

наземными гравиметрическими материалами масштаба 1:50 000 продемонстрировало возможность выполнения аэрогравиметрических съемок с погрешностью 0,8 мГал.

Свои первые аэрогравиметрические съемки АО «ГНПП «Аэрогеофизика» проводила, используя аппаратный комплекс «Гравитон-М», разработанный ВНИИГеофизика и доработанный в АО «ГНПП «Аэрогеофизика». Всего нами было изготовлено и эксплуатировалось пять опытных образцов этой аппаратуры. При этом продолжались опытные работы с другими типами аэрогравиметров. К 2005 г. нами было установлено, что лучшими техническими характеристиками обладают аэрогравиметры модели GT, разработанные в компании «Гравиметрические технологии» совместно с учеными Мехмата МГУ. Все последующие аэрогеофизические съемки нами производились и производятся с использованием именно этой аппаратуры. В настоящее время аэрогравиметры GT заслуженно считаются одними из лучших в мире, их применяют для своих работ большинство ведущих зарубежных компаний. С их помощью, используя современные алгоритмы обработки

и определенные методические приемы, удается выполнять аэрогравиметрические съемки с погрешностью 0,4–0,5 мГал.

За период 2005–2015 гг. нами выполнены аэрогравиметрические работы в РФ и за рубежом (Южная Америка, Африка, Средняя Азия) на площади более 3 500 000 км².

За 45 лет своей производственной деятельности АО «ГНПП «Аэрогеофизика» было *изучено* различными видами аэрогеофизических исследований *более 20 % территории страны* (рисунок).

Сегодня АО «ГНПП «Аэрогеофизика» — *ведущая аэрогеофизическая компания России* и один из мировых лидеров в сфере оказания аэрогеофизических услуг. Мы способны вести аэросъемки одновременно 12 комплексами аппаратуры, установленными на летательные средства различных типов, в любых климатических условиях.

АО «ГНПП «Аэрогеофизика» — это высокое качество и надежность.

АО «ГНПП «Аэрогеофизика» — эффективный инструмент при решении задач отечественной геологии.

© Контарович Р.С., 2015

Контарович Рафаил Самуилович // agr@aerogeo.ru

МЕТОДИКА И ТЕХНИКА СОВРЕМЕННЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ СЪЕМОК

УДК 550.831.3, 550.838.3

Могилевский В.Е., Павлов С.А., Контарович О.Р., Бровкин Г.И. (АО «ГНПП «Аэрогеофизика»)

ОСОБЕННОСТИ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ СЪЕМОК В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

*Изучение структуры геофизических полей Арктического региона является актуальной задачей. В подобных исследованиях все большую популярность получают методы аэрогеофизики — аэрогравиметрические и аэромагнитные съемки. Однако их применение в северных широтах имеет отличительные особенности, связанные как с аппаратурными комплексами, так и с методикой работ. Рассмотрению этих вопросов посвящена данная статья. **Ключевые слова:** Арктика, аэрогравиметрия, аэромагнитометрия, спутниковая навигация, спутниковая альтиметрия.*

Mogilevskiy V.E., Pavlov S.A., Kontarovich O.R., Brovkin G.I. (Aerogeophisica)

FEATURES OF AEROGEOPHYSICAL SHOOTINGS IN HIGH LATITUDES

*Arctic region geophysical fields research is the actual problem. Airborne gravimetry and magnetometry is popular geophysics methods, often used in this study. But in north regions this surveys have hardware and technique specific features. Current article is devoted to consideration of these problems. **Key words:** Arctic region, airborne gravimetry, airborne magnetometry, satellite positioning, satellite altimetry.*

В настоящее время Арктика рассматривается в качестве основного региона, с которым связаны перспективы расширения минерально-сырьевой базы РФ. В ее геолого-геофизические исследования вкладываются огромные средства. При этом огромные размеры и труднодоступность этой территории обуславливают особую роль аэрогеофизических методов в этих работах.

