

Министерство природных ресурсов и экологии
Российской Федерации
Федеральное агентство по недропользованию (РОСНЕДРА)

Протокол № 4/2014 заседания геофизической секции **НРС Роснедра** от 26.06.2014 г.
ФГУНПП «Росгеолфонд» инв. № 516395

**Рекомендации по выполнению аэрогравиметрической съемки
для создания современной геофизической основы
Госгеолкарты 1000/3 и Госгеолкарты 200/2**

Исполнитель:
ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика»

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	2
Особенности аэрогравиметрии	2
Категории аэрогравиметрических съемок	2
Геофизическая основа Государственной геологической карты	3
Использованные источники и термины	4
2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ	5
3. АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ	6
Летательные аппараты	6
Бортовой аппаратурно-программный комплекс	6
Наземный комплекс	7
4. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ	8
5. МЕТОДИКА СЪЕМКИ	10
Предполетная подготовка	10
Аэрогравиметрическая съемка	10
Действия бортоператора по завершении вылета	12
Автокалибровка гравиметрического комплекса	12
Работа базовых навигационных станций	12
6. ОБРАБОТКА ДАННЫХ	13
Оперативная обработка	13
Окончательная обработка	14
<i>Обработка навигационных данных и данных инерциальной системы</i>	14
<i>Расчет профильных аномалий</i>	14
<i>Вычисление притяжения топографических масс и аномалий в топографической редукции (аномалий Буге)</i>	16
<i>Увязка маршрутов по опорной сети</i>	17
<i>Пересчет профильных аномалий в равномерную сеть</i>	17
<i>Редуцирование разновысотных значений поля силы тяжести</i>	17
<i>Увязка результатов съемки на отдельных участках</i>	18
7. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЪЕМКИ	19
8. ТЕХНИЧЕСКАЯ ОТЧЕТНОСТЬ	21
ЛИТЕРАТУРА	22

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Особенности аэрогравиметрии

1.1. Аэрогравиметрия – измерение ускорений силы тяжести на борту летательного аппарата – является одним из геофизических методов, применяемых при геологоразведочных работах для изучения геологического строения территории, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых.

1.2. Физическая основа аэрогравиметрии та же, что и у наземной гравиметрической разведки [Инструкция..., 1980]. Однако измерения силы тяжести на борту летательного аппарата имеют следующие особенности:

- Измерительный прибор расположен на движущемся основании, вследствие чего на его показания действуют не только ускорение силы тяжести, но также возмущающие ускорения носителя, причем величина помех может превосходить полезный сигнал в десятки тысяч раз.
- Уверенное разделение полезного сигнала и помехи возможно лишь при синхронном измерении и последующем учете ускорений летательного аппарата. Для этого используется спутниковая навигационная система GPS, работающая в фазовом дифференциальном режиме. Для снижения влияния горизонтальных ускорений аэрогравиметр устанавливается на гиросtabilизированную платформу.
- Обязательным элементом обработки результатов измерений является сглаживание данных на некотором временном интервале, обеспечивающее уменьшение до приемлемого уровня погрешности учета ускорений по спутниковым данным и случайных шумов гравиметра. Этим обусловлена основная особенность аэросъемки - её неспособность определять силу тяжести в точке. Максимально точный учет влияния траектории движения и эволюций летательного аппарата на показания гравиметра достигается с помощью фильтра Калмана¹.
- Аэросъемка всегда выполняется на некотором удалении от земной поверхности и возмущающих масс. Дистанционный характер измерений – это второй фактор после фильтрации, ограничивающий разрешение метода.

1.3. Перечисленные особенности не позволяют при проведении аэрогравиметрических съемок в полной мере пользоваться существующими регламентирующими документами [Инструкция..., 1979; Инструкция..., 1980].

1.4. Настоящие «Рекомендации...» касаются только аэрогравиметрических съемок, выполняемых для геологических исследований (геокартирование, геолого-геофизическое моделирование и т.д.).

Категории аэрогравиметрических съемок

1.5. Аэрогравиметрические съемки, являясь особым видом гравиметрических работ, тем не менее, призваны решать такие же геологические задачи, что и наземные гравиметрические съемки. В зависимости от технических требований, используемого носителя и характера помех аэрогравиметрические съемки могут различаться по детальности

¹ Фильтр Калмана - эффективный рекурсивный фильтр, оценивающий вектор состояния динамической системы, используя ряд неполных и зашумленных измерений [Кузовков, 1982]. И элементы навигационного комплекса, фиксирующие траекторию движения, и гравиметр обладают собственными погрешностями. Задача фильтра Калмана при совместной обработке данных всех измерительных систем (и навигационных, и гравиметра) – максимально возможное подавление влияния этих погрешностей.

и пространственному разрешению подобно тому, как наземные съемки различаются по масштабу. При выполнении работ для целей геологического картирования целесообразно выделять три категории аэрогравиметрической съемки (таблица 1).

Съемки категории I и категории II могут быть отнесены к среднемасштабным, а категории III – к мелкомасштабным.

Таблица 1. Категории аэрогравиметрических съемок

Категория съемки	Межмаршрутное расстояние (м)	Плотность независимых измерений на 1 кв. км			Допустимое удаление от базовой станции GPS (км)	Размер ячейки цифровой модели поля силы тяжести (м)	Погрешность съемки по внутренней схожимости (мГал)	Масштаб наземной съемки, решающей аналогичные задачи
		Длина фильтра 60 сек	Длина фильтра 80 сек	Длина фильтра 100 сек				
Скорость на маршруте 200 км/час								
		База эффективного осреднения						
		1500 м	2100 м	2700 м				
I	500	1.33	0.95	0.74	500	500	0.5	1:100 000
I	1000	0.67	0.48	0.37	500	1000	0.5	1:100 000
II	2000	0.33	0.24	0.18	700	2000	0.8	1:200 000
III	5000	-	-	0.074	1000	5000	1.2	1:500 000
Скорость на маршруте 300 км/час								
		База эффективного осреднения						
		2200 м	3100 м	4000 м				
I	500	0.9	0.64	-	500	1000	0.5	1:100 000
I	1000	0.45	0.32	0.25	500	1000	0.5	1:100 000
II	2000	-	0.16	0.125	700	2000	0.8	1:200 000
III	5000	-	-	0.05	1000	5000	1.2	1:500 000
III	10000	-	-	0.025	1500	5000	1.5	1:1 000 000
Скорость на маршруте 400 км/час								
		База эффективного осреднения						
		2900 м	4100 м	5300 м				
I	1000	0.34	0.25	-	500	1000	0.5	1:100 000
II	2000	0.19	0.12	-	700	2000	0.8	1:200 000
III	5000	-	0.049	0.038	1000	5000	1.2	1:500 000
III	10000	-	-	0.019	1500	5000	1.5	1:1 000 000

Геофизическая основа Государственной геологической карты

1.6. Опережающая геофизическая основа является обязательным элементом обеспечения комплектов листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 третьего поколения (Госгеолкарта-1000/3) и масштаба 1:200 000 второго поколения (Госгеолкарта-200/2) и создается до начала работ по их составлению, а в исключительных случаях в течение подготовительного периода [Требования..., 2012].

