

Рис. 7. Выраженность россыпей золота в долине р. Ул на топографической карте (А) и карте содержаний тория (Б). Лист N-54-XX: 1 — линейные аномалии тория, приуроченные к долинам рек; 2 — россыпи золота

долине р. Итака в пределах Верхне-Тунгирской грабен-синклинали находится известное Итакинское россыпное месторождение золота. Месторождение это четко отражается на карте содержаний тория линейной положительной аномалией. Более того, к притокам р. Итака дополнительно приурочен целый ряд аномалий тория, которые можно интерпретировать как возможные места локализации россыпных проявлений, хотя на данный момент они там не выявлены. Еще один подобный участок расположен по левому борту долины р. Амур вблизи от ее устья — в долине р. Ул и по ее левым притокам. Здесь, по результатам АГСМ-съемки также выявлены положительные аномалии тория, приуроченные к долинам р. Ул и ее левых притоков — руч. Кулибина, Эватак и Никонка (рис. 7), что может свидетельствовать о ло-

кализации здесь устойчивых к разрушению аксессуарных минералов. При этом в долинах руч. Кулибина, Эватак и Никонка россыпи золота известны и отчасти уже отработаны, в то время как относительно долины р. Ул такая информация отсутствует.

Третий участок располагается в бассейне верхнего течения р. Бурея и в приустьевых частях ее левых притоков Дубликан, Солони и Ургал. В отличие от приведенных выше примеров здесь до настоящего времени россыпных проявлений не было выявлено, однако наличие в долинах этих рек отчетливых положительных аномалий тория позволяет предположить перспективность их поиска.

Приведенные примеры позволяют рассматривать положительные аномалии тория, приуроченные к долинам рек или к придолинным территориям, как участки возможной локализации устойчивых к разрушению аксессуарных минералов в составе фаций терригенных отложений, обогащенных минералами тяжелой фракции («шлихом») и, следовательно, как косвенные поисковые признаки россыпных проявлений.

Таким образом, возможности современной аппаратуры и новых методов обработки данных АГСМ позволяют увеличить статистическую представительность получаемых результатов и расширить круг решаемых геологических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аэрогамма-спектрометрический метод поисков месторождений урановых руд. Методическое руководство* / Под ред. Г.С. Смирнова. — Л.: ОНТИ ВИТР, 1967.
2. *Аэрорадиогеохимическое картирование. Методические рекомендации* / А.И. Краснов, Е.Б. Высокоостровская, Е.И. Зубов и др. — Л.: НПО Рудгеофизика, 1983. — 104 с.
3. Израэль Ю.А., Вакуловский С.М., Ветров В.А. и др. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. — М.: Гидрометеиздат, 1990. — 296 с.
4. Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Пегов А.Н. Практические приемы обработки данных в прикладной гамма-спектрометрии. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 149 с.
6. *Техническая инструкция по аэрогамма-спектрометрической съемке*. — М., 1977.
7. Minty, B.R.S., 1998, Multichannel models for the estimation of radon background in airborne gamma-ray spectrometry: *Geophysics*, 63, 1986–1996.
8. IAEA (International Atomic Energy Agency), 2003. Guidelines for Radioelement Mapping using Gamma Ray Spectrometry Data. IAEA-TEC-DOC-1363. IAEA, Vienna.

© Коллектив авторов, 2015

Бабаянц Павел Суменович // bab@aerogeo.ru
 Керцман Владимир Менделевич // kercman@aerogeo.ru
 Лёвин Федор Дмитриевич // fedorl@aerogeo.ru
 Трусов Алексей Андреевич // trusov@aerogeo.ru

УДК 550.831.3

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

ДОСТИЖЕНИЯ, ОСОБЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ АЭРОГРАВИМЕТРИИ

Изучение гравитационного поля Земли с борта движущегося летательного аппарата является новым инновационным и весьма специфическим аэрогеофизическим методом. Он предполагает внедрение в практику гравимет-

*рических работ принципиально новых аппаратных средств, а также приемов сбора данных, методов их обработки и способов оценки качества съемок. Описанию этих особенностей и еще не решенных проблем аэрогравиметрии посвящена настоящая статья. **Ключевые слова:** гравитационное поле, метрология, калмановская фильтрация, пространственное разрешение, погрешность съемки, цифровая модель аномалий силы тяжести.*

Mogilevskiy V.E., Brovkin G.I., Kontarovich O.R. (Aerogeophysica)
ACHIEVEMENTS, FEATURES AND PROBLEMS OF
AEROGRAVITATION MEASUREMENTS

*Earth gravity field studying of a board of aircraft is the innovative and very specific geophysical method. It assumes implementation in gravimetric practice of essentially new hardware and also new data collection and processing methods and ways of survey error estimation. This article is dedicated to description of these features and unsolved airborne gravimetry problems. **Key words:** gravity field, metrology, kalman filtering, spatial resolution, survey error, digital gravity anomaly model.*

Аэрогравиметрия — измерение гравитационного поля Земли на борту движущегося самолета (вертолета), появилась относительно недавно, на рубеже XX и XXI вв. Сегодня можно констатировать, что этот метод состоялся и к настоящему моменту прочно вошел в практику геолого-геофизических исследований, нацеленных на решение геологических задач.

Аэрогравиметрическая съемка сейчас — один из наиболее динамично развивающихся аэрогеофизических методов, так как она имеет целый ряд очевидных преимуществ перед традиционными наземными (морскими) съемками. Это — возможность работы на труднодоступных территориях; отсутствие техногенной нагрузки на изучаемые территории; высокая производительность и мобильность; экономическая эффективность; объемный характер получаемой информации, обусловленный как разновысотностью пунктов наблюдения, так и возможностью выполнения съемки на разных уровнях, и др. [4].

В России сейчас основной объем аэрогравиметрических работ, нацеленных на решение геологических задач, выполняет АО «ГНПП «Аэрогеофизика». С 2000 г. съемки масштабов 1:100 000 — 1:1 000 000 проведены на общей площади более 2 500 000 км². Погрешность получаемых в итоге цифровых моделей аномалий силы тяжести в редукции Буге составляет 0.45 — 0.85 мГал в зависимости от масштаба.

Мобильность и экономическую эффективность работ можно оценить, исходя из следующего примера. Аэрогравиметрическая (в комплексе с аэромагнитной) съемка масштаба 1:100 000 в пределах одного топографического планшета масштаба 1:200 000 (~ 5000 км² в средних широтах) выполняется за 3–5 съемочных дней и стоит 12–15 млн. руб. в сегодняшних ценах.

