

УДК

## Аэрогравиметрические исследования в Арктике



**В.Е. Могилевский**  
/ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика»/



**О.Р. Контарович**  
/ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика»/

*Представлен один из методов геолого-геофизических исследований - аэрогравиметрия (съёмка гравитационного поля Земли с борта летящего самолета/вертолета), позволяющий в сжатые сроки получить геофизическую информацию с тех мест, где наземные исследования затруднены или невозможны. Описаны преимущества метода перед традиционными гравиметрическими съёмками. Рассказывается о съёмке, проведенной на обширной территории, примыкающей к арктическому побережью РФ. Показан процесс обработки материалов съёмки. Представлена цифровая модель (карта) аномалий силы тяжести в редукции Буге с учетом топографии на земной поверхности. Описана процедура вычисления погрешностей аэрогравиметрической съёмки.*

**Ключевые слова:** Арктика, аэрогравиметрия, аэрогравиметрические комплексы GT-2A, аэромагнитометры «Аэромастер-VN99», спутниковые системы навигации GPS NAVSTAR, пилотажно-навигационные средства ПНС-А, цифровая модель поля силы тяжести, погрешности аэрогравиметрической съёмки.

**В** последние 10-15 лет и в РФ, и за рубежом наблюдается все более широкое внедрение в практику геолого-геофизических исследований аэрогравиметрии – съёмки гравитационного поля Земли с борта летящего самолета/вертолета. Этот метод имеет ряд несомненных преимуществ перед традиционными гравиметрическими съёмками: быстрота получения материала, высокая экономическая эффективность (особенно в труднодоступной местности – горных районах, заболоченной тундре, акваториях морей, транзитных зонах) и возможность изучения поля силы тяжести в трехмерном пространстве (на разных высотных уровнях).

В России основной объем аэрогравиметрических работ выполняет ЗАО «ГНПП Аэрогеофизика» [2]. С 2005 г. компания провела съёмки масштабов 1 : 50 000 – 1 : 1 000 000 в РФ и за рубежом (Бразилия, Колумбия, Сомали, Габон, Кения, Узбекистан) на площади более 2 500 000 кв. км. Съёмка, представляемая в этой статье, выполнялась в 2011-2013 гг. Она является наиболее крупным и сложным объектом наших аэрогравиметрических исследований.

Съёмка проводилась на обширной территории, примыкающей к арктическому побережью РФ (**рис. 1**) в пределах 132° в.д. – 174° з.д.; 68° с.ш. - 72° с.ш. (9 планшетов масштаба 1 : 1 000 000: R-53...R-01). Общая площадь работ составила 930 000 кв. км (для наглядности – приблизи-



Рис. 1. Площадь аэрогеофизической съемки на северо-восточном арктическом побережье РФ

тельно такую площадь имеют вместе взятые Украина, Белоруссия, Литва и Латвия).

Полеты выполнялись на самолетах Ан-30 и Ан-26, аэродинамика которых обеспечивает сравнительно устойчивый полет без интенсивной болтанки при слабой и умеренной турбулентности атмосферы.

Самолеты были оборудованы: аэрогравиметрическими комплексами GT-2A (ОАО «Гравиметрические технологии», Россия), аэромагнитометрами «Аэромастер-VN99» (ГНПП «Аэрогеофизика», Россия) и спутниковыми системами навигации GPS NAVSTAR. Аэрогеофизическая съемка проводилась со скоростью 300 км/час по системе широтных рядовых и ортогональных к ним опорных маршрутов. Расстояние между рядовыми маршрутами составляло 2 км; между опорными – 20 км.

Площадь работ характеризуется сложным рельефом с перепадом высот от 2450 до 0 м над уровнем моря. Обычно выполняемые при аэрогравиметрических измерениях полеты на постоянной барометрической высоте в этой ситуации приводят к недопустимо большому удалению уровня измерений от земной поверхности и потере детальности съемки на значительной части площади. Поэтому здесь впервые в нашей практике полеты выполнялись с генеральным обтеканием форм рельефа дневной поверхности. Для

обеспечения такой схемы полетов съемочные самолеты были дополнительно оборудованы автономными пилотажно-навигационными средствами ПНС-А (ОАО «Текнол», Россия). Эти устройства сохраняют в своей памяти и представляют на специальном мониторе трехмерный графический образ маршрута, позволяя пилоту в режиме активного вождения выдерживать нужную высоту летательного аппарата.