АО «ГНПП «Аэрогеофизика» выполняет комплексные аэромагнитные и аэрогравиметрические съемки в Арктике начиная с 2011 г. (рис. 1). Работы проведены на площади 1 500 000 км² [1], из которых 850 000 км² — над акваторией Северного Ледовитого океана. Эти съемки выполнялись по ортогональной сети рядовых и



Рис. 1. Аэрогеофизические (аэрогравиметрические) работы АО «ГНПП «Аэрогеофизика» в Арктике 2011–2015 гг.

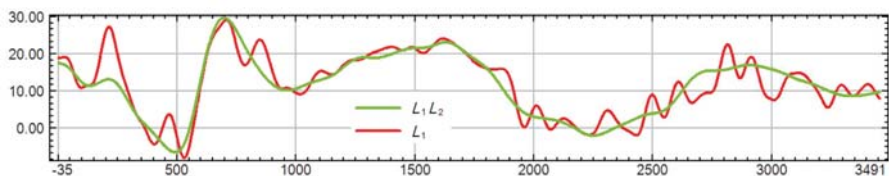


Рис. 2. Результаты съемки с использованием сигналов спутниковой системы навигации на одной (L_1) и двух (L_1L_2) частотах

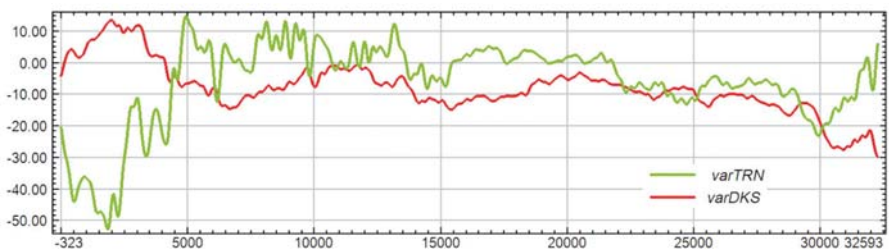


Рис. 3. Геомагнитные вариации, зафиксированные в 300 км друг от друга, на о. Диксон и о. Тройной

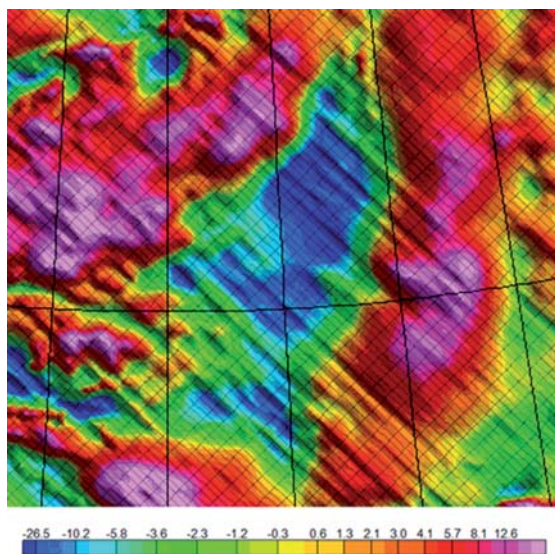


Рис. 4. Фрагмент карты аномального магнитного поля после статистической увязки маршрутов

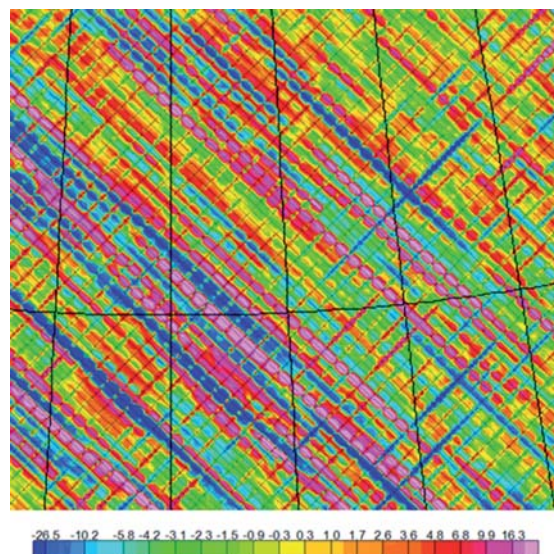


Рис. 5. Вычисленная методом декорреляции поправка за неучтенные вариации

опорных профилей с межмаршрутным расстоянием соответственно 4 и 10 км.