За рубежом аэрогравиметрические исследования выполняются как государственными структурами (*Lamont-Doherty Earth Observatory, US National Science Foundation* и др.), так и частными компаниями (*Carson Services, Edcon Aero Surveys, Sander Geophysics* и др.). При этом основные объемы коммерческих съемок выпол-

няет компания *Sander Geophysics* (Канада). Заметим, что в этой сфере АО «ГНПП «Аэрогеофизика» успешно конкурирует с зарубежными компаниями, о чем свидетельствуют, в частности, регулярные заказы на выполнение съемок от таких крупных геолого-геофизических холдингов, как *Fugro Ltd* и *CGG*. В результате только за последние несколько лет АО «ГНПП «Аэрогеофизика» выполнила съемки разного масштаба на десяти объектах в Бразилии, Колумбии, Сомали, Кении и Габоне.

Успехи российской аэрогравиметрии в большой мере обусловлены тем, что все компоненты аппаратно-программного комплекса являются отечественными разработками. Используемый при съемках гравиметрический комплекс GT-2A создан в АО «Гравиметрические технологии» и в настоящее время считается одним из лучших аэрогравиметров в мире. К настоящему моменту всего выпущено 35 гравиметров серии GT (это довольно большой тираж для аппаратуры подобного назначения). Из них 24 комплекта приобретены зарубежными компаниями из Австралии, Египта, Индии, Канады, Казахстана, Китая и ЮАР.

За рубежом сколько-нибудь значимые объемы работ, помимо GT-2A, выполняются только с гравиметром *AIRGrav* компании *Sander Geophysics*. Однако эти приборы компания не продает, а производит только для собственного использования.

Еще одна отечественная разработка — гравиметр Чекан-АМ концерна «ЦНИИ Электроприбор» с датчиком на основе двойной кварцевой упругой системы позиционируется разработчиками как аппаратура, предназначенная для выполнения как надводных, так и аэросъемок. Однако если для морских съемок эта аппаратура используется довольно широко (по утверждениям разработчиков — свыше 30 % мировых объемов работ), то при аэросъемках она используется в крайне ограниченных объемах.

Помимо гравиметра важной составной частью комплекса являются алгоритмы обработки аэрогравиметрических данных и соответствующее программное обеспечение, которые применительно к гравиметру GT-2A созданы в Лаборатории управления и навигации Механико-математического факультета МГУ им. Ломоносова [1].

Особенности аэрогравиметрии

Аэрогравиметрия — весьма специфический метод изучения поля силы тяжести, основанный на внедрении принципиально иных приемов сбора и обработки данных, а также способов оценки качества съемки. Это требует уточнения ряда устоявшихся в традиционной гравиметрии понятий.

Метрология.

Специфика аэрогравиметрических съемок отчетливо проявляется в особенностях их метрологического обеспечения. Аэрогравиметры серии GT зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений (номер в госреестре 57554-14). При этом эталонирование чувствительных элементов гравиметров (методом наклона) проводится один раз на заводе-изготовителе, до полной сборки прибора. Повторить ее в процессе эксплуатации гравиметра невозможно. Использовать существующие полигоны, на которых тестируются на-

земные гравиметры, также нельзя из-за несопоставимых условий измерений в воздухе и на земле. Масштабный коэффициент аэрогравиметра должен обеспечивать корректный перевод аппаратурных единиц измерения в единицы ускорения на всем диапазоне реальных возмущений, а это десятки Гал. Таких полигонов, естественно, в природе не существует.

Гравиметр GT-2A сконструирован и настроен так, чтобы его масштабный коэффициент был равен единице. В реальности коэффициент весьма близок к этому значению, но не равен ему точно. Величина отклонения индивидуальна для каждого прибора и точно неизвестна. В этих условиях специалисты Механико-математического факультета МГУ, разработавшие технологию и пакет программ обработки результатов аэросъемки, предложили оригинальное решение — включить масштабный коэффициент в число параметров, определяемых в процессе обработки данных. В итоге вычисляется коэффициент, при котором показания гравиметра наилучшим образом отвечают воздействию на него возмущающим ускорениям.

Таким образом, фактически гравиметр проходит эталонирование при обработке результатов каждого вылета. Несмотря на спорность данного подхода с точки зрения классической метрологии, следует признать, что стабильность получаемых от вылета к вылету значений масштабного коэффициента доказывает устойчивость и надежность определения цены деления прибора.

На рис. 1 представлена гистограмма значений масштабного коэффициента одного из гравиметров GT-2A, полученных при обработке 191 съёмочного вылета за 4 года эксплуатации. Среднеквадратическое отклонение выборки (*Std. Dev.*) составляет 1.5×10^{-4} , что соизмеримо с погрешностью определения масштабных коэффициентов гравиметров методом наклона.

Фильтрация данных, разрешающая способность.

Условия, в которых выполняются измерения в воздухе, нетипичны для гравиметрии. На борту самолета/вертолета на измерительную систему гравиметра воздействуют ускорения летательного аппарата, величина которых может в десятки тысяч раз превышать уровень полезного сигнала — аномалии силы тяжести от геологических неоднородностей. Учет этих возмущающих

ускорений — ключевая проблема аэрогравиметрии, к решению которой адаптированы все ее составляющие: аппаратура, методика измерений и специальные процедуры обработки данных. В ряду приемов, решающих эту задачу, особое место занимает низкочастотная фильтрация измерений. Данная процедура, как показывает практика, является обязательным элементом обработки, так как возможности частотной фильтрации, с успехом применяемой в морской гравиметрии для подавления помех, в случае аэрогравиметрических измерений весьма ограничены. Это обусловлено, во-первых, наличием в спектре возмущений длиннопериодных (до 100÷120 с) гармоник и, во-вторых, нецелесообразностью использования больших интервалов сглаживания из-за искусственного ухудшения пространственного разрешения съемки за счет высокой скорости самолета. В этих условиях рекомендуется использовать адаптивную (калмановскую) фильтрацию [5], что и реализовали в своей технологии разработчики программного обеспечения. В настоящее время калмановская фильтрация в зависимости от условий съемки производится на интервале 80–100 с (6500–8000 м при скорости 280–300 км/ч).

Необходимостью низкочастотной фильтрации данных обусловлена главная особенность аэрогравиметрии: выполняя непрерывные измерения силы тяжести в полете, она не может определять поле в точке. Получаемые результаты — это всегда средневзвешенные на некотором интервале вдоль траектории полета аномалии силы тяжести. Этим аэрогравиметрическая съемка отличается и от наземных, и от морских гравиметрических работ. Последние, хотя и выполняются в движении, из-за малой скорости судна и его способности лечь в дрейф по своим возможностям ближе к наземным, чем к аэросъемкам.

Низкочастотная фильтрация данных требует определения применительно к аэросъемке понятия «гравиметрический пункт». В качестве такового естественно считать точку в центре интервала осреднения, с которой соотносится значение силы тяжести после сглаживания результатов измерения.

