

**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ  
ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ «РОССИЙСКОЕ  
ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО» (РОСГЕО)**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
по аэрогеофизическому сопровождению прогнозных и поисковых  
работ на твердые полезные ископаемые**



Москва, 2023 г.

## С о с т а в и т е л и

П.С. Бабаянц, С.А. Павлов, А.А. Трусов

## Р е д а к т о р

Г.А. Машковцев

Методические рекомендации подготовлены в Российском геологическом обществе (РОСГЕО)

*Одобрены и рекомендованы к использованию в качестве регламентирующего документа при проектировании и проведении прогнозных и поисковых работ, выполняемых за счет средств федерального бюджета и средств недропользователей, секцией ресурсов и лицензирования твердых полезных ископаемых НТС Федерального Агентства по недропользованию (протокол № 04-17/1-пр от 25 января 2023 г.).*

**Методические рекомендации по аэрогеофизическому сопровождению прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые. – М.: 2023. с.**

Настоящие методические рекомендации определяют состав работ по аэрогеофизическому сопровождению прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые и регламентируют проектирование, организацию и методику проведения аэрогеофизических съемок в составе геологоразведочных работ, направленных на прогноз и поиски месторождений твердых полезных ископаемых.

Рекомендации составлены на основе опыта выполнения современных комплексных аэрогеофизических съемок специализированными организациями, с учетом имеющихся нормативно-методических документов, включая созданные в последние годы.

Рекомендованы к использованию для всех организаций, предприятий, физических и юридических лиц, выполняющих аэрогеофизические съемки указанного назначения за счет средств Федерального бюджета.

УДК 550. 83

ББК 26.21

© Федеральное агентство по недропользованию, 2023

© Общественная организация «Российское геологическое общество» (РОСГЕО)», 2022

© Коллектив авторов, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ОГЛАВЛЕНИЕ</b> .....	<b>3</b>
<b>СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	<b>5</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>6</b>
<b>1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ</b> .....	<b>7</b>
Состав и назначение работ по аэрогеофизическому обеспечению.....	7
Современные аэрогеофизические технологии.....	7
Характеристика объекта исследований.....	9
Условия выполнения съемок.....	10
Аппаратно-программный комплекс.....	11
Структура аэрогеофизических работ.....	12
Подготовительный период.....	12
Полевой период.....	12
Период обработки и интерпретации данных.....	13
<b>2. АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ</b> .....	<b>15</b>
Аэромагнитная съемка.....	15
Аэрогравиметрия.....	16
Аэрогамма-спектрометрия.....	17
Аэроэлектроразведка.....	18
«Активные» методы.....	19
«Пассивные» методы.....	21
Вспомогательное оборудование.....	21
Наземное обеспечение.....	22
<b>3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ</b> .....	<b>23</b>
Основания для выполнения работ.....	23
Выбор комплекса методов.....	23
Методика съемки.....	24
Выбор оптимального авианосителя.....	26
<b>4. ПРОИЗВОДСТВО СЪЕМКИ</b> .....	<b>28</b>
Подготовительный этап.....	28
Полевые работы.....	28
Установка наземного оборудования.....	28
Контрольно-настроечные операции.....	29
Предполетная подготовка экипажа и оборудования.....	31
Съемочные полеты.....	31
Текущий контроль качества.....	31
Текущая отчетность.....	34
Полевая обработка материалов.....	34
Завершение полевых работ.....	35
<b>5. КАМЕРАЛЬНЫЕ РАБОТЫ</b> .....	<b>36</b>
Камеральная обработка данных.....	36
Увязка данных.....	39
Оценка качества результатов аэрогеофизической съемки.....	40
<b>6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ СЪЕМОК</b> .....	<b>44</b>

<b>Физико-геологическое моделирование целевого объекта .....</b>	<b>44</b>
<b>Методы и технологии анализа данных .....</b>	<b>45</b>
Создание цифровых моделей измеренных геофизических полей.....	46
Физико-математическое моделирование геофизических полей .....	47
Многомерный анализ данных .....	49
Методы распознавания образов.....	50
<b>Геологическая интерпретация результатов аэрогеофизических работ .....</b>	<b>51</b>
<b>7. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ .....</b>	<b>53</b>
<b>Содержание отчета о результатах выполненных работ .....</b>	<b>53</b>
<b>Сопровождающая информация.....</b>	<b>54</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>56</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>58</b>

## СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АГС** – аэрогамма-спектрометрия (-спектрометрический)  
**АМПП** – аэровариант метода переходных процессов  
**БПЛА** – беспилотный летательный аппарат  
**ВИРГ** – Всесоюзный институт разведочной геофизики  
**ВС** – воздушное судно  
**ГИС** – геоинформационная система  
**ГЛОНАСС** – Глобальная навигационная спутниковая система – российская спутниковая система навигации  
**ГОСТ** – Государственный стандарт  
**ГСК-2011** – Государственная геодезическая система координат 2011 года  
**ГШВС** – Генеральный штаб вооруженных сил России  
**ДИП** – дипольное индуктивное профилирование  
**ДИП-А** – дипольное индуктивное профилирование в аэроварианте  
**ДМ** – диагональные (секущие) маршруты  
**ЕРЭ** – естественные (природные) радиоактивные элементы  
**ЗЛП** – заданные (проектные) линии полета  
**ЛА** – летательный аппарат  
**МВС** – магнитовариационная станция  
**МЭД** – мощность экспозиционной дозы гамма-излучения  
**ОМ** – опорные маршруты  
**ПВК** – полевой обрабатывающий вычислительный комплекс  
**ПМ** – повторные маршруты  
**ПСД** – проектно-сметная документация  
**РКМ** – радиометрический контрольный маршрут  
**РМ** – рабочие (рядовые) маршруты  
**РЭ** – радиоактивный элемент  
**СВК** – структурно-вещественный комплекс  
**СДВР** – метод радиоэлектромагнитного профилирования – радиокип в аэроварианте  
**СЛА** – сверхлегкий пилотируемый летательный аппарат  
**СМ** – связующие маршруты  
**ТЗ** – техническое (геологическое) задание  
**ФГМ** – физико-геологическая модель  
**ФЛП** – фактические линии полета  
**GPS (Global Positioning System)** – система глобального позиционирования, спутниковая навигационная система  
**IGRF (International Geomagnetic Reference Field)** – Международное геомагнитное аналитическое поле

## ВВЕДЕНИЕ

«Методические рекомендации по аэрогеофизическому сопровождению прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые» (далее – Рекомендации) представляют собой нормативно-методический документ, регламентирующий технологию выполнения аэрогеофизических съемок в составе геологоразведочных работ, направленных на прогноз и поиски месторождений твердых полезных ископаемых.

Необходимость подготовки Рекомендаций продиктована отсутствием современных методических документов подобного назначения. Имеющиеся в наличии документы (см., например, [12, 13, 14, 25]) были подготовлены более 40 лет назад и основывались на опыте работ с аэрогеофизической аппаратурой, разработанной в 50–70-е годы прошлого столетия, и с использованием устаревших технологий навигационного обеспечения работ.

Освоение компьютерных технологий, широкое использование в геофизическом приборостроении современной микропроцессорной элементной базы, внедрение в практику работ спутниковых навигационных систем привело к радикальному повышению точности и пространственного разрешения аэрогеофизических данных, уменьшению массогабаритных характеристик аппаратуры, снижению вероятности технологического конфликта разнородных аэрогеофизических измерительных систем. Это привело к необходимости существенных изменений подходов к решению всего спектра организационных и технико-методических вопросов – от выбора оптимального авианосителя до обработки и интерпретации данных.

Настоящие Рекомендации охватывают вопросы проектирования, организации, производства полевых и камеральных работ, включая создание цифровых моделей геофизических полей и комплексную интерпретацию данных.

Рекомендации предназначены к использованию при выполнении аэрогеофизических съемок для обеспечения геофизической информацией различных видов прогнозных и поисковых работ в соответствии с принятым Порядком проведения геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые по этапам и стадиям [20].

Необходимость следования требованиям настоящего документа при выполнении аэрогеофизических работ указанного назначения определяется включением Рекомендаций в перечень регламентирующих документов Технического (геологического) задания на выполнение работ.

# 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## Состав и назначение работ по аэрогеофизическому обеспечению

1.1. Настоящие Рекомендации направлены на повышение эффективности комплексных аэрогеофизических съемок, нацеленных на прогноз и поиски месторождений твердых полезных ископаемых.

1.2. Под аэрогеофизическим сопровождением прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые понимается полный цикл работ по обоснованию, проектированию, организации, выполнению аэрогеофизической съемки, камеральной обработке и геологической интерпретации полученных данных.

1.3. Целевым назначением работ по аэрогеофизическому сопровождению является оптимизация геологоразведочного производства как за счет снижения объемов и точного позиционирования заверочных горно-буровых работ, так и путем непосредственной локализации потенциальных целевых объектов. Под оптимизацией производства понимается снижение затрат и времени на выполнение работ без потери информативности.

1.4. Основания для использования современных аэрогеофизических технологий в указанных целях определяются их преимуществами по отношению к другим видам работ того же назначения. К числу главных преимуществ относятся:

- высокая производительность, возможность за короткое время покрывать съемками высокого пространственного разрешения значительные территории;
- возможность работы на площадях, труднодоступных для других видов работ (заболоченность, обводнение, расчлененный рельеф и т.п.);
- возможность локализации объектов, не выходящих на дневную поверхность (в слепом и погребенном залегании);
- возможность комплексирования методов, причем добавление дополнительного информационного канала не ведет к кратному увеличению стоимости работ;
- возможность работы практически на всех стадиях геологоразведочного процесса с получением данных необходимой детальности.