Съемки в этих широтах имеют свои особенности, которые надо учитывать при проектировании и проведении работ. Некоторые из них рассмотрены ниже.

1. Важнейшим элементом, определяющим успех аэрогеофизических исследований, является качественное навигационное обеспечение работ. Решается эта задача с помощью спутниковой навигационной системы совмещенного созвездия GPS+ГЛОНАСС. При выполнении аэрогравиметрической съемки простая привязка точек измерения является лишь одной из задач навигационного обеспечения. Основная задача — определение ускорений летательного аппарата, поскольку приемлемую точность аэрогравиметрических данных можно получить только при синхронном измерении и последующем учете всех возмущающих ускорений, воздействующих на грави-

метр в полете. Погрешность определения координат самолета не должна превышать первых десятков сантиметров.

Одним из основных источников ошибки спутниковой системы является неоднородность ионосферного слоя Земли, через который проходят сигналы по пути от спутников к приемнику. Изменяются скорости электромагнитных волн и соответственно время прохождения сигналов, по которым собственно и определяется местоположение приемника. При работах в средних и низких широтах этот эффект есть, но он не является определяющим. В высоких широтах без его учета съемку выполнять невозможно. Задача решается с помо-

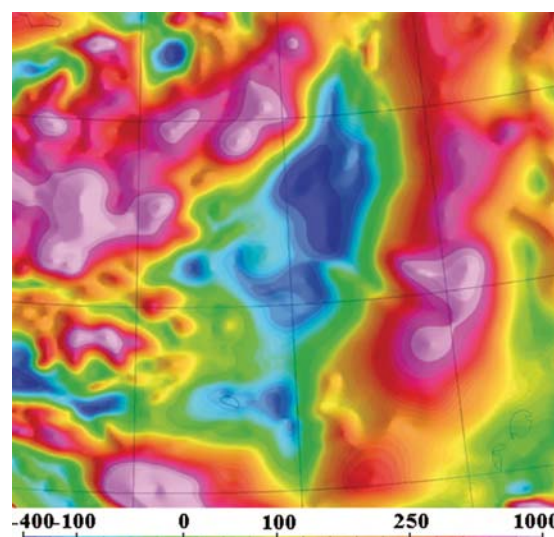


Рис. 6. Фрагмент итоговой карты аномального магнитного поля



Рис. 7. Карта гравитационного поля Арктики в районе работ АО «ГНПП «Аэрогеофизика» по альтиметрическим данным