В процессе обработки непрерывного ряда измерений (частота регистрации гравиметра — 18 Гц) сглаженные значения силы тяжести формируются и выдаются, как правило, с интервалом 1 с (80 м при скорости 300 км/ч). Естественно, значения поля в двух соседних пунктах определяются в значительной мере по одним и тем же измерениям и не могут считаться независимыми. Полностью независимыми будут пункты, интервалы осреднения которых не пересекаются, однако это условие избыточно. На рис. 2 представлены весовые функции фильтра Хемминга (имеет весовую функцию, сходную с весовой функцией фильтра Калмана) для гравиметрических пунктов, расположенных вдоль съёмочного профиля через 4 км (примерно половина длины фильтра) при разных интервалах осреднения.

Даже при максимальном интервале осреднения (100 с) общая площадь под весовыми функциями в соседних точках составляет менее 10 % от суммарной площади весовых функций. Таким образом, при скользящем сглаживании данных соседние пункты измерений поля

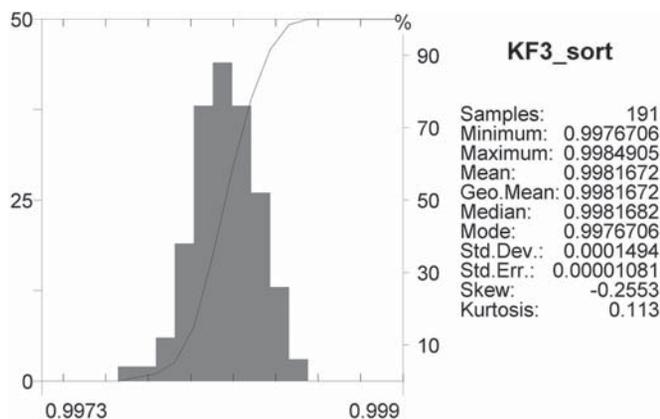


Рис. 1. Гистограмма значений масштабного коэффициента гравиметра GT-2A, определенных в процессе обработки съёмочных вылетов

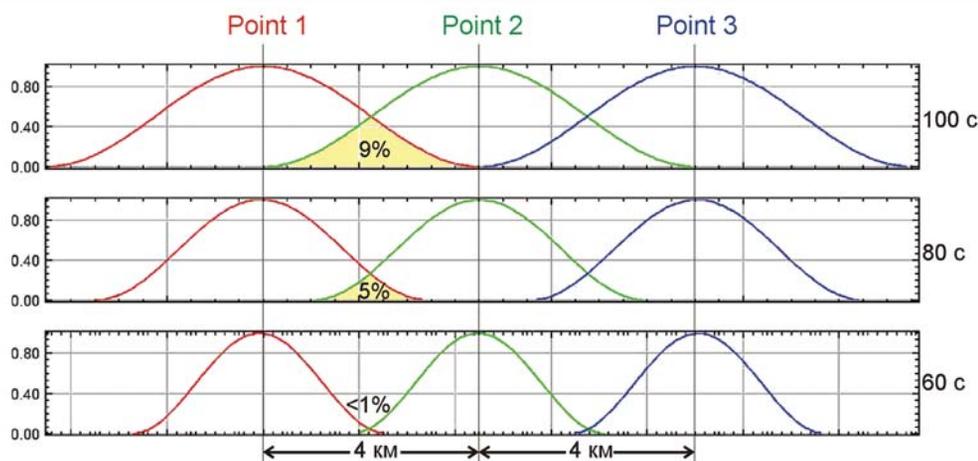


Рис. 2. Весовые функции фильтра Хемминга при разной длине окна фильтрации

на профиле могут считаться практически независимыми, если расстояние между ними превышает интервал, на котором весовая функция используемого фильтра имеет амплитуду более 0,5, что как раз составляет 4 км при осреднении 100 с. Такой промежуток можно назвать «интервалом (базой) эффективного осреднения».

Аналогом последовательности независимых гравиметрических пунктов на съемочном профиле являются наземные пункты измерения в пределах одного звена.

Важнейшими параметрами, характеризующими любую гравиметрическую съемку, являются ее погрешность и густота сети (число пунктов измерения на 1 км²). Вместе они определяют масштаб съемки [2]. Методом оценки погрешности аэрогравиметрии посвящена отдельная статья в этом журнале. Что касается густоты сети, то она зависит от базы эффективного осреднения и расстояния между съемочными профилями.

Систему измерений на площади работ можно представить сетью виртуальных профилей (ортогональных к реальным) с шагом, равным базе эффективного осреднения. Вдоль них с интервалом, равным межпрофильному расстоянию реальной съемки, расположены независимые гравиметрические пункты.

При съемке со скоростью 300 км/ч по сети маршрутов через 1000 м и осреднении данных на интервале 100 с получаем систему виртуальных профилей с шагом 4 км и расстоянием между гравиметрическими пунктами 1000 м. Такая сеть удовлетворяет требованиям [2] к съемкам масштаба 1:100 000. При уменьшении межпрофильного расстояния реальной съемки соответственно уменьшается интервал между гравиметрическими пунктами на виртуальных профилях и увеличивается густота сети гравиметрических пунктов. Аэрогравиметрическая съемка с шагом 2000 м по плотности гравиметрических пунктов удовлетворяет требованиям к съемкам масштаба 1:200 000.

В таблице приведены значения плотности измерений в зависимости от скорости полета, интервала осреднения данных при обработке и межмаршрутного расстояния. Оранжевым цветом выделены ячейки, по плотности наблюдений отвечающие работам масштаба 1:100 000, синим — 1:200 000.

100 с), являются зависимыми примерно на 30 %. Т.е. на 70 % значение в промежуточной точке — это дополнительная информация о поле, которая полностью отсутствовала бы в материалах наземной съемки масштаба 1:100 000 по сети профилей с интервалом 4 км.

Достижимая при аэросъемке плотность гравиметрических пунктов позволяет оценить ее разрешающую способность. Наиболее естественно понятие «разрешающая способность» («пространственное разрешение») определить как горизонтальный размер минимальных по протяженности аномалий, выделяемых при съемке.

Такой термин в работе [2] отсутствует, поскольку, по-видимому, нет точного определения «горизонтального размера аномалии». В повседневной же геофизической практике это понятие, даже при нестрогом определении, используется достаточно широко. Поэтому и термин «разрешающая способность» в аэрогравиметрии вполне можно использовать, по крайней мере, для наглядного описания ее возможностей.

Существует очевидная связь между размерами выделяемых аномалий силы тяжести и плотностью измерений (масштабом съемки). Например, при съемках масштаба 1:100 000 минимальная кондиционная плотность пунктов наблюдений составляет 0,25 пункта на 1 км².