1.5. Указанные преимущества определяют целесообразность использования аэрогеофизических технологий, прежде всего на опережающем этапе геологоразведочных работ, до начала наземных полевых исследований.

## Современные аэрогеофизические технологии

1.6. Аэрогеофизические технологии включают набор методов изучения геологического строения Земли, основанных на измерении с борта летательного аппарата компонент физических полей естественного происхождения либо искусственно индуцируемых. Источник искусственно индуцируемых физических полей может быть как перемещаемым (закрепленным на борту летательного аппарата либо на специальной подвеске), так и стационарным, размещающимся на земной поверхности.

1.7. Предметом изучения современных аэрогеофизических технологий являются:

- естественное (природное) магнитное поле Земли (аэромагнитная съемка), особенности структуры которого определяются распределением магнитных свойств горных пород и руд разреза (магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности [13]);

- поле силы тяжести Земли (аэрогравиметрия), особенности структуры которого определяются распределением плотности горных пород и руд разреза [12];
- естественное или искусственно индуцируемое электромагнитное поле, гармоническое или нестационарное, измеряемое в широком диапазоне частот (аэроэлектроразведка), особенности структуры которого определяются электромагнитными свойствами геологических образований: удельной электропроводностью (удельным электрическим сопротивлением), поляризуемостью, диэлектрической проницаемостью, магнитной проницаемостью [14];
- поле радиоактивности и его компоненты (аэрогамма-спектрометрия), структура которого определяется фоном естественной радиоактивности и содержаниями в самой верхней части разреза естественных радионуклидов – калия, тория и урана [25]; дополнительно данные аэрогамма-спектрометрии могут быть использованы для картирования возможного техногенного загрязнения территории искусственными радионуклидами, а также оценки распределения локальной составляющей атмосферного радона.

1.8. Современные аэрогеофизические технологии непрерывно развиваются и совершенствуются. Главными факторами, обеспечивающими их поступательное развитие, являются:

- развитие аппаратно-технического обеспечения в направлении повышения чувствительности и пространственного разрешения, что позволяет ставить и решать задачи, ранее считавшиеся для подобных технологий недоступными, включая изучение и локализацию малоконтрастных геологических объектов;
- усовершенствование измерительных средств в направлении снижения массогабаритных характеристик и повышения помехозащищенности, что исключает возможность технологического конфликта и определяет возможность их использования в любых необходимых комбинациях;
- расширение парка доступных для использования авианосителей (включая сверхлегкие пилотируемые (СЛА) и БПЛА), что обеспечивает возможность рентабельного выполнения работ на участках любых размеров, в т.ч. в отдаленных районах с неразвитой инфраструктурой;
- использование современных систем спутниковой навигации, включая отечественную ГЛОНАСС, с помощью которых осуществляется определение координат точек измерения геофизических полей и проводка ЛА по линии маршрута с высокой точностью, обеспечивающей выполнение кондиционных съемок при средне-, крупномасштабных и детальных работах. Использование спутниковых навигационных систем обеспечивает также объемный характер получаемой информации (за счет разновысотности точек измерения геофизических полей) и получение дополнительного информационного канала – цифровой модели рельефа местности;
- развитие программного обеспечения, используемого для обработки и интерпретации результатов измерений, включая технологии 3D-моделирования, инверсии геофизических полей, методы машинного обучения и т.п., что позволяет повысить надежность и достоверность геологической интерпретации результатов измерений.

1.9. Для обеспечения высокого качества результатов аэрогеофизических измерений (низкая погрешность измерений, высокие пространственное разрешение и точность позиционирования) применяются вспомогательные методы и технологии, к числу которых относятся система навигационного сопровождения и оборудование для наземного обеспечения работ (см. 2.49, 2.54).

1.10. При необходимости решения ряда специфических задач в состав аэрогеофизического комплекса могут включаться дополнительные методы и технологии, в т.ч. обеспечивающие получение цифрового изображения дневной поверхности в разных диапазонах спектра (гиперспектральная и тепловая инфракрасная аэросъемка и т.п.), оценку морфологии земной поверхности (фотограмметрия, лазерное сканирование) и другие.

### **Характеристика объекта исследований**

1.11. Под объектом исследований понимается территория (площадь), в пределах которой выполняются работы, направленные на прогноз или поиски месторождений твердых полезных ископаемых. Характеристика и размеры объекта исследований и целевого объекта должны быть согласованы с системой соподчиненных минерагенических таксонов, принятой в настоящее время [17].

1.12. Указанные минерагенические таксоны, согласно [17], имеют следующие определения (в порядке снижения ранга):

- Минерагеническая область (в линейном выражении минерагеническая зона) – площадь размером в десятки – первые сотни тысяч квадратных километров ( $n \cdot 10^4 \div 10^5 \text{ км}^2$ ), строение и история геологического развития которой определили ее металлогеническую специализацию.
- Рудный район (в линейном варианте рудоносная зона) – площадь (размером  $n \cdot 10^3 \div 10^4 \text{ км}^2$ ) с отчетливо проявленными признаками рудоносности, включающая несколько месторождений и значительное число благоприятно сочетающихся минерагенических факторов и отличающаяся более высокой рудо насыщенностью по сравнению с окружающими территориями.
- Рудный узел – аномально рудоносный участок земной коры изометричных или неправильных очертаний (площадью  $n \cdot 10^2 \div 1,5 \cdot 10^3 \text{ км}^2$ ), образованный локальным сочетанием благоприятных минерагенических факторов и вмещающий совокупность пространственно сближенных рудных объектов (или рудных полей), среди которых есть как минимум одно месторождение.
- Рудное поле – рудоносная площадь ( $n \cdot 10 \div n \cdot 10^2 \text{ км}^2$ ) с близкими по расположению, возрасту и рудноформационному типу месторождениями и (или) рудными телами, связанными общностью происхождения и единством геологической структуры.
- Рудное месторождение – природное или техногенное скопление полезного ископаемого, обычно площадью от единиц до десятков  $\text{км}^2$ , которое по своим качественным, количественным, горнотехническим, географо-экономическим и геоэкологическим параметрам соответствует условиям его рентабельной разработки; содержит одно или несколько рудных тел (залежей), объединенных общностью происхождения [24].

1.13. Иерархическая связь минерагенических таксонов определяет соотношение между объектом исследований и доступным для изучения целевым объектом. Так, при

обследовании рудного района в качестве целевых объектов, доступных для локализации, могут рассматриваться рудные узлы и (при благоприятных обстоятельствах) рудные поля; при изучении рудных узлов – соответственно рудные поля и наиболее крупные месторождения и т.д. Характер объекта изучения и целевого объекта определяет масштаб и отвечающую ему стадию геологоразведочных работ.

1.14. Локализация целевых объектов осуществляется на основе последовательного выявления и картирования факторов контроля оруденения, которые включают как косвенные критерии (вещественные – формационные, петрографические, минералогические, геохимические и др.; структурные; геохронологические; генетические и т.п.), так и прямые признаки рудоносности [8, 9]. Таким образом, планируемые аэрогеофизические работы должны быть нацелены на картирование указанных факторов, вплоть до прямого обнаружения рудных залежей (при благоприятных условиях).

1.15. Факторы контроля оруденения могут существенно изменяться внутри одной минерагенической провинции в зависимости от ранга целевого объекта (минерагенического таксона) при поисках и разведке месторождений даже одного и того же промышленно-генетического типа. В связи с этим залогом успешного использования аэрогеофизических работ является предварительное физико-геологическое моделирование целевого объекта (см. 6.4 – 6.10) с использованием прогнозно-поисковых моделей минерагенического таксона соответствующего ранга изучаемого рудно-формационного типа.

#### **Условия выполнения съемок**

1.16. В соответствии с принятым в настоящее время порядком проведения геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые по этапам и стадиям [20] непосредственное выполнение аэрогеофизических съемок предусмотрено начиная со стадии среднемасштабного геологического изучения. Работы стадии среднемасштабного изучения завершаются составлением геологических карт различного назначения (включая прогнозно-минерагенические) в масштабе 1:200 000 ÷ 1:100 000. В соответствии с действующим положением об этапах и стадиях геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые [20] среднемасштабные съемки используются для обеспечения средне- и крупномасштабного геологического картографирования. Объектом изучения в этом случае является потенциальный рудный район (рудноносная зона), целевыми объектами – рудные узлы и рудные поля.

1.17. Аэрогеофизические съемки, выполняемые для прогноза и поисков месторождений твердых полезных ископаемых, условно можно разделить на две категории: крупномасштабные (масштаба 1:25 000 ÷ 1:50 000) и детальные (масштаба 1:10 000 и крупнее).

1.18. Основной задачей работ масштаба 1:25 000 ÷ 1:50 000 является прогноз и выявление локальных площадей и структур, перспективных для обнаружения месторождений полезных ископаемых, на основе установления геологической природы выявленных геофизических аномалий, выделения новых или уточнения параметров известных рудных полей и других прогнозных площадей и перспективных участков с оценкой прогнозных ресурсов [20].

1.19. Детальные съемки выполняются на этапе поисков и оценки месторождений [20] на новых или недостаточно изученных площадях. Возможные направления работ –

определение перспективности площади для дальнейшего изучения, выявление и геометризация новых объектов (месторождений, рудопроявлений, залежей).

1.20. Решение о целесообразности выполнения аэрогеофизических съемок принимается по результатам анализа всего спектра имеющейся в наличии ретроспективной геолого-геофизической информации, включая данные об изученности территории геофизическими (в т.ч. аэрогеофизическими) методами. Пригодность (или непригодность) ретроспективных материалов для решения поставленных перед планируемыми работами геологических задач должна быть обоснована.