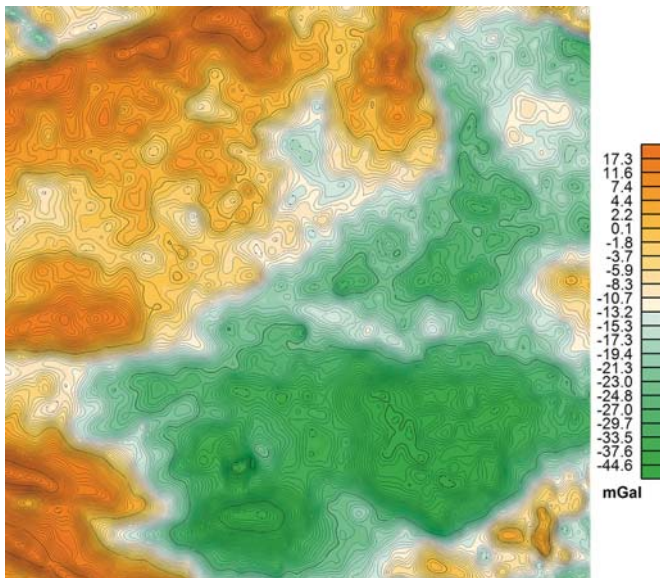


Рис. 8. Фрагмент карты аномалий силы тяжести по альтиметрическим данным

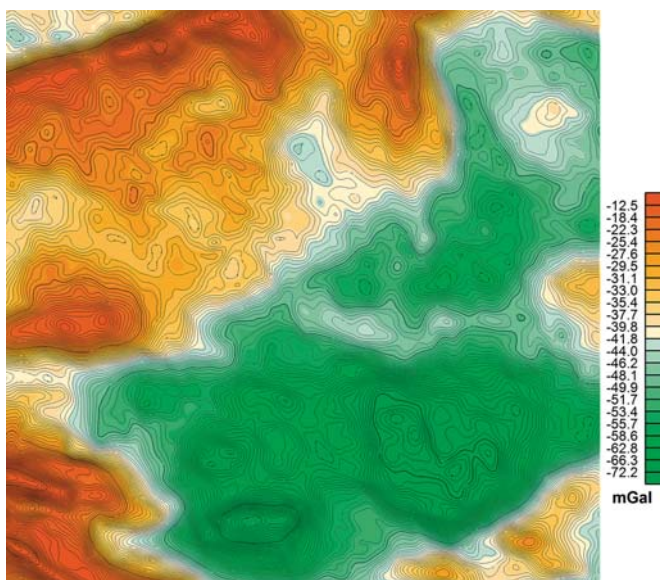


Рис. 9. Фрагмент карты аномалий силы тяжести по аэрогравиметрическим данным

стью использования дополнительной частоты. Спутниковые сигналы излучаются одновременно на двух разнесенных частотах L_1 и L_2 . По разности времени прохождения частот до приемника удается ввести поправку за неоднородность ионосферы. На рис. 2 для примера показаны аномалии силы тяжести на одном из съемочных профилей над Карским морем, вычисленные с использованием одно- и двухчастотных спутниковых сигналов.

Еще одним следствием высоких широт является необходимость проводить прием спутниковых сигналов в двух разнесенных точках, т.е. устанавливать на съемочном самолете две спутниковые антенны. Спутниковые данные в полете должны непрерывно поступать в вычислитель инерциальной гиросплатформы для определения ряда навигационных параметров, в том числе курса летательного аппарата. По этим данным гиросплатформа вычисляет вертикаль места и обеспечивает вдоль нее стабилизацию гравиметра. В высоких широтах возникает проблема при полетах с востока на запад, поскольку здесь линейная скорость вращения Земли и скорость самолета, будучи направленными в противоположные стороны, становятся соизмеримыми по величине. В итоге курс определяется с большой погрешностью, что приводит к неустойчивой работе гиросплатформы и даже к ее отказу. Использование двух антенн, одна из которых устанавливается над гравиметром в районе центроплана самолета, а вторая — над кабиной пилотов, решает эту проблему.

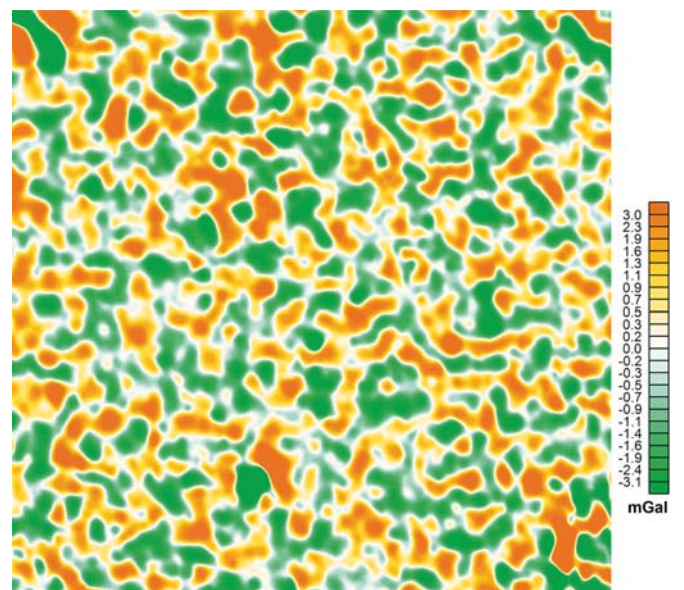


Рис. 10. Разность альтиметрических и аэрогравиметрических данных ($RMS = 2.7$ мГал)