Число независимых измерений на 1 км² при аэросъемках

Межмаршрутное расстояние при съемке, м	Скорость 160 км/ч (вертолет)			Скорость 300 км/ч (самолет)		
	База осреднения 1200 м (сглаживание на интервале эффективного 60 с)	База эффективного осреднения 1700 м (сглаживание на интервале 80 с)	База эффективного осреднения 2200 м (сглаживание на интервале 100 с)	База эффективного осреднения 2200 м (сглаживание на интервале 60 с)	База эффективного осреднения 3100 м (сглаживание на интервале 80 с)	База эффективного осреднения 4000 м (сглаживание на интервале 100 с)
500	1.66	1.19	0.92	0.9	0.64	0.5
1000	0.83	0.60	0.46	0.45	0.32	0.25
2000	0.41	0.30	0.23	0.22	0.16	0.12
4000	0.20	0.15	0.12	0.11	0.08	0.06

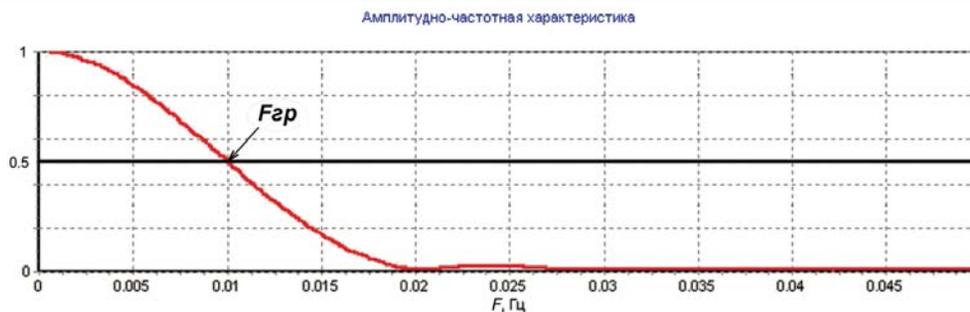


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика фильтра Хемминга с окном 100 с

Из требования [2] «аномалия силы тяжести считается достоверной, если она выделена не менее чем в трех пунктах различных звеньев», из чего следует, что все аномалии, площадь которых превышает 12–15 км², а поперечный размер 3.5–4 км, должны быть зафиксированы при аэрогравиметрической съемке такого масштаба. Это значение можно принять за разрешающую способность аэросъемки.

За рубежом для оценки разрешающей способности аэрогравиметрии используется метод «half sine wave» [6], в соответствии с которым половина длины волны граничной частоты сглаживающего фильтра соответствует минимальному размеру выделяемых аномалий. На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики и весовые коэффициенты фильтра Хемминга с окном 100 с. Граничная частота фильтра равна 0.01 Гц, что при скорости 300 км/ч соответствует гармонике с периодом 8.3 км. Пространственное разрешение такого сглаживания составляет 4–4.5 км, т.е. практически совпадает с полученной выше оценкой разрешения с использованием плотности гравиметрических пунктов.

При фильтрации в окне 80 с граничная частота равняется 0.0125 Гц, соответствующая граничная гармоника имеет период 6.6 км, а пространственное разрешение составляет 3–3.5 км.

Высота съемки.

Естественное для аэрооблетов удаление точек измерения поля от земной поверхности является вторым (после сглаживания) фактором, ограничивающим возможности аэрогравиметрии фиксировать небольшие по интенсивности и размеру аномалии. Для снижения влияния этого фактора следует выполнять съемку на минимально возможной высоте с учетом, конечно, требований по обеспечению безопасности полетов. К примеру, над равнинными территориями и над акваториями высота полетов над земной поверхностью составляет обычно 250–350 м. Эффект удаленности уровня измерений эквивалентен дополнительной низкочастотной фильтрации — сглаживанию аномалий силы тяжести. В работе Андреева Б.А., Клушина И.Г. «Геологическое истолкование гравитационных аномалий» (1962) на основании анализа гравиметрических материалов в разных геолого-тектонических провинциях сделан вывод, что поле на высоте H над земной поверхностью по своему характеру и параметрам аналогично исходному полю, сглаженному в радиусе $3.5 \div 4H$. С учетом этого соотношения результаты съемки на высоте

~300 м представляют аномалии силы тяжести после их осреднения с радиусом 1–1.2 км. Такое сглаживающее способно существенно уменьшить амплитуду аномалий протяженностью менее 2–3 км, но они не являются объектами аэрогравиметрических исследований. Структуры поля, составляющие высокочастотную часть спектра аэрогравиметрических

аномалий с поперечным размером 4–8 км, также подвергаются искажениям, которые однако не являются критичными (амплитуда может уменьшиться на 10–20 %). Для элементов поля протяженностью более 8–10 км эта дополнительная фильтрация не приводит к заметным изменениям их формы и амплитуды.

В целом возможные искажения поля в высокочастотной части спектра аэрогравиметрических аномалий за счет фильтрации данных и удаленности уровня измерений представляются адекватной платой за уменьшение стоимости и времени аэрогравиметрических исследований по сравнению с наземными в 20÷30 и более раз.

Особенности профильной обработки.

При обработке результатов аэросъемки в вычислительном алгоритме наряду с компонентами, имеющими строго детерминированную природу (вертикальные ускорения, нормальное поле, поправки Этвеша, за свободный воздух, за смещение нуля-пункта), есть элементы, определяемые с недостаточной точностью, и неопределенные параметры (масштабный коэффициент гравиметра, поправки за влияние горизонтальных ускорений).

Результаты измерений при съемке могут быть записаны в виде:

$$M_0 F_m = G + v' + \delta G_s + \delta G_d + \delta G_g + \delta v' + \delta F_h,$$

где M_0 — масштабный коэффициент; F_m — показание гравиметра; G — истинное значение силы тяжести в точке измерения; v' — вертикальная скорость гравиметра, измеренная спутниковой навигационной системой; δG_s — поправка Этвеша; δG_d — смещение нуля-пункта (тренд) гравиметра; δG_g — случайная ошибка в показании гравиметра; $\delta v'$ — случайная ошибка в определении вертикальной скорости; δF_h — влияние горизонтальных ускорений, вызванных отклонением оси чувствительности от вертикали места.

Тренд гравиметра вычисляется по формуле:

$$\delta G_d = M_0 (F_{m2} - F_{m1}) (t - t_1) / (t_2 - t_1),$$

где t — текущее время; t_1 — время начальной опоры; t_2 — время конечной опоры; F_{m1} — среднее показание гравиметра на начальной опоре; F_{m2} — среднее показание гравиметра на конечной опоре.

Измеренная сила тяжести G_m равняется:

$$G_m = M_0 F_m - v' - \delta G_s - \delta G_d - \delta F_h,$$

или

$$M_0 F_m - k_x A_x - k_y A_y = G_m + v' + \delta G_s + \delta G_d,$$

где $k_x A_x$ и $k_y A_y$ — поправки за горизонтальные ускорения A_x и A_y , обусловленные погрешностью ориентировки оси чувствительности датчика.

Вычисление масштабного коэффициента M_0 вместе со значениями k_x, k_y выполняется для каждого рейса на основе многомерной линейной регрессии методом наименьших квадратов по совокупности всех данных, полученных на временном интервале между измерениями на аэродромном опорном пункте до вылета на съемку и после посадки. При необходимости в состав подбираемых параметров могут быть включены и другие коэффициенты. После ввода поправок за нормальное поле и высоту съемки определяются аномалии силы тяжести в свободном воздухе вдоль траектории полета. На этом же этапе для минимизации влияния случайных ошибок гравиметра и спутниковых навигационных данных выполняется низкочастотная фильтрация результатов измерений адаптивным фильтром Калмана (см. выше).