Для формирования массива высот по каждому маршруту на стадии проектирования была смоделирована поверхность, по которой должны лететь съемочные самолеты. При ее построении учитывались три, вообще говоря, противоречащих друг другу требования: соблюдение безопасности полетов; необходимость выполнения съемки на минимально возможной высоте; обеспечение приемлемого уровня вертикальных ускорений, воздействующих на гравиметр при полете по этой поверхности, т.е. ее максимально возможной гладкости. Задача оказалась нетривиальной, но в итоге была решена (рис. 2). Средняя высота съемки при полете по этой поверхности составляет 600 м. В северо-восточной части площади работ находится территория государственного природного заповедника «Остров Врангель» (сам о. Врангель и о. Геральд в 80 км к востоку), над которым запрещены

полеты любых воздушных судов на высоте менее 2000 м от земной поверхности. Поэтому высота съемки с учетом рельефа о. Врангель была увеличена здесь до 2500 м над уровнем моря. Дополнительные вертикальные ускорения гравиметра за счет негоризонтальности поверхности съемки не превышают 6 Гал. Среднеквадратическое отклонение реальной высоты полета от заданной поверхности составило  $\pm 9,6$  м.

Обработка материалов съемки проводилась по отработанной более чем за десять лет схеме [3]. Она позволяет с максимально возможной точностью учитывать возмущающие ускорения, воздействующие в полете на гравиметр, вычислять все необходимые поправки, увязывать данные и пересчитывать их в равномерную сеть для представления результатов съемки в виде цифровой модели поля силы тяжести в редукции Буге с учетом топографии в условном уровне.

Важным этапом обработки являлась привязка аэропортов к единому уровню. Огромные размеры площади вынудили нас производить полеты последовательно с семи аэродромов. При этом уровень получаемых аномалий определяется полем на аэродромном опорном пункте (АОП), в качестве которого обычно выступает место стоянки самолета. Здесь ежедневно для учета

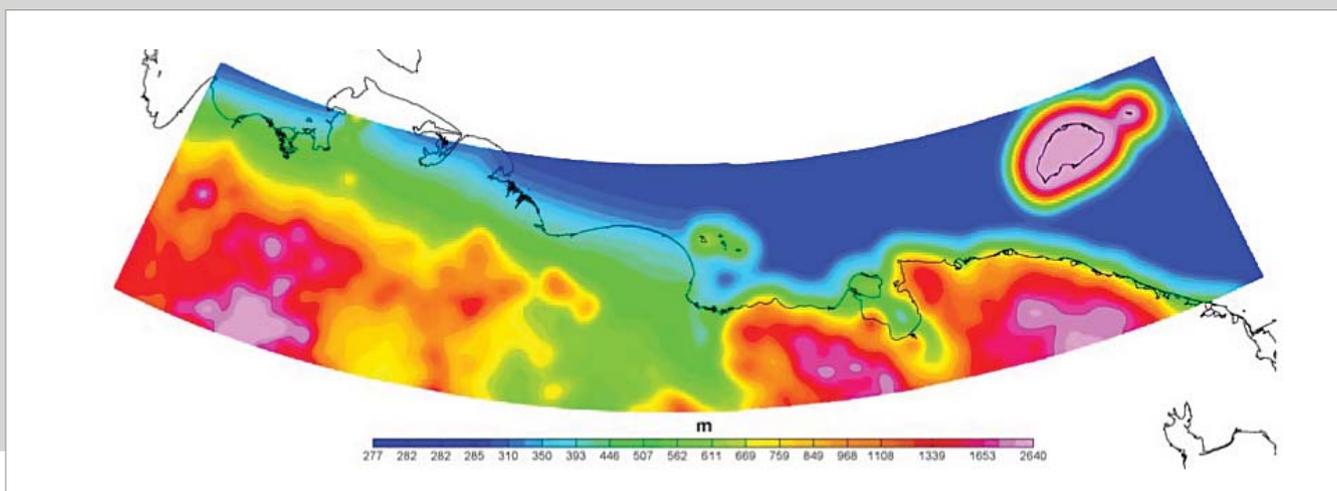


Рис. 2. Поверхность съемки, обеспечивающая генеральное обтекание рельефа

смещения нуля-пункта гравиметра выполняется запись поля до вылета на работу и после прилета. Увязка аэропортов, в принципе, легко решается передачей на АОПы значений силы тяжести с ближайших опорных пунктов II класса, которые во времена СССР были созданы на всех аэродромах. К сожалению, к настоящему времени, как показывает наш опыт, эти пункты практически повсеместно утеряны. С учетом этой ситуации обработка площади была спроектирована таким образом, чтобы получить большое количество точек пересечения рядовых и опорных маршрутов, опирающихся на разные аэропорты.

Средние значения разности аномалий в этих точках использовались для увязки АОП. Такая увязка с учетом сотен и тысяч точек пересечения маршрутов для каждой пары аэропортов (всего их более 20 000) оказалась вполне надежной.

Притяжение рельефа в соответствии с требованиями инструкции [1] рассчитывалось в радиусе 200 км, для чего была построена цифровая модель земной поверхности, включая поверхность дна морей, на площади более 2 000 00 кв. км.