1.21. Выбор масштаба аэрогеофизических съемок осуществляется с учетом особенностей геологического строения объекта исследований и предполагаемых размеров потенциальных целевых объектов. Учитывая особенности последующей обработки аэрогеофизических данных, для максимально полного извлечения из них геологической информации, в том числе с использованием метода скользящего окна, целесообразно выполнять съемки в масштабе на одну – две ступени детальнее, чем масштаб отчетных карт геологического содержания. Так, для подготовки прогнозно-минерагенических карт масштаба 1:200 000 целесообразно проведение съемок в масштабе 1:100 000 ÷ 1:50 000.

#### **Аппаратно-программный комплекс**

1.22. Аэрогеофизический аппаратно-программный комплекс представляет собой совокупность программного обеспечения и технического оборудования (средств измерения и компьютерной техники), размещенного на выбранном авианосителе и предназначенного для выполнения аэрогеофизических съемок с заданными параметрами.

1.23. Выбор конфигурации аппаратно-программного комплекса осуществляется с учетом следующих факторов:

- целевого назначения работ и основных геологических задач, которые определяются с учетом ранга минерагенических таксонов объекта изучения и целевых объектов на основе анализа ожидаемых факторов контроля оруденения и характера их отражения в геофизических полях – для определения состава геофизического комплекса и параметров съемки (высоты и пространственного разрешения);
- особенностей геологического строения территории (наличия и мощности рыхлого покрова; характера и степени тектонической дислоцированности; соотношения осадочных и магматических образований, в т.ч. в слепом и погребенном залегании; наличия, масштабов проявления и характера наложенных процессов и т.п.) – для оценки необходимой глубины изучения и выбора оптимальных модификаций геофизических методов;
- ландшафтно-географических условий съемки (абсолютных высотных отметок, степени расчлененности рельефа, залесенности, наличия водоемов и водотоков, техногенной нагрузки, характера и уровня возможных природных и промышленных помех и т.п.) – для выбора оптимальных модификаций геофизических методов и наиболее подходящего авианосителя с учетом его технических характеристик (крейсерской скорости, скороподъемности и т.п.);
- размеров площади и необходимого пространственного разрешения съемки – для выбора оптимального типа авианосителя в целях обеспечения максимальной экономической эффективности работ;

- развитости инфраструктуры и средств коммуникации, наличия и удаленности от площади работ доступных к использованию аэропортов базирования – для выбора оптимальной методики выполнения съемочных работ, включая оборудование (при необходимости) временных посадочных площадок, определение мест размещения вспомогательного наземного оборудования, выбор участков для калибровки аппаратуры и т.п.

1.24. Аэрогеофизический аппаратно-программный комплекс дополняется средствами наземного обеспечения работ (см. 2.54).

### **Структура аэрогеофизических работ**

1.25. Аэрогеофизические съемки, направленные на прогноз и поиски месторождений твердых полезных ископаемых, включают три этапа работ: подготовительный, полевой, обработка и интерпретация данных.

#### *Подготовительный период*

1.26. В рамках подготовительного периода осуществляются проектирование аэрогеофизических работ и подготовка к их выполнению, включая:

- сбор, обобщение и анализ всей доступной ретроспективной геолого-геофизической и сопутствующей информации для определения характеристик целевого объекта и вмещающей среды, оценки условий выполнения аэрогеофизических съемок, формулирования геологических задач, поставленных перед работами;
- определение состава комплекса аэрогеофизических методов и выбора авианосителя, оптимального для данных условий;
- определение методики планируемой съемки (масштаб, высота над рельефом, способ облета и т.п.);
- подготовку аппаратуры, в т.ч. поверку и калибровку средств измерения аккредитованными специализированными предприятиями;
- получение необходимой разрешительной документации на выполнение съемочных полетов;
- подготовку проектно-сметной документации (ПСД), которая при необходимости должна пройти апробацию в органах Государственной экспертизы в установленном порядке.

1.27. Аэрогеофизическая аппаратура как средство измерения не входит в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений (ст. 13 Федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «Об обеспечении единства измерений»; приказ Минпромторга России от 31.07.2020 № 2510 «Об утверждении порядка проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке» (ред. от 06.10.2021)), в связи с чем ее метрологическое обеспечение может выполняться в форме калибровок.

#### *Полевой период*

1.28. Полевой период разделяется на два этапа: предварительный, который частично реализуется в месте базирования организации – исполнителя аэрогеофизических съемок (или в аэропорту базирования авианосителя), и собственно полевые работы.

1.29. На предварительном этапе полевого периода в месте базирования выполняется проверка работоспособности измерительных систем и вспомогательного оборудования, предназначенных для съемки; монтаж элементов комплекса на борт летательного аппарата в соответствии с установочными чертежами, утвержденными в установленном порядке; проверка работоспособности комплекса и устранение (при необходимости) взаимного воздействия его элементов и влияния бортового оборудования на результаты измерения.

1.30. Подготовка аэрогеофизического комплекса к съемке завершается выполнением пробного вылета продолжительностью не менее 30 минут для оценки работоспособности бортового комплекса в целом. При необходимости в этот период может быть выполнена градуировка аэрогамма-спектрометров с использованием радиоактивных источников (см. 4.13).

1.31. По результатам перечисленных выше работ составляется Акт готовности к полевым работам, который подписывается ответственным исполнителем работ, представителем Заказчика и утверждается директором Предприятия – исполнителем работ. После этого осуществляется перебазирование съемочного отряда к месту выполнения полевых работ.

1.32. На месте проведения полевых работ до начала съемок осуществляются следующие операции: устанавливается наземное оборудование, проводится полный спектр необходимых контрольно-настроечных операций для каждого элемента комплекса (см. 4.8 – 4.16), подготавливается схема проектных (заданных) линий полетов, устанавливаются устойчивые каналы связи с головным офисом и точками базирования наземного оборудования (при необходимости).

1.33. Собственно съемочные работы выполняются последовательно, по заранее подготовленной схеме маршрутов (см. 4.18 – 4.20). Для оценки соответствия результатов съемки требованиям Технического (геологического) задания осуществляется текущий контроль качества результатов измерений (см. 4.21 – 4.32). На его основании ответственным исполнителем работ принимается решение о принятии результатов измерений к последующей обработке либо о необходимости повторного пролета по отдельным маршрутам или их отрезкам.

1.34. Съемка завершается после выполнения всего запланированного объема работ, включая измерения на специальных маршрутах, предназначенных для оценки качества выполненных работ. Решение о выполнении всего объема работ с соответствующим качеством и начале демобилизации полевого отряда подтверждается Актом завершения работ (см. 4.39), который в обязательном порядке должен быть согласован с уполномоченным представителем Заказчика.

#### *Период обработки и интерпретации данных*

1.35. Обработка аэрогеофизических данных может частично выполняться во время полевого этапа работ (предварительная обработка) на базе полевого отряда или на базе предприятия (при наличии возможности оперативной передачи данных с места полевых работ), но, как правило, осуществляется на базе предприятия по окончании полевого этапа. Обработка выполняется раздельно для каждого компонента аэрогеофизического комплекса.

1.36. В ходе камеральной обработки данных осуществляется ввод всех необходимых поправок в результаты измерений (для каждого компонента аэрогеофизического комплекса) и увязка материалов. Для построения отчетных карт первичных геофизических полей выполняется интерполяция результатов измерений в узлы регулярной сети (матрицы) с размером ячейки, равным  $0,4 \div 0,5$  расстояния между рабочими маршрутами (см. 5.10 – 5.14).

1.37. Основным назначением комплексных аэрогеофизических работ, направленных на прогноз и поиски месторождений твердых полезных ископаемых, является получение дополнительной информации об особенностях геологического строения изучаемой территории и выявление новых потенциально перспективных объектов (при благоприятных условиях). В этой связи главным итогом выполненных работ являются результаты их геологической интерпретации.

1.38. Надежность и достоверность полученных результатов обеспечивается в том числе использованием всего спектра современных методов анализа данных, включая технологии прямого физико-математического моделирования, вероятностно-статистические методы, технологии кластерного анализа, методы машинного обучения и др.

1.39. По окончании работ составляется геологический отчет, включающий подробное описание технологии выполненных съемок, методики обработки и интерпретации данных, полученные геологические результаты. К отчету прилагаются (в электронном виде) банк данных первичной информации, промежуточные и окончательные результаты обработки и интерпретации данных в согласованных форматах (см. раздел 7).

## 2. АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

### Аэромагнитная съемка

2.1. Под аэромагнитной съемкой понимают измерение компонент магнитного поля Земли с целью определения их пространственного распределения. Структура аномального магнитного поля зависит в основном от состава и формы нахождения в породе ферромагнитных минералов. В качестве средств измерения используются специально разработанные для указанных целей приборы – аэромагнитометры.

2.2. Современные аэромагнитометры практически исключительно основаны на использовании квантовых датчиков, измеряющих модуль полного вектора магнитного поля. Допускается использование чувствительных элементов (датчиков), основанных на других принципах измерения магнитного поля (протонные, феррозондовые и др.) и регистрирующих другие компоненты магнитного поля Земли (вертикальную и горизонтальную составляющие, наклонение, склонение, градиент в разных направлениях), если их технические характеристики удовлетворяют современным требованиям.

2.3. Для аэромагнитной съемки используются аэромагнитометры с датчиками, обеспечивающими измерение модуля полного вектора индукции магнитного поля с чувствительностью (погрешностью отсчета) не хуже 0,01 нТл и с частотой не менее 10 измерений в секунду. С учетом необходимости работы в разное время года, в различных климатических условиях и в разных широтах, датчики должны обладать широким диапазоном измерения (20 000 ÷ 100 000 нТл), увеличенным диапазоном рабочих зон (10 ÷ 80° и 100 ÷ 170° относительно направления вектора нормального магнитного поля) и расширенным температурным диапазоном (-40 ÷ +40 °С).