Аномалии Буге.

Аномалии силы тяжести в редукции Буге, отражая распределение плотностных неоднородностей Земли ниже ее физической поверхности, являются основным отчетным материалом гравиметрических работ. Аномалия Буге в аэрогравиметрии — это полный аналог аномалии Буге с поправкой за рельеф в наземной гравиметрии. Понятие «простой аномалии Буге», получаемой после учета притяжения только плоскопараллельного слоя, в аэрогравиметрии отсутствует, поскольку лишено смысла.

Рельеф местности задается его цифровой моделью — матрицей. Размер ячейки матрицы должен обеспечивать отображение в модели форм рельефа, размеры которых соизмеримы с высотой съемки над ними. В РФ радиус учета притяжения топографических масс равен 200 км, за рубежом — обычно 166.7 км (внешний радиус 15-й зоны Хейфорда).

Одним из отличий аэросъемки являются, как правило, большие размеры площади работ и, как следствие, необходимость создания цифровых моделей рельефа на огромные территории. Например, при работах на северо-востоке арктического побережья РФ была построена модель земной поверхности с ячейкой 500×500 м на площади 2 000 000 км² (12 % всей территории России, или 3 площади такой страны, как Франция). Благоприятным фактором при этом является нивелирование (из-за естественного удаления точки измерения от земной поверхности) влияния ближней зоны учета рельефа и связанных с этим проблем.

Исходные данные для цифровой модели поля.

Исторически сложилось, что карты аномалий силы

тяжести строятся по точечным данным, из чего автоматически не следует, что это оптимальный вариант. Гравиметрическая карта — не просто точное изображение на плоскости каталога гравиметрических пунктов, а модель поля, при построении которой всегда выполняется генерализация данных, определяемая масштабом съемки.

Единичные наземные измерения формируют массив данных, в которых случайным образом присутствует влияние в т.ч. мелких локальных элементов, не отвечающих масштабу съемки. Аэрогравиметрия дает возможность строить модели поля по данным иной структуры. В них высокочастотная составляющая, не являющаяся объектом исследований, естественным образом частично или полностью удалена.

Рассмотрим модельный пример, соответствующий съемкам масштаба 1:200 000. На рис. 4 показана сумма аномалий шириной 12 км (объект исследования) и 2 км (не соответствует масштабу съемок). Без учета погрешностей съемок зеленая кривая представляет модель поля по дискретным наземным данным с шагом 2000 м, а синяя — по аэрогравиметрическим (после фильтрации в интервале 100 с и на высоте 300 м).

Не вдаваясь в дискуссию, какая кривая на рисунке лучше отражает объект исследования и отвечает масштабу съемки, отметим, что отдаленность уровня измерений от земной поверхности и фильтрация данных не приводят априори к более негативным последствиям при построении модели гравитационного поля масштаба 1:200 000, чем его квантование.

Опорная сеть.

Опорная сеть в наземной гравиметрии обычно создается перед съемкой на рядовых пунктах и служит для учета смещения нуль-пунктов гравиметров и приведения всех результатов к единому уровню.

В аэрогравиметрии смещение нуль-пункта учитывается по результатам измерения поля на аэродромных опорных пунктах (АОП) перед вылетом на съемку и после приземления. Эти пункты при работе из нескольких аэродромов подлежат увязке. Собственно опорная сеть при аэросъемке не является, как при наземных работах, системой пунктов измерения повышенной точности, получаемых в результате уравнивания специальных полигонов. Опорная сеть в нашем случае пред-

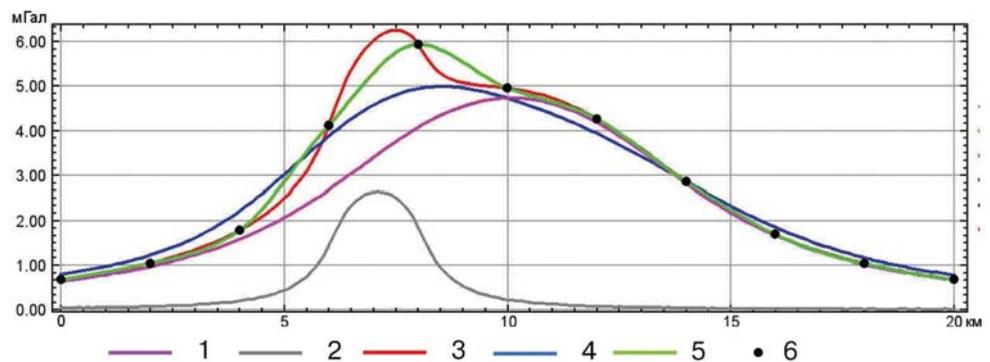


Рис. 4. Модельный пример отражения аномалий по данным наземной и аэрогравиметрической съемки. Аномалии шириной: 1 — 12 км, 2 — 2 км; результат: 3 — суперпозиций двух аномалий, 4 — пересчета аномалий на высоту 300 м и фильтрации, 5 — интерполяции точечных значений; 6 — точечные значения с шагом 2 км

ставляет собой совокупность маршрутов, ортогональных рядовым маршрутам. Она создается в процессе общей съемки и отличается от рядовой сети только увеличенным в 5–10 раз межмаршрутным расстоянием.

Основным предназначением опорной сети является увязка рядовых маршрутов — приведение всех результатов съемки к единому уровню. Эта процедура выполняется в два этапа по методике ВИРГа, предложенной для аэромагнитной съемки [3].

На первом этапе производится передача отсчетного уровня опорных маршрутов от одного к другому с помощью рядовых маршрутов. Значения аномалий силы тяжести на каждом из опорных маршрутов изменяются на постоянную величину — среднее значение разности между этим опорным и всеми пересекающими его рядовыми маршрутами. В итоге аномалии опорного маршрута наилучшим образом соответствуют всей совокупности аномалий на рядовых маршрутах в точках их пересечения. Этим достигается так называемое статистическое уравнивание самой опорной сети. Поскольку обычно можно использовать большое число рядовых маршрутов (многие десятки, а иногда и сотни), увязка осуществляется весьма надежно. Если в какой-либо точке разность аномалий имеет недопустимо большое значение, она может быть исключена из процедуры уравнивания. Тем самым грубые ошибки в отдельных точках не распределяются по сети, а удаляются и не влияют на результат.

На втором этапе выполняется статистическая увязка рядовых маршрутов по опорной сети. Поправки в виде постоянной величины вносятся уже во все рядовые маршруты, обеспечивая наилучшее их совпадение с увязанной опорной сетью в узлах пересечений, тем самым обеспечивая единый отсчетный уровень всем аэрогравиметрическим данным. Статистическая увязка, ограничивающаяся введением в маршруты поправок в виде константы (тренда нулевого порядка), не приводит к какому-либо перекосам в результатах съемки. Алгоритм увязки реализован, например, в программе *OASIS_Montaj*.