Приемлемую точность определения координат самолета (первые десятки сантиметров) можно получить только при организации т.н. дифференциального режима работы спутниковой навигационной системы, при которой прием сигналов осуществляется не только на борту летательного аппарата, но и в нескольких наземных базовых станциях в районе съемки. Площади, на которых проводятся аэрогеофизические работы в Арктике, как правило, удалены на значительные расстояния от имеющихся там редких населенных пунктов и вообще от береговой линии, где могут быть развернуты станции навигационного обеспечения съемок. Длина базовой линии (расстояние от самолета до наземной станции) влияет на погрешность определения координат летательного аппарата и следовательно на погрешность съемки. Чем больше расстояние, тем больше погрешность. Это вызывает опасение, что для аэрогравиметрии доступны лишь прибрежные районы, а съемка в открытом море невозможна. Однако специальные исследования, выполненные в АО «ГНПП «Аэрогеофизика» показали, что зависимость эта весьма слабая. При увеличении базовой линии на 100 км погрешность съемки увеличивается менее чем на 0.03–0.04 мГал. Таким образом, работа на удалении 600–800 км от наземных станций вполне возможна, что и подтвердили выполненные в Арктике съемки.

2. Серьезной проблемой в высоких широтах при проведении аэромагнитных съемок является учет геомагнитных вариаций, которые здесь могут иметь сложный спектр, большую интенсивность и высокий, часто нелинейный, пространственный градиент. На рис. 3 представлены вариации, зафиксированные в двух точках, расположенных в 300 км друг от друга.

Учитывая, что съемка в этот день выполнялась в 500 км к северу от ближайшей магнитовариационной станции, можно утверждать, что вариации в районе работ могли сильно отличаться от представленных на рис. 3. В этих условиях единственным способом учета вариаций является полная увязка маршрутов по специальной опорной сети, которая должна быть очень густой. Обычно расстояние между опорными маршрутами в 10 и более раз превышает расстояние между рядовыми