2.4. Для съемки могут быть использованы любые аэромагнитометры, обеспечивающие измерение модуля полного вектора индукции магнитного поля и удовлетворяющие указанным требованиям (см. 2.2 – 2.3), что должно быть подтверждено результатами калибровки, выполненной в установленном порядке (см. 4.1 – 4.3).

2.5. При выполнении съемки датчик аэромагнитометра может размещаться в выпускной гондоле, буксируемой воздушным судном на специальном трос-кабеле, либо в специальном боксе – стингере, жестко закрепленном на борту авианосителя.

2.6. При размещении датчика в выпускной гондоле длина трос-кабеля должна обеспечить минимизацию остаточного девиационного влияния авианосителя на результаты измерений.

2.7. При жестком креплении датчика магнитометра для оценки и компенсации влияния авианосителя на результаты измерений используется дополнительный трехкомпонентный (обычно – феррозондовый) магнитометр, который размещается в непосредственной близости от датчика рабочего магнитометра.

2.8. Феррозондовый магнитометр должен обеспечивать измерение трех ортогональных компонент магнитного поля Земли с чувствительностью не хуже 1 нТл и частотой не менее 10 измерений в секунду.

2.9. Для учета влияния изменений магнитного поля во времени (вариаций магнитного поля) используются одна или несколько (в зависимости от размеров площади) базовых наземных магнитовариационных станций (см. 2.55, 4.6).

2.10. Для измерения вариаций магнитного поля используются магнитометры, аналогичные бортовым, либо специальные магнитовариационные станции со сходными характеристиками.

2.11. Технические характеристики современных аэромагнитометров допускают выполнение аэромагнитной съемки с использованием любого из числа доступных для аэрогеофизических измерений авианосителей (см. 3.27 – 3.29). Это позволяет выполнять аэромагнитные съемки любой необходимой детальности (вплоть до масштаба 1:1000 и крупнее).

### **Аэрогравиметрия**

2.12. Аэрогравиметрия – это измерение ускорений силы тяжести Земли на движущемся носителе с борта летательного аппарата. Аэрогравиметрические съемки, являясь особым видом гравиметрических работ, призваны решать те же геологические задачи, что и наземные гравиметрические съемки. Структура поля силы тяжести связана с распределением пород различной плотности в разрезе. Плотность горных пород определяется их вещественным составом и наложенными изменениями.

2.13. В настоящее время для выполнения аэрогравиметрических съемок доступны два типа гравиметров: компенсационные, с подвешенной пробной массой, размещенной на гиостабилизированной платформе (для минимизации влияния горизонтальных ускорений), и бесплатформенные, использующие инерциальные измерительные системы.

2.14. Для работы в разных широтах и в различных геолого-географических условиях аэрогравиметры должны обладать широким динамическим диапазоном измерений (до 1 g), устойчивостью к виброускорениям носителя (не хуже 100 Гал), малой постоянной времени (до 0,01 с), малой среднеквадратической погрешностью измерения (не более  $0,2 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ ). Для обеспечения идентичности измерений аэрогравиметры в процессе съемки должны быть дополнительно снабжены системой термостабилизации.

2.15. Из-за необходимости использования гиостабилизированного основания компенсационные аэрогравиметры характеризуются повышенной массой (до 140 кг), высоким энергопотреблением (до 300 Вт), значительными габаритными размерами (600 × 600 × 750 мм), повышенной чувствительностью к ускорениям носителя. Это ограничивает спектр доступных для использования авианосителей (традиционно используемые серийные самолеты и вертолеты) и предъявляет дополнительные требования к методике съемки (невозможность полного огибания рельефа), что ограничивает возможности комплексирования аэрогравиметрической съемки с методами, требующими выполнения полетов на малых (до 100 ÷ 150 м) высотах (спектрометрия, электроразведка).

2.16. Бесплатформенные гравиметры характеризуются пониженной массой (до 14 кг), малым энергопотреблением (до 150 Вт), относительно малыми размерами (259 × 253 × 380 мм), устойчивостью к аномальным ускорениям авианосителя. Это допускает их использование на легких и сверхлегких авианосителях, включая БПЛА повышенной

грузоподъемности, а также выполнение съемок с полным огибанием рельефа, в т.ч. в комплексе с другими аэрогеофизическими методами.

2.17. Используемые для съемки аэрогравиметры должны обладать техническими характеристиками, не уступающими перечисленным выше (см. 2.13 – 2.16), что должно быть подтверждено результатами калибровок и сертификации, выполненных в установленном порядке (см. 4.1 – 4.3).

2.18. При выполнении съемки аэрогравиметр размещается в салоне воздушного судна либо в специальном кожухе, закрепленном под фюзеляжем, по возможности максимально близко к центру масс авианосителя.

2.19. Неотъемлемой частью аэрогравиметрического комплекса является система навигационного обеспечения работ, использующая спутниковые навигационные системы, работающие в дифференциальном режиме. Дифференциальный режим коррекции обеспечивают базовые навигационные станции, развертываемые вблизи от площади работ (см. 2.56, 4.7).

2.20. Для приема спутниковых сигналов на авианосителях и базовых станциях устанавливаются двухчастотные, с фазовым режимом измерений, специальные навигационные приемники и антенны. Для обеспечения необходимой точности определения координат антенна бортовой навигационной системы устанавливается в непосредственной близости над местом размещения аэрогравиметра (на фюзеляже, осевой балке несущего винта вертолета и т.п.).

2.21. С учетом требований к авианосителям и особенностей постобработки результатов измерений (см. 5.5) получение пригодных для последующего использования аэрогравиметрических материалов в настоящее время возможно лишь для съемок масштаба 1:25 000 и мельче, т.е. при прогнозных работах, нацеленных на локализацию объектов ранга рудных полей и рудных узлов.

### **Аэрогамма-спектрометрия**

2.22. Аэрогамма-спектрометрия (для решения геологических задач) – метод, основанный на регистрации компонент поля радиоактивности с определением содержаний естественных радионуклидов ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) и мощности дозы суммарного гамма-излучения. В целом радиоактивность горных пород определяется содержаниями в них естественных радионуклидов (калия, тория и урана) и связана с их составом и генезисом. Поскольку метод характеризует распределение и соотношения содержаний ряда радионуклидов, он фактически эквивалентен геохимии по трем специфическим элементам.

2.23. Важнейшей особенностью аэрогамма-спектрометрии является крайне малая длина свободного пробега гамма-квантов в веществе, вследствие чего метод практически не обладает глубиной. С этим связана главная проблема использования его результатов, вызванная высокой ландшафтной обусловленностью и возможным экранированием поля радиоактивности даже маломощным чехлом рыхлых отложений (включая почвенный слой). При корректном подавлении влияния ландшафтного фактора соотношение концентраций естественных радионуклидов позволяет определить радиогеохимическую специализацию горных пород, часто обусловленную проявлениями наложенных процессов (гипергенез, гидротермальные изменения, метасоматоз и др.).

2.24. При съемках с пилотируемых ЛА для регистрации гамма-излучения используются цифровые аэрогамма-спектрометры, оснащенные сцинтилляционными детекторами в основном призматической формы (монокристаллы NaI, активированные Tl) объемом 4 литра, обычно объединенными попарно. Из них собирается блок детектирования общим объемом до 48 литров. Чаще всего съемки выполняются с чувствительным блоком объемом 32 литра.

2.25. При использовании в качестве носителя легких ЛА и съемке на малых высотах возможно использование детектора объемом 8 ÷ 16 л.

2.26. Для учета вариаций атмосферной составляющей остаточного фона (атмосферного радона, см. 5.6) аэрогамма-спектрометр может быть укомплектован дополнительным блоком детектирования, обычно объемом 4 л, экранированным от гамма-излучения нижнего полупространства – так называемым устройством регистрации гамма-излучения верхнего полупространства.

2.27. Современные аэрогамма-спектрометры должны обеспечивать цифровую регистрацию полного спектра гамма-излучения в диапазоне 0,38 ÷ 5,0 мэВ, распределенного не менее чем в 256 каналов; автоматическую стабилизацию энергетической шкалы по фотопикам естественных радионуклидов; отдельную регистрацию спектра от каждого кристалла (опционально); энергетическое разрешение по линии 0,662 МэВ (<sup>137</sup>Cs) – не хуже 9 %; частоту регистрации 1 раз в секунду.

2.28. Используемые для аэросъемки спектрометры должны удовлетворять перечисленным выше требованиям (см. 2.27), что должно подтверждаться результатами их калибровок и сертификации, выполненных в установленном порядке (см. 4.1 – 4.3).

2.29. В процессе съемки спектрометр обычно размещается в салоне пилотируемого авианосителя, хотя допускается его размещение в специальном кожухе, прикрепленном к фюзеляжу снаружи.

2.30. Современные аппаратно-программные комплексы позволяют получить кондиционные аэрогамма-спектрометрические данные как для прогнозных, так и для поисковых работ, в масштабах от 1:50 000 до 1:10 000 и крупнее.

### **Аэроэлектроразведка**

2.31. Аэроэлектроразведка – группа методов (модификаций), основанных на изучении распространения в Земле электромагнитных полей, искусственно созданных с помощью специальных источников или естественного происхождения. Электрические свойства пород (электропроводность, поляризуемость, диэлектрическая проницаемость) зависят от их вещественного состава, но в большей степени определяются объемным соотношением различных фаз, составляющих породу. Таким образом, электрические свойства образований определяются в первую очередь характером и степенью проявления наложенных процессов – как гипергенных, так и глубинных (метаморфизм, метасоматоз, обводненность, дробление и т.п.).