Построение цифровой модели.

Построение карт аномалий силы тяжести по наземным данным сводится к простой интерполяции значений поля на пунктах его измерения в узлы матрицы. В аэрогравиметрии эту процедуру приходится совмещать со специальной обработкой для дополнительной очистки данных от остаточного влияния возмущающих ускорений летательного аппарата. При профильной обработке результатов съемки эффективность учета таких ускорений составляет порядка 99.990–99.995 %. Это — прекрасный результат. Однако с учетом реальных ускорений самолета на съемочных маршрутах неучтенные 0.01–0.005 % — это в абсолютных значениях погрешности на уровне 0.2 — 3 мГал. Эффект их присутствия демонстрирует рис. 5, на котором представлен фрагмент карты аномалий, построенной после про-

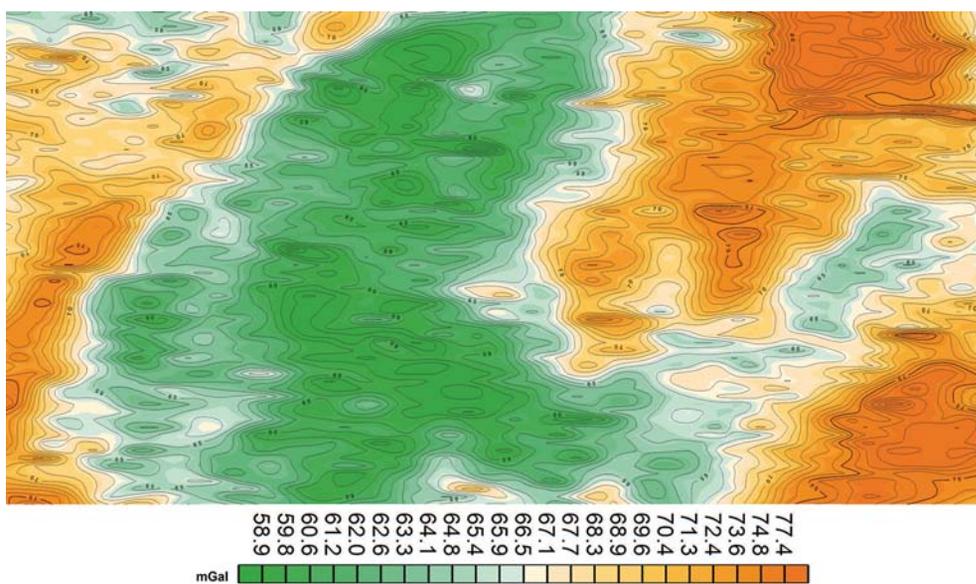


Рис. 5. Фрагмент карты аномалий, построенной по нечетным маршрутам съемки до специальной обработки

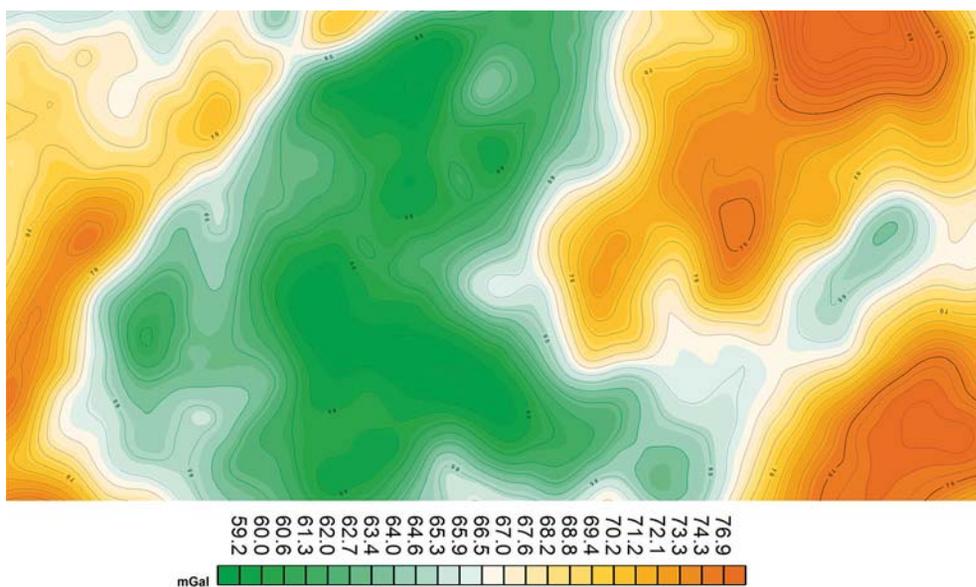


Рис. 6. Фрагмент карты аномалий, построенной по нечетным маршрутам съемки после специальной обработки

фильной обработки данных (использованы только нечетные маршруты).

Съемка выполнялась в Восточной Сибири при весьма неблагоприятных условиях — в очень жаркую погоду при интенсивной болтанке летательного аппарата. Среднеквадратическое значение вертикальных ускорений на маршрутах достигало 40 Гал (обычно менее 30 Гал). Тот же фрагмент карты после обработки представлен на рис. 6.

Алгоритм процедуры, минимизирующей эти влияния состоит в следующем:

все съемочные профили совершенно формально делятся на две группы с четными и нечетными номерами;

по полученным массивам данных строятся две идентичных матрицы, которые рассматриваются как результаты независимых друг от друга съемок;

выполняется сравнение полученных реализаций и итерационный процесс поиска в них повторяющихся структур (аномалий): сначала самых крупных (региональных), затем все более мелких;

все повторяющиеся структуры обеих реализаций объединяются в итоговую сеть;

неповторяющиеся составляющие поля рассматриваются как остаточные погрешности измерений и удаляются из результатов съемки.

Подробно эта процедура была описана ранее в работе [7] и на сайте АО «ГНПП «Аэрогеофизика». Здесь же отметим только одну важную ее особенность — в ней отсутствуют элементы сглаживания. Это демонстрирует рис. 7, на котором представлена исключенная компонента поля (разность карт на рис. 5 и рис. 6). Ее составляют элементы, присутствующие только на нечетных маршрутах и отсутствующие на четных маршрутах, притом, что никакого дополнительного сглаживания для их выделения ни вдоль съемочных профилей, ни вкрест им не проводилось.

Таким образом, пространственное разрешение аэрогравиметрии определяется в основном параметрами калмановской фильтрации и не ухудшается в процессе построения цифровой модели аномалий силы тяжести.

Редуцирование (на плоскость, на рельеф).

Результаты съемки и обработки данных представляют собой значения аномалий силы тяжести на уровне полета. При съемке на постоянной барометрической высоте (альтитуде) процедуру пересчета (редуцирования) поля на другую поверхность, к примеру, поверхность рельефа, вообще целесообразно не проводить и данные, полученные в воздухе, представлять в качестве отчетного материала.