1.7. В соответствии с [Требования..., 2012], в качестве основного элемента в состав Геофизической основы, наряду с другими, включаются цифровые модели и карты аномалий поля силы тяжести, исходными данными для которых являются результаты гравиметрических съемок масштаба 1:200 000. Для подготовки опережающей геофизической основы Госгеолкарты-1000/3, а также Госгеолкарты-200/2 (в первую очередь, на территориях ограниченной доступности, где выполнение наземных съемок невозможно или затруднительно, а также на акваториях и в транзитных зонах), целесообразно использовать данные аэрогравиметрических съемок. При соответствующем обосновании такая возможность предусмотрена в [Требования..., 2012].

1.8. В настоящее время гравиметрическая изученность Российской Федерации даже в масштабе 1:200 000 не завершена. На обширных территориях суши и акваториях морей соответствующие работы не выполнены, значительная часть Сибири и Дальнего Востока не покрыта гравиметрическими съемками необходимой детальности [Карта качества..., 1995].

Использованные источники и термины

1.9. Настоящие «Рекомендации» обобщают мировой и отечественный опыт выполнения мелко- и среднемасштабных аэрогравиметрических съемок, начиная с 2000 г., и составлены с учетом положений документов, регламентирующих выполнение и использование результатов гравиметрических работ предприятиями систем МГ и МО СССР («Инструкция по гравиразведке», М., 1980; «Инструкция по морской гравиметрической съемке (ИГ-78)», М., 1979; «Требования к опережающей геофизической основе Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 третьего поколения (вторая редакция)». – М.–СПб.: Роснедра, 2012).

1.10. В аэрогравиметрии и соответственно в тексте «Рекомендаций...» используются отдельные термины и понятия, общепринятые при аэрогеофизических работах, но имеющие иной смысл или не применяющиеся при традиционных наземных гравиметрических съемках. Их употребление объясняется тем, что аэрогравиметрия составляет единый технологический комплекс с другими аэрогеофизическими методами. К числу таких терминов относятся:

- Рядовые маршруты – линии, вдоль которых выполняются рабочие аэрогравиметрические измерения.
- Опорные маршруты – маршруты, ортогональные рядовым, образующие в совокупности полевую опорную сеть, используемую для приведения результатов съемки на рядовых маршрутов к единому уровню.
- База эффективного осреднения – интервал, на котором величина весовой функции фильтра, выполняющего скользящее сглаживание профильных данных, превышает 0.5 максимального значения.
- Гравиметрический пункт – точка в центре базы эффективного осреднения, с которой соотносится значение силы тяжести после осреднения результатов измерения в пределах этой базы.
- Измеренное значение силы тяжести² – зарегистрированная гравиметром величина вертикальной составляющей силы тяжести, очищенная от влияния ускорений летательного аппарата и погрешностей элементов аппаратурного комплекса посредством Калмановской фильтрации.
- Независимые гравиметрические пункты – точки на профиле, отстоящие друг от друга на расстояние, превышающее базу эффективного осреднения.
- Аэродромный опорный пункт (АОП) – точка, относительно которой вычисляются значения силы тяжести по результатам аэросъемки.
- Аномалия в топографической редукции³ – аномалии силы тяжести в гравиметрическом пункте после учета притяжения топографических масс (пород, залегающих между поверхностью геоида и физической поверхностью Земли).

Составитель: ведущий геофизик ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика» Могилевский В.Е.

Редактор: главный геофизик ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика» Бабаянц П.С.

² Является аналогом наблюдаемых значений силы тяжести Δg_n при наземной съемке, но отличается от последних тем, что учитывает изменение высоты пунктов наблюдений.

³ Является полным аналогом «аномалии Буге с поправкой за рельеф» в наземной гравиметрии, но вычисляется другим способом. Понятие «простой аномалии Буге», получаемой после учета притяжения только плоскопараллельного слоя, в аэрогравиметрии отсутствует.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

2.1. Основным документом, определяющим работу по выполнению аэрогравиметрической съемки, является Техническое (Геологическое) задание (ТЗ) - неотъемлемая часть контракта на выполнение работ.

2.2. Выполнение аэрогравиметрической съемки начинается с составления проекта в соответствии с полученным ТЗ. В проекте обосновываются параметры съемки (направление маршрутов, межмаршрутное расстояние, высота полетов и т.д.), аэропорты базирования съемочного самолета, схема навигационного обеспечения работ, оцениваются необходимые затраты летного времени, общая продолжительность работ и т.д.

2.3. На основании проекта заключается договор с авиапредприятием на авиационное обслуживание работ.

2.4. Для выполнения полевых работ приказом по предприятию формируется полевой отряд, в состав которого включаются ведущий геофизик - ответственный исполнитель проекта (контракта), геофизик-бортоператор и дополнительный персонал (специалисты, обслуживающие базовые наземные станции, водитель и т.п.).

2.5. Ответственность за состав и качество работ, соответствие их требованиям настоящих рекомендаций и ТЗ несет ведущий геофизик - ответственный исполнитель проекта (контракта).

2.6. Полевые аэрогеофизические работы выполняются на основании Акта готовности к полевым работам, утвержденным руководителем предприятия и подписанным ответственным исполнителем проекта (контракта).

2.7. Выполнение требований настоящих рекомендаций и ТЗ в части состава и работоспособности бортового комплекса, осуществления предписанных контрольно-настроечных операций, принятия решений о вылете на работу, прекращении съемочного полета возлагается на геофизика-бортоператора.

АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ

Летательные аппараты

3.1. Для аэрогравиметрических съемок в РФ в основном используются самолеты Ан-26 или Ан-30. Они доступны, имеют сравнительно небольшую скорость полета и аэродинамику, позволяющую выполнять устойчивый полет при слабой и умеренной турбулентности воздуха. Для увеличения продолжительности вылета желательно оснащение самолетов дополнительными топливными баками.

Бортовой аппаратурно-программный комплекс

3.2. В состав бортового аппаратурно-программного комплекса для аэрогравиметрических съемок включаются:

- аэрогравиметр;
- спутниковая навигационная система;
- бортовой компьютер с базовым программным комплексом;
- пилотажно-навигационный комплекс при работах с генеральным обтеканием рельефа.

3.3. Аэрогравиметр. Аэрогравиметр выполняет непрерывные измерения суммы проекций ускорений летательного аппарата и силы тяжести вдоль своей оси чувствительности. Для съемок используются специальные аэрогравиметры, обладающие очень большим динамическим диапазоном измерения, малой чувствительностью к вибрации, выдерживающие значительные перегрузки и колебания температуры окружающей среды. Этим требованиям отвечает, например, отечественный аппаратурный комплекс GT-2A (производство ЗАО «Гравиметрические технологии» [Авиационный гравиметр..., 2009]).

3.4. Навигационная система. Геодезическое обеспечение аэрогравиметрических работ выполняют спутниковые навигационные системы GPS/ГЛОНАСС, работающие в дифференциальном режиме. В реальном времени навигационные данные используются для проводки летательного аппарата, а в режиме постобработки – для уточнения координат точек наблюдений, вычисления возмущающих ускорений и поправки Этвеша. Дифференциальный режим коррекции обеспечивают базовые навигационные станции, развертываемые непосредственно в контуре, а также поблизости от площади работ.