2.32. В составе методов аэроэлектроразведки выделяются две группы: «активные» методы, основанные на изучении электромагнитных полей, созданных специальными источниками, и «пассивные», работающие без специальных источников электромагнитного поля, в т.ч. основанные на измерении естественных электромагнитных полей Земли, обусловленных различными процессами в атмосфере и ионосфере. Для решения задач

крупномасштабного прогноза, поисков и оценки месторождений твердых полезных ископаемых предпочтительнее использование «активных» методов.

#### *«Активные» методы*

2.33. «Активные» методы аэроэлектроразведки могут базироваться на использовании гармонических (частотная модификация) либо нестационарных (импульсная электроразведка, модификация метода переходных процессов) полей.

2.34. При необходимости выполнения детальных работ на участках малых размеров (до первых десятков кв. км) возможно использование комбинированной модификации метода, когда источник поля (питающая линия или петля) размещается на поверхности Земли, а измерения выполняются с воздуха с использованием БПЛА в качестве носителя. В этом случае целесообразность использования оборудования с заданными техническими характеристиками должна быть обоснована результатами физико-геологического моделирования (см. 6.4 – 6.10).

#### *Частотная аэроэлектроразведка*

2.35. В современной частотной модификации аэроэлектроразведки реализуется метод многочастотного дипольного индуктивного профилирования (ДИП). В настоящее время метод допускает использование в качестве носителя как самолетов, так и вертолетов. В стандартной компоновке петля генераторного диполя устанавливается на летательном аппарате (самолет Ан-2 или Ан-3, вертолет Ми-8), а приемник буксируется за ним в гондоле на трос-кабеле длиной 70 м. Возможно использование платформенно независимой модификации метода, когда генераторная петля и приемник размещены на специальном буксируемом подвесе. При этом допускается использование более легкого авианосителя вертолетного типа.

2.36. Современная аппаратура для частотной аэроэлектроразведки должна обеспечивать устойчивую регистрацию сигнала в широком диапазоне изменения сопротивлений среды не менее чем на 4-х рабочих частотах. Нижняя частота должна быть не выше 130 Гц, что обеспечивает глубинность исследований не менее 100 ÷ 200 м (в зависимости от характеристик разреза). Комплекс должен обеспечивать измерение трех ортогональных компонент как для синфазной (первичное поле), так и для квадратурной (вторичное поле) компонент комплексного сигнала, а также стандартных инвариантов (отношение полуосей эллипса поляризации, угол его наклона, сумма квадратов полуосей) с частотой не менее 5 Гц. Для регистрации этих параметров и дальнейшей обработки результатов точное позиционирование приемных рамок относительно генераторного диполя выполняется с использованием сигналов компенсационных диполей (одного или двух).

2.37. Используемая для аэросъемки аппаратура должна удовлетворять перечисленным выше требованиям, что должно быть документально подтверждено результатами калибровки и поверки, выполненных в установленном порядке (см. 4.1 – 4.3).

2.38. Современные реализации частотной аэроэлектроразведки совмещают простоту и эффективность измерений с их высокой разрешающей способностью и большой эффективной глубиной, сохраняя работоспособность в широком диапазоне изменения проводящих характеристик нижнего полупространства. Этим обеспечиваются хорошие картировочные возможности метода.

2.39. С учетом массогабаритных характеристик, особенностей геометрии системы (разнесенные генераторный и измерительный диполи, использование подвески) и последующей обработки данных (см. 5.8) современные измерительные средства частотной аэроэлектроразведки позволяют получить кондиционные материалы в масштабе 1:10 000 и мельче.

#### Импульсная аэроэлектроразведка

2.40. В современной импульсной модификации аэроэлектроразведки реализуется аэровариант метода переходных процессов – АМПП (зондирование становлением в ближней зоне). В настоящее время технология реализуется в варианте, когда генераторная петля в форме рамки большого диаметра буксируется на подвеске за вертолетом, а измерительные рамки размещены соосно с генераторной петлей или на ее краю, либо размещаются в специальной гондоле, закрепленной на трос-кабеле.

2.41. Современная аппаратура для импульсной аэроэлектроразведки должна обладать большим моментом генераторного диполя (от 100 000 А·м<sup>2</sup>), большой продолжительностью импульса (5 ÷ 20 мс), высокой частотой возбуждения поля (10 ÷ 75 Гц), низким уровнем шумов (не хуже 0,2 нТл/с) и обеспечивать с частотой 5 Гц и более измерение как минимум двух ортогональных компонент вторичного поля (вертикальной и одной из горизонтальных) в приемной рамке не менее чем для 20 времен задержки. Весьма желательной является возможность настройки параметров системы к реальным условиям измерений (с учетом особенностей строения и свойств целевого объекта и вмещающей среды) посредством подбора перечисленных параметров (момент диполя, длительность импульса, частота возбуждения), основанного на результатах физико-математического моделирования (см. 6.9).

2.42. Используемая для аэросъемки аппаратура должна удовлетворять перечисленным выше требованиям, что документально подтверждается результатами калибровки и поверки, выполненных в установленном порядке (см. 4.1 – 4.3).

2.43. Импульсная электроразведка наиболее результативна при сопротивлениях изучаемых объектов до первых сотен Ом·м; в этом случае глубинность метода может достигать сотен метров. При высоких электрических сопротивлениях разреза разрешающая способность метода значительно ниже, что ухудшает его картировочные возможности. Частично компенсировать этот недостаток можно, выполняя измерения как после выключения тока (характеристика спада), так и при его включении (характеристика насыщения). Важным преимуществом метода является возможность определения не только проводимостей (сопротивлений) образований верхней части разреза, но и их поляризуемости.

2.44. Поскольку импульсная модификация аэроэлектроразведки характеризуется меньшей (по сравнению с частотной аэроэлектроразведкой) зоной возбуждения, особенно при соосном расположении генераторного и измерительного диполей, с ее помощью возможно получение кондиционных материалов в масштабе 1:5 000 и мельче. Наиболее эффективным является использование метода для съемок масштаба 1:5 000 ÷ 1:10 000 при детальных поисках и оценке объектов, характеризующихся повышенной проводимостью и/или поляризуемостью.

### *«Пассивные» методы*

2.45. К числу «пассивных» относятся методы аэроэлектроразведки, работающие без специальных источников электромагнитного поля: основанные на измерении естественного электромагнитного (магнитотеллурического) поля Земли либо использующие излучение специальных сверхдлинноволновых радиостанций (СДВР, [14]).

2.46. Магнитотеллурические методы разведки не требуют использования специальных дорогостоящих источников электромагнитного поля и характеризуются большой глубиной исследований (до  $1 \div 1,5$  км). Однако при этом они не обеспечивают пространственного разрешения, достаточного для решения задач поисков месторождений, и могут быть рекомендованы для использования главным образом при проведении среднемасштабных прогнозных работ.

2.47. Метод СДВР основан на регистрации электромагнитных полей широкоэмиттерных радиостанций различного назначения, например, российской системы радионавигации РСДН-20, различных радиосигналов точного времени и т.п. Измерения ведутся преимущественно в дальней зоне источника. Основные проблемы использования СДВР: зависимость результатов измерений от расположения и мощности источника поля, непредсказуемый режим работы радиостанций и возможность экранирования сигналов естественными преградами при работах в районах со сложнорасчлененным рельефом.

2.48. Целесообразность включения пассивных методов аэроэлектроразведки в состав аэрогеофизического комплекса должна быть обоснована результатами физико-математического моделирования и экспериментальными измерениями, подтверждающими наличие на площади работ устойчивого сигнала первичного поля необходимой мощности.

### **Вспомогательное оборудование**

2.49. При выполнении аэрогеофизической съемки в состав бортового оборудования дополнительно включаются:

- навигационное оборудование (приемник спутниковой навигационной системы и, при необходимости, элементы инерциальной навигации);
- радиовысотомер;
- бортовой компьютер с программой, обеспечивающей проводку ВС по линиям маршрутов и регистрацию данных основного и вспомогательного оборудования;
- барометр и термометр (при использовании в аэрогеофизическом комплексе аэрогамма-спектрометра).

2.50. Данные навигационной системы используются в реальном времени при пилотировании авианосителя, а в режиме постобработки – для уточнения/определения координат точек измерения (в аэрогравиметрии кроме того – при вычислении/учете возмущающих ускорений и поправки Этвеша).

2.51. Навигационный блок базируется на использовании спутниковых навигационных приемников совмещенного созвездия GPS + ГЛОНАСС (в перспективе – только ГЛОНАСС) и должен обеспечивать определение координат точек измерения геофизических полей, включая высоту над эллипсоидом (геоидом), в реальном времени с точностью не хуже  $\pm 5-10$  м, с частотой не менее 10 Гц.

2.52. Антенна навигационной системы жестко крепится на борту воздушного судна. Место и способ крепления на борту ЛА фиксируется специальными установочными чертежами, утвержденными в установленном порядке. При работе с выпускной системой возможно использование дополнительной антенны, размещающейся в выпускной гондоле, для определения ее координат.

2.53. Радиовысотомер должен обеспечивать измерение высот в диапазоне 0÷500 метров с погрешностью  $\pm 1$  метр в интервале 0÷30 метров и  $\pm 6$  % в интервале 30÷200 метров, с частотой до 10 Гц.

#### **Наземное обеспечение**

2.54. В состав наземного оборудования включается магнитовариационная станция (станции, МВС), базовая навигационная станция (станции) и полевой вычислительный комплекс (ПВК).