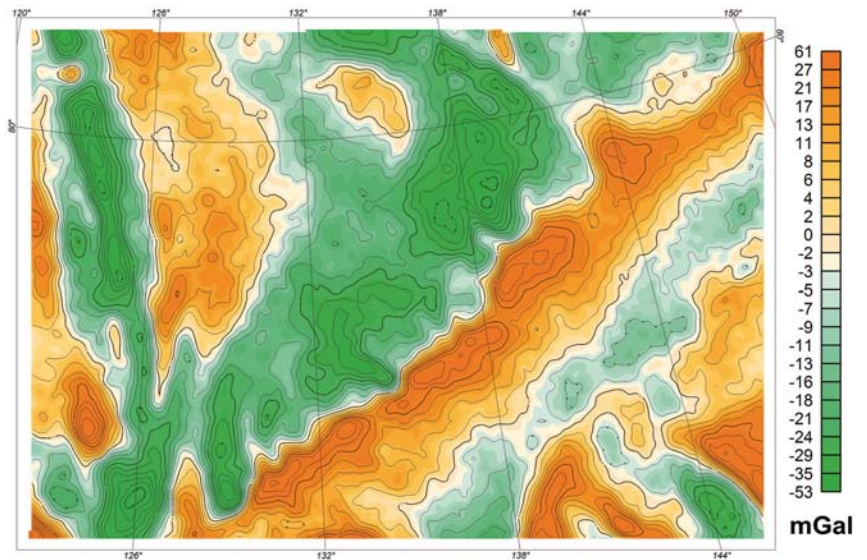


Рис. 11. Фрагмент карты аномалий силы тяжести по альтиметрическим данным

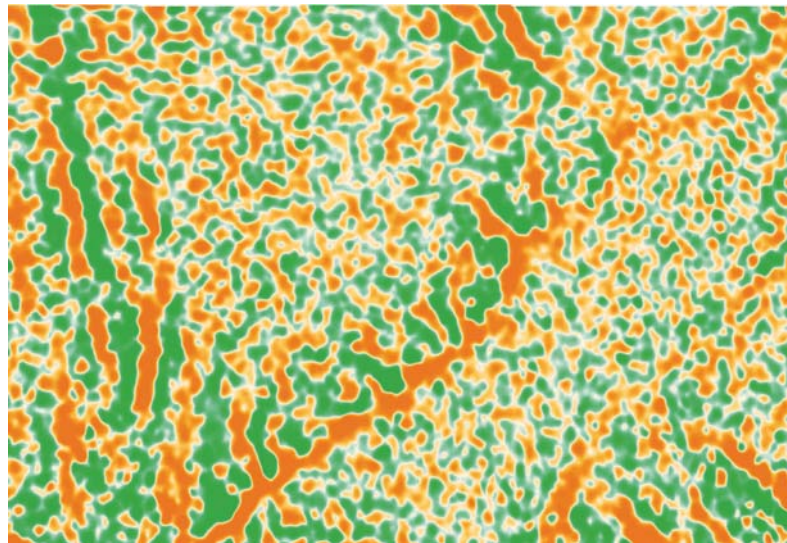


Рис. 12. Локальная составляющая аномалий по альтиметрическим данным

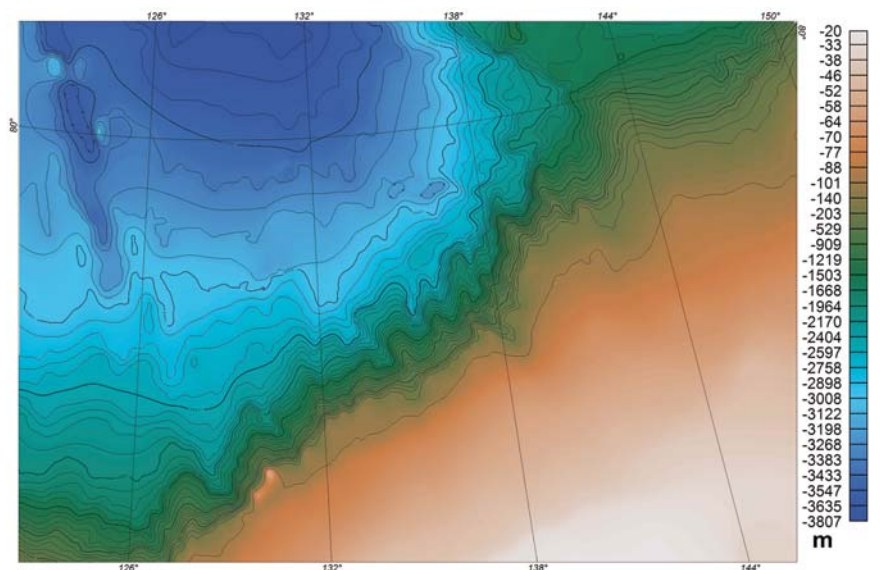


Рис. 13. Фрагмент карты глубин Северного Ледовитого океана у южной оконечности котловины Амундсена

маршрутами. При работах в средних широтах этого достаточно для полного учета вариаций (после ввода данных магнитовариационных станций) статистическим уравниванием маршрутов. В Арктике при наших работах плотность опорной сети была всего в 2.5 раза меньше плотности рядовой сети.

Итерационный алгоритм полного учета вариаций магнитного поля по такой опорной сети (метод декорреляции) разработан в АО «ГНПП «Аэрогеофизика». Результат его работы представлен на рис. 4–6.

3. В настоящее время весь Мировой океан, до 88° с.ш., покрыт с той или иной степенью детальности спутниковой альтиметрической съемкой, в ходе которой с высокой точностью измеряется высота спутника над водной поверхностью. Как известно, невозмущенная водная поверхность практически полностью совпадает с эквипотенциальной поверхностью гравитационного поля Земли. Это позволяет пересчитать альтиметрические данные в значения возмущающего потенциала (формула Брунса) и далее в аномалии силы тяжести — аномалии в свободном воздухе на уровне моря (рис. 7).