Для приема спутниковых сигналов на самолетах и базовых станциях устанавливаются двухчастотные, с фазовым режимом измерений, специальные приемники и антенны. Частота регистрации данных 10 Гц.

Набор доступных опций приемников должен включать:

- регистрируемые кодовые последовательности: CA, P1, P2 на частотах L1, L2;
- режим совместного слежения за фазами сигналов и задержкой кодов – Co-ord tracking;
- формат выдачи данных – NMEA 183;
- режим подавления многолучевой помехи – Multipath Reduction.

Организация навигационного обеспечения съемки не зависит от ее категории и всегда ориентирована на получения максимально возможной точности навигационных решений. Погрешность определения координат летательного аппарата (центра приемной антенны) в реальном времени должна быть не хуже $2\div 4$ м; а после дифференциальной коррекции в режиме постобработки – ± 20 см.

3.5. Бортовой компьютер и базовый бортовой программный комплекс. Используется IBM - совместимый компьютер (notebook) с установленной на нем бортовой про-

граммой, обеспечивающей активное вождение летательного аппарата, визуализацию регистрируемых во время съемочного полета данных и их запись на жесткий диск.

3.6. Пилотажно-навигационный комплекс. При съемке местности с большими перепадами высот рельефа летательный аппарат оборудуется дополнительно автономным пилотажно-навигационным средством «ПНС-А» (ОАО «Текнол» Россия), позволяющим пилоту в режиме активного вождения выдерживать заданную высоту летательного аппарата над земной поверхностью. Полет выполняется по заранее рассчитанным траекториям, которые для каждого маршрута представляются пилоту на специальном мониторе в виде трехмерного графического образа.

Наземный комплекс

3.7. В состав наземного комплекса для аэрогравиметрических съемок включаются: полевой вычислительный центр, базовые навигационные станции и (при необходимости) наземный гравиметр.

3.8. Полевой вычислительный центр предназначен для оперативной обработки полевых данных, контроля их качества, проверки соответствия параметров съемки требованиям Технического (Геологического) задания и архивации материалов.

Центр включает в себя 2 IBM-совместимых компьютера с параметрами не хуже: тактовая частота - 2ГГц; суммарная емкость жестких дисков - 400 Гб; оперативная память – 2 Гб. Для ведения архива необходимо иметь запас внешних носителей (DVD-дисков, внешних USB-накопителей), в 2 раза перекрывающий предполагаемый объем информации.

Центр размещается вблизи от аэропорта базирования летательного аппарата и должен быть оборудован средствами связи с диспетчером аэропорта и всеми базовыми навигационными станциями.

3.9. Базовые навигационные станции. Требуемая точность навигационного обеспечения аэрогравиметрических съемок достигается исключительно при использовании дифференциального режима коррекции спутниковых навигационных данных с использованием наземных базовых станций GPS.

Каждая базовая станция укомплектовывается:

- спутниковыми приемником и антенной, аналогичными бортовым;
- компьютером с устройством записи информации на внешний носитель (DVD-диск, жесткий диск) и необходимым программным обеспечением;
- источником автономного питания;
- средствами связи с полевым вычислительным центром.

4. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

4.1. Подготовительные работы включают в себя комплекс мероприятий, выполняемых перед отправкой аппаратуры на полевые работы и на аэродроме базирования до начала съемочных полетов, в т.ч. подготовку аппаратуры, ее монтаж на борту летательного аппарата, ввод гравиметра в рабочий режим, расстановку базовых станций и контрольно-настроечный вылет для эталонирования аэрогравиметра и проверки готовности комплекса к съемке.

4.2. Подготовка аппаратуры к полевым работам заключается в ее осмотре, проверке комплектности всего аппаратурного комплекса и его работоспособности. Решение о готовности аппаратуры к работе принимает ответственный исполнитель работ.

4.3. Монтаж аппаратуры на борту самолета осуществляется в соответствии с утвержденной в установленном порядке документацией и рекомендациями изготовителя аппаратуры [Авиационный гравиметр..., 2009].

4.4. Гравиметрический комплекс на самолетах размещается в салоне вблизи центра масс. Высота гравиметрического датчика в салоне стоящего самолета над земной поверхностью должна быть измерена с погрешностью не более 5 см.

4.5. Бортовая спутниковая антенна на самолетах устанавливается снаружи фюзеляжа на специальном отражателе, выполняющим функцию «искусственной земли». Для минимизации погрешности при расчете координат чувствительного элемента гравиметра желательно располагать антенну на удалении не более чем 2 м от гравиметра в плане. Смещение антенны относительно чувствительного элемента гравиметра по продольной, поперечной и вертикальной осям измеряется с погрешностью не более 2 см.

4.6. Монтажные работы выполняются авиационными техниками под руководством геофизика - бортоператора.

4.7. За съемочным самолетом должно быть закреплено постоянное место стоянки на аэродроме базирования на весь период базировки. Точка стоянки, над которой располагается гравиметр, маркируется краской. Она выполняет функцию временного аэродромного опорного пункта (АОП). Положение самолета на стоянке должно обеспечивать смещение гравиметра от АОП в плане не более чем на 2 м.

4.8. Для обеспечения температурного режима гравиметров во время нахождения летательного аппарата на аэродроме стоянка должна быть обеспечена электропитанием.

4.9. Действия геофизика – бортоператора при вводе гравиметра в рабочий режим определяются инструкцией изготовителя аппаратуры [Авиационный гравиметр..., 2009].

4.10. Для поддержания рабочего температурного режима термостат гравиметра не выключается в течение всего полевого периода. Если температура окружающей среды выходит из допустимого диапазона, борт-оператор должен предпринять дополнительные меры по обогреву/охлаждению аэрогравиметра на стоянке в аэропорту базирования.

4.11. Сеть наземных навигационных станций развертывается перед началом съемки для обеспечения дифференциального режима работы спутниковой навигационной системы. Число и местоположение станций определяется конфигурацией и размерами площади работ, а так же тем, что каждые 100 км базовой линии увеличивают погрешность съемки на $0.04\div 0.05$ мГал (установлено опытным путем на основе большого числа наблюдений). Допустимой является удаленность точек измерения силы тяжести от ближайшей станции до 500 км при съемках I категории, 700 км при съемках II категории и 1000-1500 км при съемках III категории на шельфе. Число одновременно работающих базовых станций не может быть меньше двух.

4.12. При расстановке станций необходимо обеспечить максимально возможное качество приема спутниковых данных. Антенна не должна находиться в области радиотени от близлежащих зданий, деревьев, неровностей рельефа местности и в зоне многолучевого приема (например, на металлической крыше). Изменение положения антенны базовой станции в течение всего полевого периода не допускается.