2.55. МВС должна обеспечивать запись вариаций модуля полного вектора индукции магнитного поля во время выполнения съемочных полетов и контрольно-настроечных операций с чувствительностью не хуже 0,01 нТл и дискретностью не менее 1 измерения в секунду. Для этих целей может использоваться магнитометр, аналогичный бортовому, либо специально разработанная для измерения вариаций аппаратура. Используемые для регистрации вариаций измерительные средства должны быть сертифицированы в установленном порядке (см. 4.3).

2.56. Базовая навигационная станция используется для уточнения координат точек измерения геофизических полей методом дифференциальной коррекции навигационных данных в режиме постобработки. Обычно используется навигационная система, аналогичная бортовой.

2.57. ПВК используется для записи, обработки и архивирования данных бортового и наземного оборудования, контроля кондиционности съемки в соответствии с требованиями ТЗ и для первичной полевой обработки данных.

### **3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ**

#### **Основания для выполнения работ**

3.1. Основанием для проектирования аэрогеофизических съемок служит техническое (геологическое) задание (ТЗ), являющееся неотъемлемой частью контракта на выполнение работ, либо конкурсное ТЗ в составе документов конкурса на выполнение подобного рода работ, объявленного в установленном порядке.

3.2. В соответствии с требованиями действующих нормативных документов, включая Воздушный кодекс РФ [7], постановления Правительства РФ от 11.03.2010 № 138 «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» и от 03.02.2020 № 74 «О внесении изменений в Федеральные правила ИВП», выполнение всех внетрассовых полетов должно быть согласовано с Генеральным штабом Вооруженных сил (ГШВС) Российской Федерации.

3.3. До начала полевых аэрогеофизических работ организация – исполнитель этих работ направляет в адрес Национального центра управления обороной РФ ГШВС запрос о получении разрешения на полеты.

3.4. После получения ответа (директивы) из ГШВС разрешение на полеты согласовывается со службами, указанными в директиве. После получения ответа из всех указанных служб номера этих разрешений передаются в авиакомпанию, которая будет обеспечивать аэросъемку воздушными судами, для согласования с центрами управления полетами.

3.5. Если на исследуемой площади есть зоны, запрещенные для проведения полетов, то эти участки исключаются из общей площади съемки. Из общей площади работ также исключаются площади природных заповедников, на которых запрещены полеты на малых высотах, и площади акваторий, полеты над которыми запрещены для используемого типа ВС по условиям безопасности. Окончательно контур исследуемой площади формируется с учетом всех перечисленных выше факторов.

#### **Выбор комплекса методов**

3.6. Аэрогеофизический комплекс должен представлять собой геологически, методически и экономически обоснованное сочетание аэрогеофизических методов, направленных на эффективное решение геологических задач, поставленных перед планируемыми работами. Перечень поставленных перед аэрогеофизическими работами геологических задач определяется на основе анализа всего спектра доступной ретроспективной геологической информации об особенностях геологического строения изучаемой территории, включая сведения о физических свойствах пород и руд, материалы ранее проведенных аэрогеофизических съемок, физико-геологические модели известных минерагенических таксонов соответствующего ранга.

3.7. Выводы о применимости отдельных геофизических методов и их сочетаний делаются с учетом данных об особенностях строения территории, включая сведения о степени закрытости местности, развития рыхлого покрова и кор выветривания, о рельефе местности и обводненности и т.п., и должны быть подтверждены результатами физико-геологического моделирования (см. 6.6).

3.8. При выполнении работ на региональном этапе (работы общегеологического и минерагенического назначения [20]) многоцелевой характер опережающих аэрогеофизических работ определяет целесообразность максимального расширения комплекса аэрогеофизических методов.

3.9. При выполнении съемок повышенного пространственного разрешения, направленных на поиски месторождений, возможно использование двух альтернативных подходов: последовательное картирование косвенных факторов контроля оруденения и непосредственная локализация целевого объекта. Первый подход эффективен при поисках малоконтрастного оруденения в случае отсутствия выраженных физических границ у целевого объекта (большинство типов коренных месторождений золота; россыпи; месторождения, связанные с убогой сульфидной минерализацией; месторождения, локализованные в зоне гипергенеза и т.п.). Второй подход применим для объектов, характеризующихся значимым контрастом физических свойств и вследствие этого сопровождающихся изолированными аномалиями геофизических полей (медно-никелевые месторождения, скарново-магнетитовые объекты, коренные месторождения алмазов и т.п.).

3.10. При поисках малоконтрастного оруденения целесообразно максимальное расширение комплекса используемых аэрогеофизических методов. При поисках контрастно проявленных объектов в составе комплекса выделяется ведущий метод, направленный на непосредственную локализацию целевого объекта, и вспомогательные методы, способствующие более надежному и достоверному выделению и оценке параметров объекта.

3.11. При планировании работ, направленных на поиски месторождений, в зависимости от особенностей строения территории могут использоваться как первый, так и второй из указанных подходов, но может оказаться целесообразным использование их в сочетании. В любом случае обоснование выбранного подхода должно основываться на результатах физико-математического моделирования, выполненного с использованием доступной априорной геолого-геофизической информации (см. 6.6).

#### **Методика съемки**

3.12. Контур площади аэрогеофизических работ определяется Техническим (геологическим) заданием, где указываются географические координаты углов участка с учетом возможных изъятий (см. 3.5).

3.13. Выбор масштаба аэрогеофизической съемки осуществляется исходя из минимальных предполагаемых размеров целевого объекта, состава и особенностей поставленных геологических задач, а также особенностей технологий последующей обработки и интерпретации аэрогеофизических данных (см. 1.20).

3.14. Площадная аэрогеофизическая съемка выполняется по сети прямолинейных встречно-параллельных маршрутов (рабочие, или рядовые маршруты (РМ)), равномерно расположенных на всей площади исследуемого участка, причем каждый рядовой маршрут должен иметь минимум два пересечения с опорными маршрутами (см. 3.18). Начинать и завершать РМ необходимо за контуром площади. Как правило, съемка выполняется с генеральным обтеканием рельефа местности, если иное не предусмотрено требованиями ТЗ. Расстояние между РМ должно составлять 1 см в масштабе съемки, т.е. для съемки масштаба 1:50 000 оно будет равно 500 м, для 1:25 000 – 250 м и т.д.

3.15. РМ прокладываются вкрест простирания основных геологических структур. Если участок работ имеет сложное геологическое строение со структурами и аномалиями разного простирания, то маршруты должны иметь направление, не совпадающее ни с одним из простираний или совпадающее с наименьшим их числом.

3.16. Требуемая высота полетов при аэрогеофизической съемке указывается в ТЗ на выполнение работ. Как правило, выбирается минимально безопасная высота полета. При полетах с выпускной системой заданная высота должна быть увеличена на длину трос-кабеля. Под заданной высотой полета понимается высота полета ЛА над рельефом, которую пилот стремится обеспечить, основываясь на показаниях радиовысотомера.

3.17. На некоторых участках в условиях резко расчлененного горного рельефа возможно превышение высоты полета над заданной. В этом случае при использовании аэрогамма-спектрометрии необходимо выполнение дополнительных маршрутов вдоль протяженных прямолинейных участков узких врезов (долин) на заданной высоте, если такие съемки не противоречат правилам безопасности полетов. Такие маршруты выполняются без выпуска gondoly. Объем дополнительных аэрогамма-спектрометрических маршрутов обосновывается в проектно-сметной документации по результатам анализа рельефа площади работ.

3.18. Для увязки аэрогеофизических данных выполняют съемку на опорных маршрутах (ОМ), ортогональных рядовым. Расстояние между ОМ обычно в 10 раз превышает расстояние между РМ. При работе в сложных условиях (высокие широты, сложнорасчлененный рельеф, высокие возмущающие ускорения ЛА и т.п.) возможно сгущение сети ОМ в 2 – 2,5 раза. ОМ выполняются идентичной аппаратурой и на такой же высоте, что и РМ. Требования к опорным маршрутам аналогичны требованиям, предъявляемым к маршрутам рядовой съемки. ОМ прокладываются с учетом конфигурации изучаемой площади, включая изъятия (запрещенные для полетов участки, заповедники и т.п.).

3.19. При необходимости увязки результатов съемок, выполненных через большой интервал времени (например, в разные годы) и с разной аппаратурой, а также на отдельных замкнутых полигонах, выполняют съемку на связующих маршрутах (СМ). СМ должны быть проложены таким образом, чтобы обеспечить статистически представительное число точек пересечения с ОМ и РМ каждого полигона (не менее 50). Требования к связующим маршрутам аналогичны требованиям, предъявляемым к маршрутам рядовой съемки.

3.20. При проведении съемки выполняются повторные маршруты (ПМ), необходимые для определения точности гамма-спектрометрической и электроразведочной съемки, а также для предварительной оценки качества аэрогравиметрической съемки. ПМ могут быть дополнительно использованы для увязки данных. ПМ должны быть равномерно разнесены по времени работ и по площади изучаемого участка и выполняться аналогичной аппаратурой и на той же высоте, что и основные маршруты. Общая протяженность ПМ должна составлять  $3 \div 5$  % от длины РМ.

3.21. Для оценки качества выполненной аэромагнитной съемки используются секущие (диагональные) маршруты (ДМ), по возможности пересекающие все ОМ и РМ. Поскольку желательно, чтобы ДМ пересекали все области, различающиеся магнитной обстановкой (как спокойные, так и градиентные магнитные поля), они не обязательно должны быть

прямолинейными. В остальном ДМ должны быть во всех отношениях подобны РМ, т.е. выполняться на высоте рядовой съемки с той же технологией пространственной плановой привязки.

