586–10, 604.
28. Sinem, I.E., Förste, C., Barthelmes, F., Pflug, H., Li, M., Kaminskis, J., Neumayer, K.-H., Michalak, G., Gravity Measurements along Commercial Ferry Lines in the Baltic Sea and Their Use for Geodetic Purposes, *Marine Geodesy*, 2020, vol. 43, no. 6, pp. 573–602.
29. Förste, C., Sinem, I.E., Johann, F., Schwabe, J., Liebsch, G., Gravimetry Activities on the Baltic Sea in the Framework of the EU Project FAMOS, *Fachbeitrag*, 145, Jg. 5/2020, doi 10.12902/zfv-0317-2020, pp. 287–294.

Sokolov, A.V., Krasnov, A.A., Konovalov, A.B. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg), Kazanin, A.G., Zhilin, F.E., and Zal'tsman, R.V. (Marine Arctic Geological Expedition, JSC, Murmansk) Airborne Gravimetry: Draped Surveys with the Chekan-AM Gravimeter, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2025, vol. 33, no. 2 (129), pp. 21–31.

Abstract. The paper describes a method of airborne gravimetry using the Chekan-AM gravimeter. Specific details of measurements processing in the case of draped gravimetric survey are discussed, and the results of detailed airborne gravimetry survey are presented.

Key words: airborne gravimetry, gravity field, gravity anomaly, Chekan-AM gravimeter, smoothing.

Материал поступил 04.07.2025