4.13. Для оценки готовности базовых станций к летным работам на каждой из них производится шестичасовая пробная запись спутниковой информации с определением координат приемных антенн станций, и вычислением отношения сигнал/шум полученных данных. В качестве координат одной из станций принимаются их средние значения за все время пробной записи в стандартном режиме работы спутниковой системы. Координаты остальных станций определяются относительно первой в дифференциальном режиме работы системы. Отношения сигнал/шум для кода CA у спутников, имеющих угол возвышения над горизонтом более 45 градусов, должны лежать в диапазоне 45÷52 дБ.

4.14. Эталонирование аэрогравиметра выполняется методом наклона в заводских условиях (на заводе – изготовителе)⁴. Началу съемки должен предшествовать контрольно-настроечный вылет для дополнительного контроля цены деления аэрогравиметра в диапазоне значений силы тяжести, характерном для площади работ, и окончательной оценки готовности всей аппаратуры к летным работам. Продолжение работ возможно лишь после обработки и оценки качества полученных материалов.

4.15. Контроль цены деления аэрогравиметра выполняется путем залета «этажерки» - съемки вдоль одного и того же маршрута длиной 80÷100 км на высотах 1000, 2000, 3000, 4000 и 5000 м. Маршрут выбирается на этапе проектирования по мелкомасштабным картам, на площади со спокойным, близким к нулю аномальным полем силы тяжести (для уменьшения влияния аномального вертикального градиента). В качестве эталонных значений приращения силы тяжести используются изменения величины нормального поля Земли (γ_0) для эллипсоида Геодезической референц-системы 1980 г (наиболее точная модель) с высотой. Значения нормального поля вычисляются с использованием уточненной формулы поправки за свободный воздух (δg_h) и с учетом притяжения атмосферного воздуха (δg_a) [William J. Hinze et al., 2005].

$$\gamma_0 = 978032.68(1 + 0.0053024 \sin^2\varphi - 0.0000058 \sin^2 2\varphi)$$

$$\delta g_h = -(0.3087691 - 0.0004398 \sin^2\varphi)h + 7.2125 \cdot 10^{-8}h^2$$

$$\delta g_a = 0.874 - 9.9 \cdot 10^{-5}h + 3.56 \cdot 10^{-9}h^2$$

где h - высота съемки над эллипсоидом WGS84 в метрах;
 φ – географическая широта.

В измеренные значения силы тяжести, полученные в ходе обработки материалов «этажерки» программой SR2GRAV с масштабным коэффициентом, равным единице, вводится поправка за притяжение топографических масс с плотностью 2.3 г/см³ (средняя плотность осадочных пород) в радиусе 200 км с учетом сферичности Земли.

4.16. Если результаты съемки в соответствии с ТЗ представляются в условном уровне, привязка данных к Государственной гравиметрической сети не производится. В противном случае выполняется передача значения силы тяжести от ближайшего опорного пункта I-го (ОГП- I) или II-го (ОГП- II) классов в точку размещения аэрогравиметра на стоянке самолета (АОП) наземным гравиметром. В передаваемое значение вводится поправка, определяемая по формуле $\delta g = 0.3086 \Delta h$, где Δh - высота чувствительного элемента гравиметра над АОП.

⁴ В перспективе, при создании сети закрепленных и сертифицированных АОП, целесообразно будет дополнительно выполнять эталонирование гравиметра способом полигонов.

5. МЕТОДИКА СЪЕМКИ

Предполетная подготовка

5.1. Предполетная подготовка перед каждым рабочим вылетом включает:

- Составление и обсуждение с экипажем плана полета на съемку;
- Визуальный осмотр аппаратурного комплекса;
- Проверку работы бортового компьютера;
- Проверку готовности гравиметра к работе в соответствии с инструкцией изготовителя аппаратуры [Авиационный гравиметр..., 2009];
- Получение подтверждения нормальной работы базовых станций;
- Запись показаний гравиметрических датчиков в течение 40÷45 минут на стоянке самолета при выключенных двигателях для учета смещения нуля-пункта гравиметров. В это время не допускается движение внутри салона.

Аэрогравиметрическая съемка

5.2. Аэрогравиметрические измерения выполняются при полете самолета вдоль прямолинейных маршрутов, образующих над исследуемой территорией сеть рядовых и ортогональных к ним опорных профилей. Направление маршрутов определяется требованиями Технического задания. При полистной съемке больших площадей допускаются полеты по параллелям и меридианам.

5.3. Расстояние между рядовыми маршрутами выбирается в соответствии с установленной в ТЗ категорией съемки и составляет 1 см в масштабе отчетной карты, т.е. при съемках категории I – 1 км, категории II – 2 км, категории III – 5 или 10 км. При выполнении съемки категории I в неблагоприятных условиях (полеты над земной поверхностью с расчлененным рельефом при сложном геологическом строении территории) расстояние между рядовыми маршрутами целесообразно уменьшить до 500 м, а между опорными до 5 км, обеспечивая необходимую при последующей обработке избыточность данных.

Расстояние между опорными маршрутами устанавливается в 10 раз больше расстояния между рядовыми маршрутами. При съемке III категории, если ожидаемое число пересечений рядовых маршрутов с опорными меньше 10 шт., число опорных маршрутов может быть увеличено.

При съемке по параллелям и меридианам в высоких широтах межпрофильное расстояние меридиональных маршрутов определяется для средней параллели площади работ.

5.4. Начала и концы рядовых съемочных маршрутов должны выходить за границы площади работ не менее чем на половину базы осреднения профилейных данных. Крайние рядовые маршруты прокладываются вне контура съемки по одному с каждой стороны. Концы опорных маршрутов выходят на половину базы осреднения за крайние рядовые.

5.5. При аэрогравиметрических измерениях высота и скорость съемочных полетов должны выбираться минимально возможными для используемого типа летательного аппарата, поскольку от них напрямую зависит пространственное разрешение съемки.

5.6. В зависимости от характера рельефа земной поверхности на площади работ, съемка выполняется либо на постоянной барометрической высоте, либо с генеральным обгибанием рельефа.

5.7. Предпочтительной является съемка на постоянной барометрической высоте, так как при этом минимизируются возмущающие ускорения, воздействующие на гравиметр. Такая система залетов возможна при выполнении съемки на акваториях и площа-

дах со слаборасчлененным рельефом (относительные превышения в контуре площади менее 400÷600 м). Оптимальной является высота 200÷400 м над земной поверхностью (точное значение выбирается с учетом требований безопасности полета).

5.8. На площадях со сложно расчлененным рельефом, где полеты на постоянной высоте над доминантными вершинами приведут к недопустимо большому (более 600÷800 метров) удалению точек измерений от земной поверхности на значительной части площади работ, съемка выполняется с генеральным огибанием рельефа. В этом случае заранее (на этапе проектирования) подготавливается поверхность, по которой будут выполняться полеты. При построении такой поверхности учитываются: требования безопасности полетов; необходимость выполнения съемки на минимально возможной высоте; обеспечение приемлемого уровня (RMS не более 35÷40 Гал) вертикальных ускорений, воздействующих на гравиметр при полете по этой поверхности, т.е. ее максимально возможной гладкости. Подготовленный план маршрутов в обязательном порядке согласуется с летчиками, которые будут пилотировать летательный аппарат.