3.22. При выполнении аэрогамма-спектрометрической съемки для контроля качества измерений и оценки влияния сезонного изменения влажности почв и вариаций атмосферной составляющей фона используются измерения на радиометрическом контрольном маршруте (РКМ) длиной не менее 8 км, которые выполняются в начале и в конце каждого вылета. По возможности РКМ должен быть расположен в сходных ландшафтно-геологических условиях с основной площадью работ.

3.23. До начала полевых аэрогеофизических работ составляется схема проектных (заданных) линий полета (ЗЛП) в масштабе, указанном в ТЗ. На схему ЗЛП должны быть нанесены все планируемые виды маршрутов съемки (РМ, ОМ, ПМ, ДМ, при наличии – СМ).

### **Выбор оптимального авианосителя**

3.24. Выбор оптимального для конкретных условий съемки авианосителя из числа пилотируемых и беспилотных ЛА осуществляется с учетом следующих факторов:

- состав комплекса планируемых к использованию геофизических методов;
- ландшафтно-географические условия площади работ (абсолютные высотные отметки, изрезанность и градиенты рельефа);
- размеры площади и необходимое пространственное разрешение съемки;
- наличие и удаленность от площади работ доступных к использованию аэропортов базирования;
- летно-технические характеристики ЛА и его конструктивные особенности;
- наличие избыточной мощности бортовых источников электроэнергии для питания съемочной аппаратуры;
- возможность установки дополнительных антенн, специальной аппаратуры, выносных и выпускных устройств;
- возможность эксплуатации ВС с грунтовых и временных аэродромов и посадочных площадок.

3.25. Выбор авианосителя подразумевает также определение способа размещения измерительных систем на борту (в салоне, жесткое крепление к фюзеляжу, на внешней подвеске) и точек подключения геофизического оборудования к бортовой сети. Установка и подключение оборудования выполняется на основании специальных установочных чертежей, разработанных для конкретного типа ЛА и утвержденных в установленном порядке (для серийной авиационной техники).

3.26. В салоне ЛА размещаются измерительные системы и их элементы, критичные к условиям эксплуатации (температура, давление) и обладающие значительными весом и энергопотреблением (аэрогравиметры, аэрогамма-спектрометры, блоки электроники аэромагнитных и аэроэлектроразведочных модулей). Измерительные системы или их элементы, подверженные воздействию бортовых систем ЛА, размещаются снаружи. Они могут быть прикреплены к фюзеляжу (часто в специальном боксе – стингере) либо размещаться в специальной выпускной гондоле, буксируемой за ЛА на трос-кабеле. Для обеспечения безопасности при взлете и посадке в этом случае ЛА должен быть снабжен

лебедкой для выпуска гондолы и специальным причальным устройством для ее фиксации перед началом и при завершении съемки (кроме случаев буксирования вертолетом на внешней подвеске).

3.27. Наиболее полный комплекс измерений геофизических полей можно реализовать, используя в качестве носителя традиционные (серийные) самолеты или вертолеты. При этом принимается во внимание, что вертолетная съемка при прочих равных условиях обходится дороже самолетной (выше стоимость одного летного часа). В связи с этим вертолетные носители используются как правило при съемке в горах, на сложном рельефе, а также при необходимости использования систем, буксируемых на подвеске.

3.28. При съемке площадей небольшого размера использование традиционных авианосителей может оказаться нерентабельным (за счет резкого роста доли организационно-технических затрат, включая затраты на перелет ЛА к месту работ и обратно, оборудование/разоборудование борта и контрольно-настроечные операции). Кроме того, с ними затруднительно выполнять съемки повышенной детальности (менее 50 м между маршрутами) из-за большой скорости ЛА. В этом случае в качестве альтернативы можно рассматривать съемки с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

3.29. Съемки с использованием беспилотных авианосителей обладают существенной спецификой и требуют применения специальных методических приемов и способов их выполнения, которые могут быть закреплены в специально разработанном методическом документе.

3.30. В качестве определенной альтернативы традиционным авианосителям и БПЛА можно рассматривать использование сверхлегких пилотируемых летательных аппаратов. Они легко транспортируются, обходятся без специально оборудованной взлетно-посадочной полосы, весьма маневренны и способны находиться в воздухе без дозаправки до 5 часов.

## 4. ПРОИЗВОДСТВО СЪЕМКИ

### Подготовительный этап

4.1. На этапе подготовки к аэрогеофизической съемке выполняется весь объем работ, связанный с проектированием (см. п. 3), включая составление в установленном порядке проектно-сметной документации; поверку и калибровку средств измерения, предназначенных к использованию при съемке; монтаж оборудования на борт авианосителя (см. 1.28); пробный вылет для подтверждения работоспособности комплекса, по результатам которого составляется Акт готовности к съемочным работам.

4.2. К работам по метрологическому обеспечению средств измерения, используемых в бортовом и наземном измерительных комплексах, относятся их поверка и калибровка, выполняемые специализированными предприятиями, имеющими соответствующую аккредитацию.

4.3. До начала работ (на подготовительном этапе) выполняются необходимые операции по калибровке аэромагнитометров, магнитовариационных станций, аэрогравиметров, аэрогамма-спектрометров, датчиков аэроэлектроразведочной аппаратуры и поверке приемников спутниковой бортовой и базовой навигационных систем. Результатами этих работ являются:

- сертификаты калибровки аэромагнитометров и наземных вариационных станций;
- сертификаты калибровки (протокол поверки) аэрогравиметров;
- сертификаты калибровки датчиков аэроэлектроразведочной аппаратуры;
- сертификаты калибровки аэрогамма-спектрометров;
- свидетельства о поверке приемников спутниковой навигационной системы.

Продолжением работ по метрологическому обеспечению бортового и наземного оборудования является выполнение специалистами, осуществляющими аэрогеофизическую съемку, контрольно-настроечных операций, включающих операции градуировки средств измерения (см. 4.8 – 4.16).

4.4. Монтаж оборудования на борту авианосителя осуществляется в соответствии с установочными чертежами, утвержденными в установленном порядке (для серийной авиационной техники). Для проверки работоспособности бортового комплекса, выявления и устранения взаимного влияния его составляющих, а также возможного влияния бортовых систем авианосителя на измерения выполняется пробный вылет. По его результатам составляется Акт готовности к съемочным работам, который подписывается ответственным исполнителем работ, представителем Заказчика, утверждается директором предприятия – исполнителя и является основанием для перебазирования программно-аппаратного комплекса и персонала к месту выполнения полевых работ и/или начала их организации и выполнения.

### Полевые работы

#### *Установка наземного оборудования*

4.5. В состав комплекса наземного аппаратно-программного обеспечения работ входят полевой обрабатывающий вычислительный комплекс (ПВК), служащий для оценки качества

результатов измерений, первичной обработки и архивации данных; магнитовариационные (МВС) и базовые навигационные станции.

4.6. МВС устанавливаются вдали от источников техногенных помех, в спокойном магнитном поле. Количество МВС и места их установки выбираются таким образом, чтобы по возможности обеспечить расстояние до любой точки измерения магнитного поля не более 150 км. В целях оперативного мониторинга магнитной обстановки и выявления периодов «магнитных бурь», во время которых аэромагнитная съемка не осуществляется, показания по крайней мере одной из МВС должны непрерывно контролироваться либо визуально, либо по имеющимся каналам связи.

4.7. Базовая навигационная станция устанавливается в месте, обеспечивающем стабильный прием сигнала навигационных спутников. Целесообразно совмещать точки расположения МВС и базовых навигационных станций.

#### *Контрольно-настроечные операции*

4.8. Контрольно-настроечные операции выполняются специалистами, проводящими съемочные работы, с целью градуировки аппаратуры, оценки и списания влияния на результаты измерений внешних воздействий и т.п. Состав и порядок выполнения контрольно-настроечных операций регламентируется имеющимися нормативными документами [3, 19, 22] и руководствами по эксплуатации используемых средств измерения.

4.9. До начала аэромагнитной съемки выполняются работы по оценке и списанию влияния авианосителя на результаты измерений (девиационной помехи). Для уменьшения влияния аномальных вертикальных и горизонтальных градиентов магнитного поля Земли выполнение этих настроечных операций проводится над участками со спокойным магнитным полем и/или на большом удалении от земной поверхности (до 2000 – 3000 метров). При работе с выпускной системой выполняется полет по системе прямолинейных маршрутов разных азимутов, проложенных через выбранную в спокойном магнитном поле точку («звездочка»). При жестком креплении датчика магнитометра на борту ЛА списание девиации выполняется с использованием данных специального трехкомпонентного феррозондового магнитометра (см. 2.7, 2.8) по результатам полетов с моделированием всех элементов пилотирования (крены, тангажи, рыскания) для рабочих курсов.

4.10. При выполнении аэрогравиметрической съемки допускается использование только навигационного оборудования, сертифицированного для применения на территории Российской Федерации (внесенные в Государственный реестр средств измерений). Эталонирование аэрогравиметров выполняется методом наклона в заводских условиях (на заводе – изготовителе).

4.11. 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 съемочным работам. Начало съемочных работ возможно лишь после обработки и оценки качества полученных материалов. Проверка готовности гравиметра к работе выполняется в соответствии с требованиями [1]. Состав, последовательность операций и методика действий по контролю цены деления гравиметра определены в [22].

4.12. При работе с компенсационным гравиметром каждые  $1 \div 2$  месяца выполняется автокалибровка гравиметрического комплекса в соответствии с инструкцией производителя аппаратуры [1]. При обнаружении в ходе ежедневного контроля систематического ухода параметров гироскопов от номинальных значений выполняется внеплановая автокалибровка гравиметрического комплекса.