Аэрогравиметрия не является дистанционным методом в том смысле, что получаемые аномалии пространственно относятся не к точкам земной поверхности, над

которой проводится съемка, а к точкам, составляющим траекторию самолета в процессе измерений. Для последующего использования данных их необходимо привести к земной поверхности. Эта процедура выполнялась в два этапа. Сначала методом подбора была построена аппроксимационная модель в виде горизонтального слоя в нижнем полупространстве с переменной избыточной плотностью, поле силы тяжести которого на уровне полетов эквивалентно результатам съемки (среднеквадратическое расхождение составило 0,045 мГал). На втором этапе решением прямой задачи было рассчитано поле этого горизонтального слоя на земной поверхности (уровне моря на акватории).

Построенная в итоге по материалам аэросъемки цифровая модель (карта) аномалий силы тяжести в редукции Буге с учетом топографии на земной поверхности представлена на рис. 3.

Обязательным элементом любой гравиметрической съемки является процедура вычисления ее погрешности. В наземной гравиметрии основным параметром, определяющим качество съемки, является погрешность определения аномалии [1], для вычисления которой используются результаты повторных измерений на контрольных точках. В аэрогравиметрии и у нас

в стране, и за рубежом [4] качество оценивается в основном с использованием погрешности итогового продукта съемки – цифровой модели поля силы тяжести. Эта величина определяется в результате сравнения реализаций поля в пространственно совмещенных ячейках матриц, построенных по двум массивам данных из четных и нечетных маршрутов. Эти реализации считаются независимыми, поскольку соответствующие им маршруты, как правило, выполняются в разных рейсах и проходят процедуру увязки по разным опорным сетям. Независимость, конечно, условная, поскольку измерения выполняются на одном самолете, с одной аппаратурой и по одной методике. Но при оценке погрешности аэросъемки такое допущение возможно. Получаемая в итоге величина аналогична (хотя и не полностью идентична) «полной погрешности интерполяции» при наземных работах [1]. Для описываемой здесь съемки она составила  $\pm 0,67$  мГал.

На рассматриваемой площади в 70 – 90-х годах прошлого столетия проводились наземные гравиметрические съемки масштаба 1 : 200 000, результаты которых на планшетах R-53...R-57 были частично доступны. Это позволило провести сопоставление наземных и аэрогравиметрических данных. Сравнение было выполнено в двух

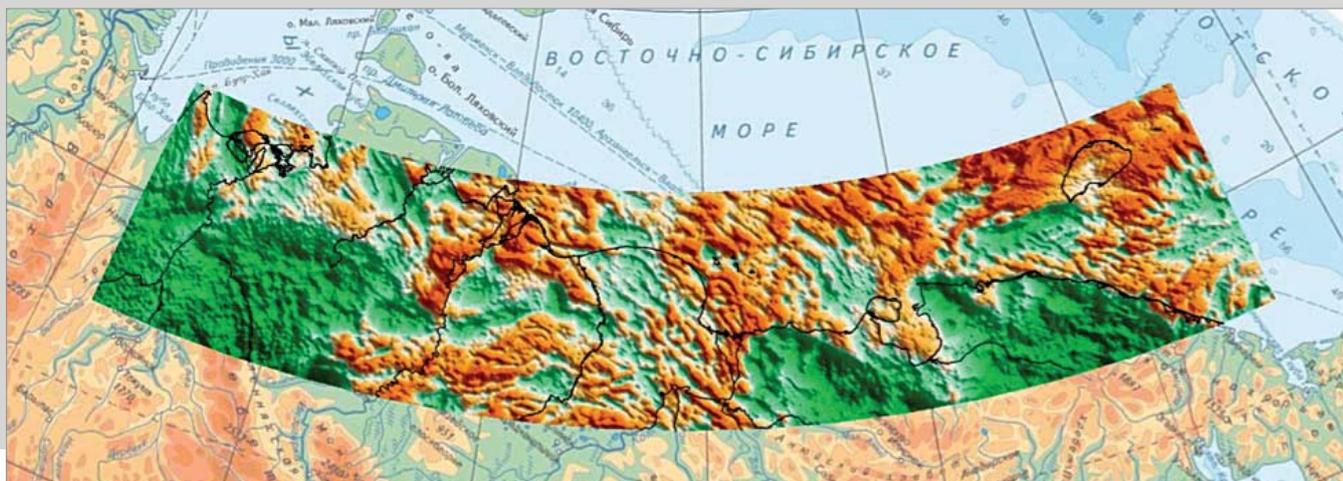


Рис. 3. Карта аномалий силы тяжести в редукции Буге на земной поверхности по материалам аэрогравиметрической съемки

вариантах: на земной поверхности после редуцирования аэроданных вниз и на уровне съемки после пересчета наземных данных вверх (см. таблицу). Погрешность съемок определялась в предположении их равнозначности. Справедливость этого допущения подтверждается, во-первых, совпадением в целом

полученных величин с погрешностями, декларированными авторами наземных съемок (0,50...0,84 мГал), и, во-вторых, приведенной выше оценкой аэрогравиметрических данных по внутренней сходимости (различие – менее 0,1 мГал). Таким образом, оценка погрешности аэрогравиметрической съемки на

уровне 0,6 – 0,7 мГал является обоснованной.