5.9. Отклонения в плане съемочных маршрутов от заданной линии полета (ЗЛП) не должны превышать 200 м. Отклонение средней высоты на маршруте от проектной не должно превышать ± 20 м.

5.10. Съемка выполняется при полете с минимальной воздушной скоростью, при которой сохраняется устойчивое движение летательных аппаратов. Например, для самолетов Ан-26 и Ан-30, наиболее широко используемых для аэрогравиметрических съемок в России, это скорость 290÷300 км/час.

5.11. Если съемка выполняется отдельными участками с нескольких аэродромов, то для внутренней увязки данных выполняется передача значений силы тяжести с ближайших ОГП-I или ОГП-II во все точки стоянки самолетов в соответствии с п. 4.16. Учитывая, что из-за утраты множества ОГП сделать это зачастую невозможно, должна быть выполнена привязка данных к единому АОП, а сеть маршрутов спроектирована так, чтобы имелось достаточно представительное (несколько сотен) число пересечений рядовых и опорных маршрутов, выполненных из разных аэропортов. Несколько маршрутов с каждого аэродрома могут продлеваться на соседний участок на 30÷50 км и используются для взаимной увязки данных, выполняя роль связующих маршрутов.

5.12. При съемке на постоянной барометрической высоте управление летательным аппаратом осуществляется штатным автопилотом. После выхода на маршрут никакие изменения высоты, скорости и направления движения не допускаются. Возможна лишь плавная корректировка курса для компенсации ухода самолета с маршрута под влиянием ветра.

5.13. При полете с генеральным обтеканием рельефа пилот ведет самолет по показаниям ПНС, которая по спутниковым данным непрерывно отслеживает высоту летательного аппарата относительно заданной поверхности съемки.

5.14. Развороты для выхода на новый маршрут должны выполняться плавно, с угловой скоростью не более 30 градусов в минуту и креном не более 15 градусов.

5.15. Количество одновременно наблюдаемых спутников в определенные интервалы времени может быть ниже минимально допустимого значения (5÷6 шт.). Такие интервалы заранее устанавливаются с помощью специальных сервисных программ и учитываются при назначении времени съемки с целью исключения возможности выполнения наблюдений в эти периоды.

5.16. Погодные условия оказывают существенное влияние на качество аэрогравиметрических измерений. Для минимизации возмущающих ускорений необходимо по возможности избегать выполнения съемки при сильном ветре и в зонах атмосферных

фронтов, а также в жаркие солнечные дни из-за интенсивной турбулентности воздуха в приземном слое. Допустимый уровень вертикальных ускорений на маршруте (RMS) – 0.4 м/сек².

5.17. Геофизик - бортоператор в ходе съемки осуществляет контроль работы аппаратного комплекса, соответствия полета составленному плану и выдерживания параметров съемки (высота, скорость и т.д.). При обнаружении сбоев в работе аппаратуры, а также при ухудшении погодных условий оператор принимает решение о прекращении съемки и возврате в аэропорт базирования. Геофизик-бортоператор ведет дневник (бортовой журнал), в котором фиксирует все особенности съемочного вылета (время взлета-посадки, номера и количество пройденных маршрутов, метеоданные, особенности работы аппаратного комплекса и т.д.).

5.18. После посадки самолета и заруливания на стоянку бортоператор проверяет положение гравиметра относительно АОП. Затем, после выключения двигателей, выполняется запись показаний гравиметрических датчиков в течение 40÷45 минут на аэродромном опорном пункте для учета смещения нуля-пункта гравиметра. При необходимости (сильный ветер) продолжительность записи увеличивается до 60 минут. В это время не допускается движение внутри салона.

Действия бортоператора после завершения вылета

5.19. По завершении измерений геофизик – бортоператор копирует все съемочные материалы данного вылета на промежуточный носитель информации для передачи их на полевой вычислительный центр. Удаление информации с бортового компьютера допускается только по разрешению ведущего геофизика - ответственного исполнителя работ.

5.20. Покидая летательный аппарат, геофизик - бортоператор должен убедиться в исправной работе системы термостатирования гравиметра.

Автокалибровка гравиметрического комплекса

5.21. Автокалибровка гравиметрического комплекса выполняется по инструкции производителя аппаратуры [Авиационный гравиметр..., 2009] каждые 1÷2 месяца. Однако при обнаружении в ходе ежедневного контроля систематического ухода параметров гироскопов от номинальных значений ($kdr > 5$ или $dqn > 0.1$) выполняется внеплановая автокалибровка гравиметрического комплекса.

Работа базовых навигационных станций

5.22. Базовые навигационные станции производят запись данных спутниковой навигации непрерывно во все время выполнения съемки.

5.23. Оператор каждой станции ежедневно проверяет качество данных по числу регистрируемых спутников и отношению сигнал/шум кода СА. При сбое в работе и невозможности осуществлять прием и регистрацию данных надлежащего качества, оператор базовой станции должен немедленно сообщить об этом на аэродром базирования ответственному исполнителю работ.

5.24. Регулярно информация с базовых станций должна передаваться для обработки на полевой вычислительный центр. Для обеспечения сохранности данных они записываются в виде двух копий на внешних электронных носителях (DVD-дисках, жестких дисках и т.п.).

6. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

6.1. В процессе съемки на борту самолета формируются следующие основные файлы:

- Gddhhmm.AIR (ddhhmm - день, час и минута открытия файла) – содержит данные чувствительного элемента гравиметра; горизонтальных акселерометров; параметр, привязывающий эти данные к гринвичскому времени и ряд других.
- Sddhhmm.AIR – данные гироинерциальной платформы, используемые для оценки погрешности построения вертикали места: скорости относительно Земли по осям X и Y; курс; показания датчиков углов X и Y карданова подвеса; параметр привязки к гринвичскому времени и др.
- ddmnnn.JPS (ddmnnn – день, месяц, порядковый номер файла) – данные спутниковой навигационной системы.

JPS-файлы кроме того формируются и записываются на каждой базовой станции.

Обработка перечисленных файлов включает в себя два этапа: оперативный (полевой) и окончательный (камеральный).

Оперативная обработка

6.2. Оперативная обработка производится в аэропорту базирования самолета после каждого рабочего вылета и предназначена для оценки качества текущих материалов, своевременного выявления возможных неисправностей аппаратного комплекса, отклонения реальных параметров съемки от проектных. Ее проводит ведущий геофизик – ответственный исполнитель работ. По результатам контроля качества принимается решение о приеме данных в дальнейшую обработку или перезалете маршрутов.

6.3. Данные базовых навигационных станций обрабатываются по мере их поступления.

6.4. Оперативная обработка выполняется в режиме QC (Контроль качества) пакетом программ SR2MSU (см. ниже).