При наличии таких данных в свободном доступе возникает необходимость определить оптимальное соотношение между альтиметрией и другими методами изучения поля силы тяжести Земли, в частности, аэрогравиметрией. На рис. 8–10 представлены карты аномалий силы тяжести по альтиметрическим, аэрогравиметрическим данным и их разность. Основную часть карты разности составляют локальные структуры с характерным размером 6–10 км. Простой визуальный анализ рисунков показывает, что большая часть этих «аномалий» присутствует именно в альтиметрическом варианте поля силы тяжести. На аэрогравиметрической карте их практически нет. Такие же структуры можно видеть на другом фрагменте альтиметрической карты (рис. 11–13), где представлено поле и его локальная составляющая над материковым склоном у южной оконечности котловины Амундсена. Глубина дна здесь возрастает от 20–40 м в юго-восточной части участка до 3600–3900 м в северо-западной. Тем не менее характер локальных структур не изменяется. Это свидетельствует о том, что причиной их являются ошибки в альтиметрических данных. Если бы они имели геологическую природу, то параметры локальных аномалий на глубоководном и мелководном участках существенно различались.

Учитывая, что погрешность аэрогравиметрических съемок практически всегда составляет 0.6–0.8 мГал, среднеквадратическое значение разности на рис. 10 соответствует в целом погрешности альтиметрических карт поля силы тяжести. Такую же оценку точности своих карт в Арктике дают разработчики альтиметрического метода [2].

Таким образом, альтиметрические данные в высоких широтах по своему разрешению и точности в настоящее время соответствуют съемкам масштаба 1: 1 000 000. Для более детальных исследований (до масштаба 1:100 000 включительно) целесообразно привлекать аэрогравиметрию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Могилевский В.Е., Контарович Р.С. Аэрогравиметрические исследования в Арктике // Нефть. Газ. Новации. — 2015. — № 2. — С. 12–16.

2. Sandwell D., Garcia E., Soofi K. and et al. Toward 1-mGal accuracy in global marine gravity from CryoSat-2, Envisat and Jason-1 // The Leading Edge, August 2013. — P. 892–899.

© Коллектив авторов, 2015

Могилевский Владимир Ефимович // volmog@list.ru
Павлов Сергей Александрович // pavlov@aerogeo.ru
Контарович Олег Рафаилович // olegk@aerogeo.ru
Бровкин Герман Игоревич // germanbrovkin@gmail.ru

УДК 550.835.232, 550.8.052

Бабаянц П.С., Керцман В.М., Лёвин Ф.Д., Трусов А.А.
(АО «ГНПП «Аэрогеофизика»)

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ АЭРОГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ

*На основе анализа особенностей современной аэрогамма-спектрометрической аппаратуры обсуждаются элементы технологии обработки данных, пути и средства повышения их разрешающей способности съемок. Описаны подходы, основанные на вычислении площадей фотопиков, и способ учета влияния атмосферного радона. Приводятся примеры применения аэрогамма-спектрометрических данных для картирования калий-содержащих метасоматитов и поисков россыпей. **Ключевые слова:** аэрогамма-спектрометрия, фотопики, радон, высота съемки, метасоматиты, россыпи.*

Babayants P.S., Kertsman V.M., Levin F.D., Trusov A.A. (Aerogeophysics)

SPECIAL FEATURES OF THE STATE-OF-THE-ART AIRBORNE GAMMA SPECTROMETRY

*Elements of data processing technology, the ways and means to increase survey resolution are discussed based on the analysis of the state-of-the-art airborne gamma spectrometry equipment features. The approaches based on calculating photopeak areas and the way to account for the influence of atmospheric radium are described. The examples of how to use airborne gamma spectrometry data for mapping potassium-bearing metasomatites and searching for placer deposits are given. **Key words:** airborne gamma spectrometry, photopeaks, radium, survey altitude, metasomatites, placer deposits.*

Аэрогамма-спектрометрический метод был разработан и изначально развивался как метод поисков урановых месторождений [1]. В процессе развития он стал успешно применяться для поиска месторождений широкого круга рудных полезных ископаемых и средне-масштабного геокартирования. В последние десятилетия аэрогамма-спектрометрия широко используется для решения радиоэкологических задач, а также при поисках нерудных ископаемых, в т.ч. нефти. Тем не менее, основные требования к методике работ сохранились главным образом в виде имеющихся нормативных документов, большая часть которых (например, техническая инструкция [6]) устарела и не соответствует современному состоянию метода.

Выбор высоты измерений в зависимости от характера решаемых задач

Одним из ключевых вопросов методики современных аэрогамма-спектрометрических (АГСМ) съемок