Аэрогравиметрические измерения всегда выполняются в комплексе с аэромагнитной съемкой. На рис. 4 представлена карта аномального магнитного поля, построенная по результатам этих работ. Погрешность карты ( $\Delta T$ )а, оценен-

**Сопоставление наземных и аэрогравиметрических данных**

Планшеты	Число точек сопоставления	На земной поверхности		На уровне аэросъемки	
		RMS разности аномалий, мГал	Погрешность съемок, мГал	RMS разности аномалий, мГал	Погрешность съемок, мГал
R-53	2987	1,08	0,77	0,83	0,59
R-54	9004	1,10	0,78	0,84	0,60
R-55	12674	1,05	0,74	0,78	0,55
R-56	12468	1,05	0,74	0,77	0,55
R-57	13548	1,04	0,74	0,79	0,56
Вся площадь	50681	1,06	0,75	0,80	0,57

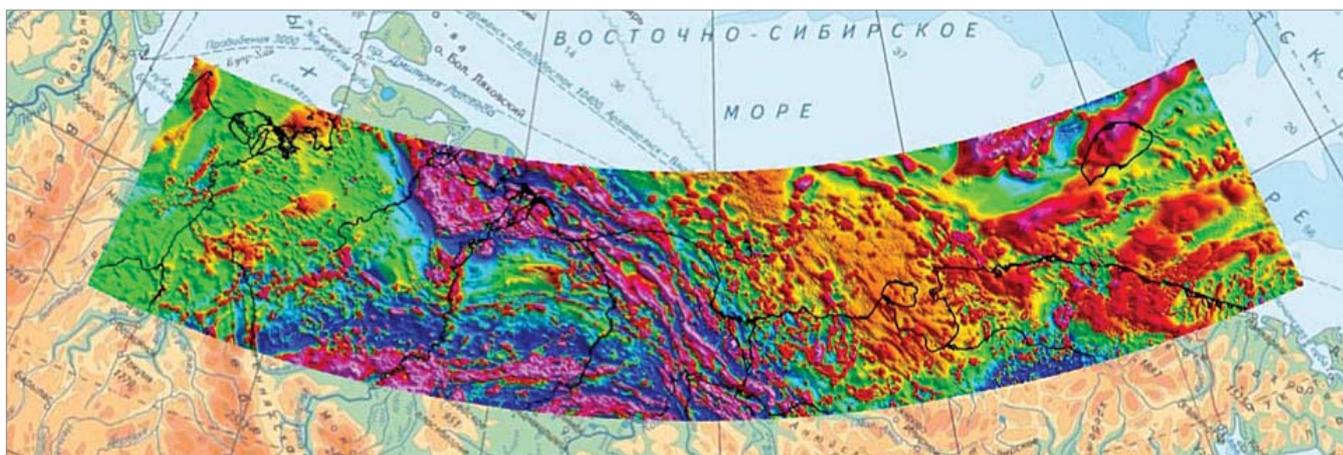


Рис. 4. Карта аномального магнитного поля по материалам аэромагнитной съемки

ная по стандартной методике по точкам пересечения рядовых и специальных секущих маршрутов (2500 пересечений), составляет  $\pm 1,6$  нТл.

Рис. 3 и 4 наглядно демонстрируют, что с помощью аэро съемки можно в сжатые сроки получать большие массивы ценнейшей геофизической информации, что особенно важно для труднодоступных районов Сибири, Дальнего Востока, а также шельфов северных и восточных морей. Эти огромные территории, на которых наземные исследования затруднены или вообще невозможны, рассматриваются в настоящее время в качестве главного источника расширения минерально-сырьевой базы страны.

#### Литература

1. Инструкция по гравиразведке. – М., 1980.
2. Могилевский В.Е., Контарович О.Р. Аэрогравиметрия – инновационная технология в геофизике // Разведка и охрана недр. – 2011. – №7.
3. Mogilevsky V., Kaplun D., Kontarovich O., Pavlov S. Airborne Gravity in Aerogeophysics Inc. // IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: static and mobile measurements, Saint Petersburg, 2010.
4. Sander S., Ferguson S., Sander L., Lavoie V. Measurement of noise in airborne gravity data using even and odd grids // First break. – 2002. – Vol. 20.8.