6.5. Обработка включает в себя следующие основные процедуры:

- Контроль целостности файлов, формируемых блоками сбора данных гравиметрического комплекса (G-файлы и S-файлы);
- Контроль целостности файлов со спутниковой информацией (JPS-файлы);
- Контроль синхронизации времени GPS и шкалы времени в G- и S- файлах;
- Определение координат, скорости и ускорения самолета при помощи фазовых измерений GPS;
- Оценка позиционных, скоростных, угловых ошибок инерциальной навигационной системы, угловых ошибок построения приборной вертикали;
- Контроль возможных сбоев в показаниях гравиметров;
- Формирование файлов со статистическими характеристиками опорных измерений до и после полета и контроль смещения нуль-пунктов гравиметров;
- Контроль невязки определения аномалий;
- Контроль соответствия параметров съемки требованиям Технического задания и Проекта работ.

6.6. Основанием для отбраковки материала и перезалета маршрута или его части являются:

- Количество спутников используемых в решении на маршруте меньше 5;
- Отсутствуют данные базовых станций или количество спутников (общих с принимаемыми на самолете) меньше 5;
- Угловые ошибки построения вертикали в рейсе более 0.1° ;
- Стандартное отклонение вертикальных ускорений на маршруте более 0.4 м/с^2 ;

- Скорость смещения нуля-пункта более 0.3 мГал/час;
- Стандарт невязки при расчете аномалий силы тяжести вдоль линии маршрута (параметр Residual [Программное обеспечение..., 2009]) на маршруте при фильтрации 100 сек больше 2500.

Окончательная обработка

6.7. Обработка аэрогравиметрических данных выполняется в камеральный период с использованием специализированного программного продукта SR2MSU («Лаборатория управления и навигации» Механико-математический ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова, [Программное обеспечение..., 2009]), состоящего из нескольких модулей, важнейшими из которых являются SR2NAV и SR2GRAV. Программа SR2NAV предназначена для обработки навигационных данных и данных инерциальной системы; программа SR2GRAV выполняет профильную обработку данных, вплоть до вычисления аномалий в свободном воздухе. Программный продукт SR2MSU поставляется вместе с комплексом GT-2A и является его неотъемлемой частью.

6.8. Для вычисления аномалий в топографической редукции по маршрутам, редуцирования данных на заданную поверхность (включая дневной рельеф), построения цифровых моделей поля силы тяжести могут использоваться другие специализированные программные средства. В частности, для вычисления топографической поправки и аномалий в топографической редукции (аномалий Буге) по профилям используется программа RelMASS, разработанная в ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика»; для редуцирования данных с одного уровня на другой, включая дневную поверхность, на основе истокообразных аппроксимаций – программа REIST из пакета СИГМА-3D; для построения цифровых моделей поля силы тяжести – процедура AirGRID. Визуализация и анализ данных, окончательная увязка съемочных сетей, расчет необходимых трансформант, а также другие необходимые процедуры выполняются с помощью системы OASIS_Montaj (Geosoft Inc, Канада).

Обработка навигационных данных и данных инерциальной системы

6.9. Данный этап обработки осуществляется с помощью модуля SR2NAV из программы SR2MSU [Программное обеспечение..., 2009]. Его целью является получение информации о вертикальных и горизонтальных возмущающих ускорениях, действующих на измерительную систему при съемке. Анализируются S.AIR и JPS файлы (записанные на борту и на базовых станциях). Результатом работы являются текстовые VEL - файлы со скоростными решениями; INS-файлы, содержащие углы ухода оси инерциальной системы от вертикали, и QC-файлы с оценочными параметрами (количество спутников, PDOP, оценки погрешностей скоростного и позиционного решений, удаления до базовой станции и пр.). По этим данным оценивается качество скоростных решений и качество работы инерциальной системы. Как правило, требуется выполнить несколько итераций обработки для получения наилучшего навигационного решения для каждого вылета.

6.10. Основными показателями высокого качества навигационных данных являются погрешности позиционных и скоростных решений, которые должны составлять соответственно первые сантиметры и первые сантиметры в секунду. Качество скоростных решений можно менять вовлечением в обработку или исключением из нее низколетящих спутников (т.е. маскирование по углу возвышения) или полным удалением какого-либо спутника из обработки.

Расчет профильных аномалий

6.11. Основная часть обработки – расчет аномалий силы тяжести вдоль съемочного профиля – выполняется с помощью модуля SR2GRAV из программы SR2MSU [Программное обеспечение..., 2009], используя данные файлов G.AIR, S.AIR (после их кон-

вертации в текстовый формат), VEL и INS. На этом этапе обработки учитываются масштабный коэффициент гравиметра, вычисляются все необходимые поправки: за вертикальные ускорения в точке размещения чувствительного элемента, горизонтальные ускорения; учитывается нормальное поле по формуле Гельмерта 1909 г. минус 14 мГал, поправка за свободный воздух, поправка Этвеша, сползание нуля-пункта гравиметра.

6.12. Результаты измерений при съемке могут быть записаны в виде:

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

где:

M_0 – масштабный коэффициент;

F_m – показания гравиметра;

G – истинное значение силы тяжести в точке измерения;

v – вертикальная скорость гравиметра, измеренная спутниковой навигационной системой;

δG_g – поправка Этвеша;

δG_d – смещение нуля-пункта (тренд) гравиметра;

δG_g – случайный шум в показаниях гравиметра;

δv – случайная ошибка в определении вертикальной скорости;

δF_h – ошибка гравиметра, вызванная отклонением оси чувствительности от вертикали.

Тренд гравиметра вычисляется по формуле

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

Здесь:

t – текущее время;

t_1 – время начальной опоры (среднее время измерения на АОП перед вылетом);

t_2 – время конечной опоры (среднее время измерения на АОП по завершении вылета);

F_{m1} – среднее показание гравиметра на начальной опоре;

F_{m2} – среднее показание гравиметра на конечной опоре;

Измеренное значение силы тяжести G_m равняется:

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

Или:

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

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 коэффициентов k_x , k_y и определение значений силы тяжести 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 (в частности M_0).

6.13. Поскольку решение, полученное в ходе регрессионного подбора параметров, осложнено погрешностью определения ускорений летательного аппарата по спутниковым данным и случайным шумом гравиметра, дополнительно выполняется низкочастотная фильтрация данных с помощью адаптивного фильтра Калмана на выбранном интервале (см. примечание 1 к п. 1.2). Интервал фильтрации можно изменять в зависимости от условий съемки. В настоящее время оптимальными считаются интервалы 80 секунд (съемка в хороших погодных условиях, RMS вертикальных ускорений на маршруте менее 10 Гал) и 100 секунд (в обычных условиях). С увеличением точности рабо-

ты спутниковых навигационных систем (в последние годы прослеживается такая тенденция) интервал осреднения можно будет уменьшить до 60 секунд.

6.14. Программа SR2GRAV работает в интерактивном режиме, позволяя оператору управлять процессом, меняя вовлеченные в процедуру обработки параметры и их значения. Критерием качества решения и правильности выбора интервала фильтрации является величина невязки (Residuals [Программное обеспечение..., 2009]), которая не должна превышать $1500 \div 2000$.

6.15. Значения силы тяжести в программе SR2GRAV вычисляются с использованием геодезических высот точек съемки и географических координат, получаемых по спутниковым данным относительно эллипсоида WGS-84. Для последующего использования они пересчитываются в аномалии с координатами относительно эллипсоида Красовского и с поверхностью геоида в качестве отсчетной поверхности. Пересчет координат выполняет специальная процедура, реализованная в пакете программ OASIS_Montaj. В качестве поверхности геоида используется модель геоида Earth Gravity Model - EGM-96.