Интерпретация наземных данных в случае сильно

расчлененного рельефа затруднена и может привести к существенным ошибкам. Приходится использовать аналитическое продолжение аномалий вверх на некоторую плоскую поверхность, что не всегда удается сделать корректно. С аэрогравиметрическими данными, полученными на постоянной высоте, такой проблемы нет.

При выполнении аэросъемки с генеральным обтеканием рельефа из-за того, что поверхность наблюдения в пространстве не закреплена, возникает необходимость редуцирования данных к некоторой заданной поверхности, в качестве которой целесообразно использовать либо горизонтальную плоскость, проходящую выше доминантных вершин на площади работ, либо поверхность Земли. Предпочтительным является пересчет данных вверх на горизонтальную плоскость. Однако ее удаленность от дневной поверхности в местах понижения рельефа может достигать сотен и тысяч метров, что неизбежно приведет к искусственному ухудшению пространственного разрешения съемки.

Нами редуцирование поля силы тяжести выполняется с помощью специальной программы, на основе аппроксимации результатов съемки полем эквивалентного субгоризонтального слоя с последующим решением прямой задачи.

Оценка погрешности аэросъемки.

Учитывая особую важность этого параметра для характеристики аэрогравиметрии и определения области ее применения, оценке погрешности посвящена отдельная статья в журнале.

Проблемы аэрогравиметрии

Аэрогравиметрия как любой новый исследовательский метод на практике сталкивается с целым рядом еще не полностью решенных проблем. Их присутствие не может и не должно препятствовать проведению работ, однако разрешение таких проблем, несомненно, будет способствовать повышению качества и эффективности аэросъемок.

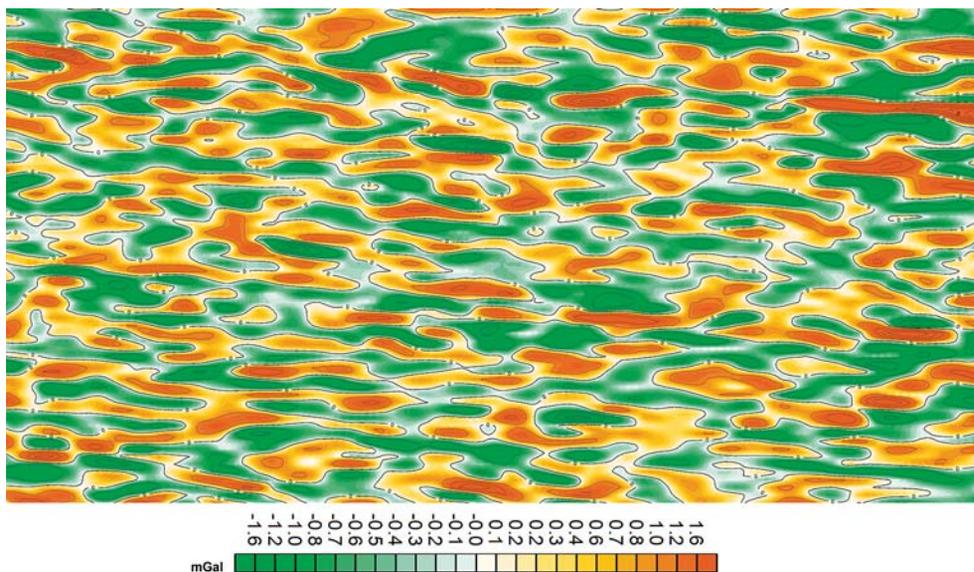


Рис. 7. Исключенная из результатов съемки компонента на нечетных маршрутах

Метрология.

Одной из важнейших проблем аэрогравиметрии, на которую постоянно обращают внимание эксперты, является метрологическое обеспечение съемки. Описанная выше процедура определения масштабного коэффициента для каждого рабочего вылета с использованием множественной линейной регрессии с точки зрения классической метрологии не является полностью легитимной.

Решением проблемы могло бы стать создание в РФ специального аэрогравиметрического эталонного полигона, как это сделано, например, в Бразилии. Достаточно сертифицировать один прямолинейный профиль длиной 60–80 км с перепадом поля силы тяжести в несколько десятков мГал и выраженной локальной аномалией размером 6–10 км. Этот профиль должен опираться на наземную съемку масштаба не мельче 1:25 000 в полосе шириной 8–10 км, что позволит выполнять корректное продолжение поля на любые реальные высоты аэросъемки. Такой полигон позволил бы не только контролировать эталонирование гравиметров, но и тестировать различные новации в аппаратуре, методике съемки и обработке данных.

Летательные аппараты.

В настоящее время аэрогравиметрические съемки в РФ выполняются преимущественно на самолетах Ан-30 (Ан-26). Это тяжелые и дорогие в эксплуатации машины. Желательно, как это принято за рубежом, использовать небольшой, дешевый и менее скоростной самолет, такой как *Cessna Grand Caravan*. К сожалению, подобные летательные аппараты имеют меньший запас летного времени. Опыт аэросъемки на самолете Ан-2 показал нецелесообразность его использования из-за очень высокого уровня возмущающих ускорений. Кроме того парк Ан-2 сильно изношен и имеются проблемы с авиационным топливом — бензин приходится завозить из Финляндии. Вертолет Ми-8 пригоден для съемок, но он дорогой в эксплуатации и имеет относительно малый запас летного времени. На нем целесообразно проводить работы масштаба 1:50 000 на небольших площадях при малой удаленности от аэропорта базирования.

Улучшению качества съемки способствовало бы и использование современного пилотажно-навигационного оборудования летательных аппаратов, в частности, автопилотов. При съемках территорий со сложным рельефом и большим перепадом высот полеты выполняются с обтеканием земной поверхности, что позволяет исключить недопустимо большое удаление уровня измерений от поверхности Земли и потери детальности съемки на части площади. Для обеспечения такой схемы полетов на стадии проектирования строится модель поверхности, по которой должны летать съемочные самолеты.

Эта методика имеет и негативные стороны. Пилот вынужден на протяжении всей съемки (5–7 ч и более) удерживать высоту самолета в ручном режиме. Чем сложнее поверхность, тем труднее провести по ней летательный аппарат плавно, без каких-либо рывков. В итоге результаты съемки дополнительно, помимо ускорений, обусловленных турбулентностью воздуха

и движением по негоризонтальной поверхности, осложнены действиями пилота при выдерживании заданной поверхности полета. Решением проблемы могли бы стать автопилоты, в которых имелся бы высотный канал проводки самолета по спутниковым данным, как это реализовано в автопилотах самолетов *Cessna Grand Caravan*. К сожалению, штатные автопилоты самолетов Ан-26 и Ан-30 такой возможности не имеют.

Увязка аэродромных опорных пунктов.