Вычисление притяжения топографических масс и аномалий в топографической редукции (аномалий Буге)

6.16. Аномалии силы тяжести в топографической редукции (аномалии Буге), отражая распределение плотностных неоднородностей Земли ниже ее физической поверхности, являются основным отчетным материалом аэрогравиметрических работ.

6.17. Вычислении поправок за притяжение топографических масс выполняется программой ReIMASS, в которой реализуется алгоритм, обоснованный в [Страхов, Лапина, 1983].

6.18. 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 контуре площади работ для построения цифровой модели рельефа используются топографические карты масштаба не мельче 1:200 000. За контуром площади съемки допускается использование мелкомасштабных карт, вплоть до масштаба 1:1 000 000. При съемке южнее 60° с. ш. допускается использование модели физической поверхности SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с разрешением 90 м.

При работах на акваториях или вблизи от них для составления модели дна используются карты ИВКАО (International Bathymetric Chart of Arctic Ocean) с разрешением 500 м или ГЕВКО (General Bathymetric Chart of Ocean) с разрешением 1000 м.

Учет рельефа местности осуществляется в радиусе 200 км [Инструкция..., 1980].

6.19. Для оптимизации процедуры вычислений расчеты выполняются в два этапа. На первом этапе вычисляется притяжение топографических масс на двух поверхностях, конформных поверхности съемки, но расположенных на 10 метров выше и ниже ее. Величина поправки в каждой точке измерения поля вычисляется затем линейным интерполированием значений величины притяжения для точек каждой из двух поверхностей, горизонтальные координаты которых совпадают с координатами точки вычисления поправки, с учетом ее реальной высоты. Такая схема учета влияния топографии позволяет проводить первый, наиболее трудоемкий этап этой процедуры (расчет величины притяжения топографических масс) независимо от времени выполнения летных работ, что облегчает и ускоряет окончательную обработку получаемого материала.

6.20. Значения поправки за притяжение топографических масс, перед вычислением аномалий в топографической редукции (аномалий Буге), сглаживаются фильтром с пространственным разрешением, аналогичным использованному при обработке данных программой SR2GRAV.

Увязка результатов съемки на отдельных участках

6.21. Результаты съемок, выполненные из разных аэропортов базирования, необходимо привести к единому уровню. Эта процедура выполняется вводом единой поправки (константы) во все значения поля внутри каждого блока, то есть трендом нулевого порядка. Для определения величины поправок используются результаты измерений на АОП, а также данные повторных измерений, выполненных из разных аэропортов (зоны перекрытия связующих маршрутов, невязки в точках пересечения рядовых и опорных маршрутов и т.д.).

Увязка маршрутов по полевой опорной сети

6.22. Результаты съемки на рядовых маршрутах подлежат приведению к единому уровню (увязке). Эта процедура выполняется с помощью полевой опорной сети после учета притяжения топографических масс. Увязка выполняется по методике ВИРГ, предложенной для аэромагнитной съемки [Инструкция..., 1981].

Процедура выполняется в два этапа.

На первом этапе производится передача отсчетного уровня опорных маршрутов от одного к другому с помощью многих 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 т.н. статистическое уравнивание самой опорной сети. Поскольку обычно можно использовать многие рядовые маршруты (десятки, а иногда и сотни) увязка осуществляется весьма надежно. Если в какой-либо точке пересечения разность аномалий имеет недопустимо большое значение, она может быть исключена из процедуры уравнивания. Тем самым грубые ошибки в отдельных точках не разбрасываются по сети, а удаляются и не влияют на результат. Число отбракованных точек не должно превышать 2%.

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 аэрогравиметрическим данным.

Статистическая увязка, ограничивающаяся введением в маршруты поправок в виде постоянной величины, не приводит к каким-либо перекосам в результатах съемки. Ее алгоритм реализован, например, в программе OASIS_Montaj.

Пересчет профильных аномалий в равномерную сеть

6.23. Вычисленные аномалии силы тяжести вдоль линии маршрутов остаются осложненными остаточным влиянием ускорений летательного аппарата, величина которых (по среднеквадратическому отклонению) составляет $0.2\div 3$ мГал в зависимости от условий съемки. Для пересчета профильных аномалий в равномерную сеть (матрицу) может быть рекомендована специальная процедура построения сетей AirGRID [Mogilevsky и др., 2010], в ходе которой из результатов съемки исключаются остаточные влияния возмущающих ускорений летательного аппарата, не полностью учтенных при профильной обработке.

Алгоритм процедуры 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.

При построении карт по материалам съемок III категории с небольшим уровнем возмущающих ускорений, процедура AirGRID может не использоваться.

Редуцирование разновысотных значений поля силы тяжести

6.24. При выполнении съемки на постоянной барометрической высоте результаты съемки представляют собой значения гравитационного поля на уровне полета. Именно эти данные представляются в качестве отчетного материала.

6.25. При выполнении съемки с генеральным огибанием рельефа возникает необходимость редуцирования данных к некоторой поверхности, в качестве которой, как правило, выбирается поверхность Земли.⁵

6.26. Редуцирование на земную поверхность выполняется только для аномалий в топографической редукции (аномалий Буге). Для аномалий в свободном воздухе такая процедура не имеет смысла из-за большой погрешности, обусловленной нелинейным изменением с высотой притяжения топографических масс.

6.27. Редуцирование поля силы тяжести на заданный уровень производится с помощью программы REIST, на основе аппроксимации результатов съемки полем эквивалентного горизонтального слоя [Бабаянц и др., 2003].

⁵ Наиболее корректным является приведение измерений к горизонтальной плоскости, проходящей выше доминантных вершин площади работ. Однако в этом случае расстояние до дневной поверхности в местах понижения рельефа может достигать сотен и тысяч метров, что неизбежно приведет к искусственному ухудшению детальности и пространственного разрешения результатов съемки.

7. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СЪЕМКИ

7.1. Оценка качества аэрогравиметрической съемки определяется тремя характеристиками: погрешностью измерений на маршрутах ε_1 и ε_2 , и погрешностью итоговых карт аномалий силы тяжести - ε_3 .

Погрешности ε_1 и ε_2 включают в себя остаточные возмущающие ускорения, которые в дальнейшем исключаются из результатов съемки при построении сетей. Поэтому обе эти величины (или любая из них), характеризующая главным образом условия съемки, могут использоваться только для предварительной оценки качества работ.

Погрешность ε_3 принимается в качестве итоговой оценки качества съемки. Эта величина учитывает все погрешности съемки (за исключением ошибки в определении опорного значения силы тяжести в точке стоянки самолета). Она аналогична (хотя и не полностью идентична) «полной погрешности интерполяции» для наземных съемок и не должна превышать значений, представленных в таблице 1.

7.2. Погрешность измерений ε_1 оценивается по точкам пересечения рядовых маршрутов с опорными⁶ после обработки данных программой SR2GRAV и их увязки. Вычисление погрешности осуществляется по формуле [Инструкция..., 1980]:

$$\varepsilon_1 = \pm 1 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{N - n}} \quad (1)$$

где:

δ - отклонение измеренного значения от среднего;
 N – общее число измерений;
 n – число пунктов измерений.

Если в какой-либо точке пересечения разность аномалий имеет недопустимо большое значение, она может быть исключена из процедуры оценки погрешности ε_1 . Число отбракованных точек не должно превышать 2%.

7.3. Погрешность измерений ε_2 оценивается сопоставлением аномалий силы тяжести на повторных маршрутах после обработки данных программой SR2GRAV по формуле (1).

Повторные маршруты выполняются вдоль одной траектории в зонах с аномальным градиентом поля менее 20 Этвеш, при уровне возмущающих ускорений (RMS по маршруту) менее 20 Гал. Должно быть пройдено не менее 2-х повторных маршрутов общей длиной не менее 1000 пог. км. При значительном удалении съемки от аэропорта базирования допускается использование трассы подлета самолета к площади работ в качестве повторного маршрута.

Если на какой-либо участке профиля разность аномалий имеет недопустимо большие значения, соответствующие точки могут быть исключены из процедуры оценки погрешности ε_2 . Число отбракованных точек не должно превышать 2%.

⁶ Могут быть использованы также точки пересечения рядовых маршрутов с диагональными, пройденными для оценки качества аэромагнитной съемки, если измерения магнитного поля предусмотрены Техническим заданием.

Погрешности ε_1 и ε_2 не должны превышать ± 2.0 мГал для съемок I и II категории и ± 2.5 мГал для съемок III категории (при сглаживании 100 секунд).

7.4. Для итоговой оценки качества съемки используется величина, характеризующая погрешность полученной модели поля силы тяжести. Вычисление погрешности осуществляется по формуле (1).

С учетом того, что $N = 2 \cdot n$, $\delta_1^2 = (\Delta g_1 - \Delta g_2)^2$, где Δg_1 и Δg_2 – значения гравитационного поля в точке из первой и второй реализации соответственно, а суммирование выполняется по $2 \cdot n$ слагаемым, формула (1) преобразуется к виду:

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_{1i}^2}{2 \cdot n}}, \quad (2)$$

Поскольку окончательные значения аномалий силы тяжести являются средними арифметическими значений поля по двум реализациям, то итоговая погрешность в $\sqrt{2}$ раз меньше погрешности слагаемых, т.е. составляет $\varepsilon_3 = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}}$ мГал. Именно эта величина принимается в качестве оценки погрешности модели поля силы тяжести.

8. ТЕХНИЧЕСКАЯ ОТЧЕТНОСТЬ

8.1 По результатам съемки составляется отчет в соответствии с действующими нормативными документами. К отчету в электронной форме представляются следующие материалы:

- Бортовые данные в виде бинарных файлов: Gddhhmm.AIR (ddhhmm - день, час и минута открытия файла) – содержит данные чувствительного элемента гравиметра; горизонтальных акселерометров; параметр, привязывающий эти данные к гринвичскому времени и ряд других; Sddhhmm.AIR – данные гироинерциальной платформы, используемые для оценки погрешности построения вертикали места: скорости относительно Земли по осям X и Y; курс; показания датчиков углов X и Y карданова подвеса; параметр привязки к гринвичскому времени и др; ddmnnp.JPS (ddmnnp – день, месяц, порядковый номер файла) – данные спутниковой навигационной системы.
- Наземные бинарные JPS-файлы, которые формируются и записываются на базовых станциях.
- Каталог гравиметрических пунктов вдоль съемочных профилей с шагом 1сек. в виде текстового файла формата XYZ или базы данных формата GDB Geosoft. В каталоге для каждого пункта должны быть представлены географические координаты в СК-42 (СК-95); прямоугольные координаты в проекции Гаусса-Крюгера для соответствующей зоны; высоты над физической поверхностью, уровнем моря, геодезическая; высота рельефа; первичные показания гравиметра; результаты обработки данных программой SR2GRAV с выбранным интервалом фильтрации; нормальное поле по формуле Гельмерта 1909 г (с поправкой -14 мГал); поправки за притяжение топографических масс с плотностью 2.3 и 2.67 г/см³; значения аномалий силы тяжести в топографической редукции (аномалий Буге) с плотностью 2.3 и 2.67 г/см³ в условном уровне;
- Цифровые модели аномалий силы тяжести в топографической редукции (аномалий Буге) с плотностью 2.3 и 2.67 г/см³ на высоте съемки и земной поверхности (если проводилось редуцирование) в условном уровне в формате GRD Geosoft;
- Карты аномалий силы тяжести в топографической редукции (аномалий Буге) с плотностью 2.3 и 2.67 г/см³ на высоте съемки и земной поверхности (если проводилось редуцирование) в условном уровне в формате MAP Geosoft.

8.2. В виде твердых копий к отчету прилагаются карты аномалий силы тяжести в топографической редукции (аномалий Буге) с плотностью 2.3 и 2.67 г/см³ в условном уровне на уровне съемки и земной поверхности (если проводилось редуцирование) и схема съемочных маршрутов (ФЛП).

8.3. Все перечисленные материалы после завершения работ передаются Заказчику и в Росгеолфонд и сдаются в архив предприятия на электронных носителях (DVD-дисках).

ЛИТЕРАТУРА

1. Авиационный гравиметр GT-2А. Руководство по эксплуатации. ЛОНХ 461529.001РЭ. Москва, 2009.
2. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусков А.А. Изучение строения кристаллического основания платформенных областей по данным магниторазведки и гравиразведки // Геофизика. - 2003. № 6.
3. Болотин Ю.В., Голован А.А., Кручинин П.А., Парусников Н.А., Тихомиров В.В., Трубников С.А. Задача авиационной гравиметрии. Некоторые результаты испытаний // Вестн. Моск. Ун-та. Сер.1, Математика. Механика. 1999. № 2.
4. Инструкция по гравиразведке. М., 1980 г.
5. Инструкция по магниторазведке. Л., «Недра», 1981.
6. Инструкция по морской гравиметрической съемке (ИГ-78), 1979 г.
7. Карта качества геофизической изученности России, Сост. Никольский Ю.И., М., 1995 г.
8. Кузовков Н. Т., Салычев О. С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982.
9. Могилевский В.Е., Контарович О.Р. Аэрогравиметрия – инновационная технология в геофизике // Разведка и охрана недр, 2011, № 7.
10. Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия // Москва, 1978 г.
11. Программное обеспечение SR2MSU камеральной обработки данных для авиационного гравиметрического комплекса GT2А, МГУ, М., 2009 г.
12. Страхов В.Н., Лапина М.И. Прямая и обратная задача гравиметрии и магнитометрии для произвольных однородных многогранников // Киев, 1983.
13. Требования к опережающей геофизической основе Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 третьего поколения (вторая редакция). – М.–СПб.: Роснедра, 2012. – 23 с.
14. 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.
15. 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.
16. William J. Hinze et al. New standarts for reducing gravity data: The North American gravity database // Geophysics, 2005, vol. 70, no. 4.