В процессе вычисления аномалий силы тяжести вдоль съемочных профилей их уровень определяется принятым при обработке значением поля на АОП (аэродромном опорном пункте — точке, в которой производятся измерения поля перед каждым вылетом и после посадки). Если полеты, как это обычно бывает, выполняются из нескольких аэропортов, возникает необходимость увязки уровней АОП между собой.

В принципе задача решается передачей значений силы тяжести МГСС-71 на каждый АОП с ближайших ОГП-I или ОГП-II. К сожалению, как показывает опыт, значительная часть гравиметрических опорных пунктов на аэродромах и вблизи от них в настоящее время утеряна. Поэтому на стадии проектирования схема отработки площади составляется так, чтобы на каждом участке съемки имелось достаточно представительное число пересечений рядовых и опорных маршрутов, выполненных из разных аэродромов. Для увязки данных используются средние значения невязок в этих точках пересечения. В принципе это обеспечивает увязку АОП, но серьезно осложняет организацию всего процесса съемки.

Полным решением проблемы было бы использование для определения значения силы тяжести на АОП мобильных абсолютных гравиметров. Такие приборы, в том числе отечественной разработки, в виде макетов уже существуют, что позволяет надеяться на возможность их применения при аэросъемках в ближайшие годы.

Редуцирование.

Описанная выше процедура редуцирования аэрогравиметрических аномалий вниз на земную поверхность не улучшает качество получаемых в итоге карт. Для корректной замены наблюдаемого поля полем субгоризонтального слоя необходимо использовать аппроксимирующую модель в бесконечных пределах, что конечно невозможно. По нашим оценкам, в процессе редуцирования вниз погрешность цифровых моделей поля силы тяжести увеличивается на 0.1–0.2 мГал, даже если высота съемки над земной поверхностью составляет 200–300 м. Необходимы разработки новых подходов и алгоритмов для минимизации этой проблемы. Такие работы в настоящее время ведутся специалистами АО «ГНПП «Аэрогеофизика».

Повышение точности измеряемых компонентов съемки.

Серьезным резервом аэрогравиметрии является совершенствование всех аппаратурно-технических элементов, участвующих в процессе измерения поля силы тяжести. Это, прежде всего, точность определения координат летательного аппарата с помощью спутниковых навигационных систем. В настоящее время идет

подготовка к оснащению системы *GPS* спутниками нового 3-го поколения, которые, как ожидается, повысят точность позиционирования более чем в 3 раза. Началось развертывание Европейской системы *Galileo*. Совершенствуется ГЛОНАСС.

Разработчики аэрогравиметра GT-2A работают над повышением его стабильности и надежности, улучшением стабилизации оси чувствительности датчика на основе новых конструктивных разработок и использования современной элементной базы. Совершенствуются алгоритмы обработки.

Эти и ряд других факторов позволят без потери точности уменьшить интервал сглаживания данных с нынешних 100 с (при благоприятных условиях — 80 с) до преимущественно 60 с и менее, что, в свою очередь, существенно повысит разрешающую способность аэрогравиметрии, а значит — и область ее применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин Ю.В., Голован А.А., Парусников Н.А. Уравнения аэрогравиметрии. Алгоритмы и результаты испытаний. — М.: МГУ, 2001.
2. Инструкция по гравиразведке. — М., 1980.
3. Инструкция по магниторазведке. — М., 1981.
4. Могилевский В.Е., Контарович Р.С. Аэрогравиметрия — новый метод изучения труднодоступных территорий, перспективных на углеводородное сырье // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2004. — № 2. — С. 40–43.
5. Топре В. Гравиметрия. — М.: Мир, 1999.
6. Argyle M., Ferguson S., Sander L., Sander S. AIRGrav results: a comparison of airborne gravity data with GSC test site data / The Leading Edge, Ottawa, 2000, 19. — P. 1134–1138.
7. Mogilevsky V., Kaplun D., Kontarovich O., Pavlov S. Airborne Gravity in Aerogeophysics Inc. // IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: static and mobile measurements, S. Petersburg, 2010. — P. 42–46.

© Могилевский В.Е., Бровкин Г.И., Контарович О.Р., 2015

Могилевский Владимир Ефимович // volmog@list.ru
Бровкин Герман Игоревич // germanbrovkin@maol.ru
Контарович Олег Рафаилович // olegk@aerogeo.ru

МЕТОДОЛОГИЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

УДК 550.83, 550.8.052

Бабаянц П.С. (АО «ГНПП «Аэрогеофизика»)

АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ — ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО ПРОЦЕССА

*На основе анализа особенностей и преимуществ современных аэрогеофизических технологий показана их эффективность для решения широкого круга задач при среднемасштабном геологическом картировании, поисках месторождений углеводородов и твердых полезных ископаемых. Аэрогеофизические технологии являются эффективным средством оптимизации геологоразведочного производства за счет сокращения времени на опоскование территории и более точного позиционирования дорогостоящих сейсмических и горно-буровых работ, что делает их использование особенно актуальным в условиях кризиса. **Ключевые слова:** аэрогеофизические методы, интерпретация, картирование, поиски углеводородов, поиски месторождений твердых полезных ископаемых.*

Babayants P.S. (Aerogeophysics)

AIRBORNE GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES ARE THE EFFICIENT MEANS FOR OPTIMIZING GEOLOGICAL EXPLORATION

After analyzing special features and advantages of the state-of-the-art airborne geophysical technologies, their efficiency for performing a wide range of tasks for middle scale geological mapping, search for hydrocarbon and solid mineral deposits was demonstrated. Airborne geophysical technologies are efficient means to optimize geological exploration through reducing the amount of time spent on prospecting the territory and on exact positioning of cost-intensive seismic and rock drilling

*works, which makes them even more relevant in a down economy. **Key words:** airborne geophysical methods, interpretation, mapping, search for hydrocarbon and solid mineral deposits.*

В последние годы наблюдается устойчивый рост доли аэрогеофизических работ в общей структуре геологоразведочного производства как в абсолютном, так и в относительном выражении. Повышение спроса потенциальных недропользователей на аэрогеофизические съемки обусловлено в первую очередь резким увеличением их информативности и поисковой отдачи по сравнению с аналогичными работами прошлых лет.

В числе главных факторов, обусловивших резкий рост эффективности аэрогеофизических работ, следует отметить:

1. Внедрение микропроцессорных технологий в геофизическом приборостроении, что обеспечило возможность цифровой регистрации и обработки сигналов и соответственно позволило существенно усилить помехозащищенность измерительного канала, заметно увеличить чувствительность и разрешающую способность аппаратуры.

2. Внедрение цифровой регистрации сигналов, а также использование высокопроизводительных компьютеров для обработки и регистрации данных, что позволило увеличить пропускную способность измерительного канала и тем самым заметно улучшить пространственное разрешение съемки.

3. Использование для привязки результатов измерений спутниковых навигационных систем, освоение которых позволило не только увеличить более чем на порядок точность плановой привязки результатов измерений, но и осуществлять с высокой точностью их высотную привязку.