4.13. До начала аэрогамма-спектрометрической съемки выполняются работы по проверке работоспособности и градуировке аэрогамма-спектрометра, в состав которых входят:

- оценка вклада собственного гамма-излучения авианосителя и гамма-излучения космического происхождения посредством измерений над акваторией (глубиной не менее 2 метров) на нескольких высотах, охватывающих диапазон изменения абсолютных отметок в районе работ, с дискретностью 500 метров; допускается (при отсутствии акватории необходимых размеров) выполнение измерений над земной поверхностью начиная с высоты  $\sim 800$  метров; время накопления гамма-квантов для детектора с общим объемом кристаллов 32 литра должно составлять  $3 \div 5$  минут на каждой высоте;
- учет эффекта комптоновского рассеяния гамма-квантов (определение спектральных коэффициентов) путем измерения над радиоактивными источниками (моноэлементными радиоактивными моделями) с размерами, обеспечивающими получение спектра, максимально близкого к спектру однородного полупространства (например,  $1 \times 1 \times 0,3$  метра);
- повысотная съемка в интервале высот от 60 до 240 метров с интервалом  $20 \div 40$  метров для оценки корректности приведения результатов к земной поверхности;
- определение коэффициентов чувствительности (градуировка аэрогамма-спектрометра в единицах содержаний естественных радионуклидов и значений мощности экспозиционной дозы) посредством выполнения измерений на полигонных участках или с использованием насыщенных моделей;
- оценка вариаций атмосферной составляющей остаточного фона гамма-излучения.

4.14. В аэроэлектроразведке контрольно-настроечные операции заключаются в компенсации проводящих свойств авианосителя (осуществляется настроечный компенсационный полет, по данным которого определяются параметры компенсации). Указанная процедура должна выполняться в начале и конце съемочного вылета. Высота, на которой проводятся контрольно-настроечные операции, должна быть не менее 500 метров над участками с обычным геоэлектрическим разрезом и не менее 800 метров над участками с предельно низкими удельными электрическими сопротивлениями.

4.15. Настроечный компенсационный полет осуществляется по прямолинейному маршруту, сбор данных производится в течение 3 – 10 минут.

4.16. Градуировка радиовысотомера выполняется до начала полевых работ на основе расчета коэффициентов линейной регрессии по данным радиовысотомера, которые получены при пролетах на заданных высотах над гладкой горизонтальной поверхностью (взлетной полосой, водной поверхностью), и значениям высоты, полученным по спутниковым данным, из которых была вычтена высота поверхности над уровнем моря.

### *Предполетная подготовка экипажа и оборудования*

4.17. В ходе предполетной подготовки выполняется подготовка полетного задания, ввод его в память бортового компьютера для использования бортовой программой и ознакомление экипажа ЛА с планом работ на день.

#### *Съемочные полеты*

4.18. Решение о вылете для выполнения съемки принимается ответственным исполнителем аэрогеофизических работ совместно с командиром воздушного судна с учетом сведений о метеорологической и геомагнитной обстановке. Съемка на рядовых, опорных, секущих, повторных и связующих маршрутах, а также РКМ выполняется в соответствии с изложенным ранее (см. 3.14 – 3.22).

4.19. Для оценки точности определения местоположения авианосителя и измерительных датчиков, расположенных в выпускной гондоле, осуществляется непрерывная запись координат на стоянке длительностью не менее 6 часов (для гарантированной смены созвездия спутников, включаемых в обработку), с одновременной записью координат на базовой навигационной станции.

4.20. При завершении съемочного вылета осуществляется копирование полного объема информации, полученной за вылет, в архив полевого вычислительного комплекса. Одновременно выполняется архивация данных с наземного оборудования (базовых наземных станций). Если в силу объективных причин ежедневная передача информации с удаленных базовых станций невозможна, допускается передача данных, накопленных за определенный период, но не реже, чем раз в месяц.

#### *Текущий контроль качества*

##### Контроль качества пилотирования

4.21. Фактическая линия полета не должна отклоняться по проложению от проектной более чем на 50 % от межмаршрутного расстояния на отрезке протяженностью больше расстояния между опорными маршрутами, если это не вызвано требованиями безопасности полета (например, облет препятствия). Маршруты или участки маршрутов, не удовлетворяющие этому требованию, бракуются и должны быть пройдены повторно.

4.22. Фактическая высота полета контролируется в процессе работ по показаниям радиовысотомера. Если фактическая высота полета превышает заданную более чем на 35 метров и длина этой части равняется либо превышает расстояние между опорными маршрутами, данные участки должны быть пройдены повторно. Если выполнение этого требования невозможно вследствие резкой расчлененности рельефа местности, выполняется съемка специальных дополнительных маршрутов (см. 3.17).

##### Контроль качества аэромагнитной съемки

4.23. Качество измерений магнитного поля определяется уровнем внутренних шумов магнитометра, который оценивается величиной четвертых разностей, вычисляемой по формуле (1):

$$F.D. = X_{t-2} - 4X_{t-1} + 6X_t - 4X_{t+1} + X_{t+2}, \quad (1)$$

где  $F.D.$  – вычисляемое значение четвертых разностей;  $X$  обозначает измеренные значения для пяти последовательных измерений магнитного поля (нТл, от  $t-2$  до  $t+2$ );  $t$  – номер точки маршрута, в которой вычисляется  $F.D.$

Данные считаются некондиционными, если абсолютные значения четвертых разностей превышают 1,6 нТл для более чем 10 % измерений в течение 60 секунд, или при потере более чем 10 % измерений в течение 60 секунд.

4.24. Вариации магнитного поля, фиксируемые на базовой магнитовариационной станции, не должны отклоняться более чем на 2,5 нТл от линейной хорды, построенной на любом отрезке протяженностью 30 секунд.

#### Контроль качества аэрогравиметрии

4.25. Для учета смещения нуль-пункта гравиметров выполняется запись показаний гравиметрических датчиков в течение 40 ÷ 45 минут на стоянке ВС при выключенных двигателях до и после каждого вылета. В это время не допускается движение внутри салона.

4.26. Контроль качества аэрогравиметрических измерений осуществляется в рамках оперативной обработки данных, которая проводится в аэропорту базирования после каждого рабочего вылета и предназначена для оценки качества текущих материалов, своевременного выявления возможных неисправностей аппаратного комплекса, отклонения реальных параметров съемки от проектных. Обработка включает в себя следующие основные процедуры:

- контроль целостности файлов с аэрогравиметрическими данными (AIR-файлы);
- контроль целостности файлов со спутниковой информацией (JPS-файлы);
- контроль синхронизации времени GPS и шкалы времени в G-файлах (бинарных файлах, содержащих записи показаний гравиметра);
- определение координат, скорости и ускорения самолета при помощи фазовых измерений GPS в стандартном режиме;
- оценку позиционных, скоростных, угловых ошибок инерциальной навигационной системы и угловых ошибок построения приборной вертикали для компенсационных гравиметров;
- контроль возможных сбоя в показаниях гравиметров;
- контроль смещения нуль-пунктов гравиметров.

4.27. Основаниями для отбраковки материала и повторного пролета по маршруту (или по части маршрута) являются:

- количество спутников, используемых в решении на маршруте, меньше 5;
- отсутствуют данные базовых станций или количество спутников, сигнал которых принимается на борту ЛА, меньше 5;
- для компенсационных гравиметров – угловые ошибки построения вертикали в рейсе более  $0,1^\circ$ ;
- стандартное отклонение вертикальных ускорений на маршруте более  $0,4 \text{ м/с}^2$ ;
- скорость смещения нуль-пункта более  $0,3 \text{ мГал/ч}$ ;
- стандарт невязки при расчете аномалий силы тяжести вдоль линии маршрута (параметр Residual, [21]) на маршруте при фильтрации 100 секунд больше 2500.

### Контроль качества аэрогамма-спектрометрии

4.28. Контроль настройки энергетической шкалы спектрометра проводят по положению пиков естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ). Они должны соответствовать табличным значениям с точностью до 1 канала (для спектра, приведенного к 256 каналам). Для контроля чувствительности спектрометра и определения необходимости повторного выполнения настроечных операций осуществляются измерения с ториевой моделью, размещенной на расстоянии не менее 40 см от центра каждого блока детектора. Это обеспечивает достаточное облучение кристаллов блока детектора. Аналогичные измерения проводят с фоновой моделью. Скорости счета в окне Th не должны отличаться более чем на 5 % от средних значений, полученных при предыдущих градуировках. В противном случае калибровка повторяется.

4.29. Контроль разрешающей способности спектрометра осуществляется ежедневно по характеристическим пикам излучения  $^{208}\text{Tl}$  (2,61 МэВ) или  $^{137}\text{Cs}$  (0,662 МэВ). Разрешение оценивается по спектрам, накопленным на маршруте либо на стоянке, и должно быть не хуже 5,5 % для линии тория и 9 % для цезия. Если разрешение превышает более чем на 1 % значение, измеренное в начале съемочных работ, съемка приостанавливается до устранения проблемы.

4.30. Измерения на радиометрическом контрольном маршруте (см. 3.22) выполняют в начале и в конце каждого вылета на средней рабочей высоте. По возможности РКМ должен быть расположен в аналогичных ландшафтно-геологических условиях по отношению к основной площади работ. РКМ служит для контроля качества АГС-измерений, оценки влияния сезонного изменения влажности почв и учета вариаций атмосферной составляющей фона. После учета «мертвого» времени, фона и высоты средняя скорость счета в окне Th над контрольным маршрутом должна быть в пределах  $10 \div 15$  % от средней скорости счета в окне Th в течение всех предыдущих вылетов с учетом сезонного тренда. В противном случае работы должны быть приостановлены до выяснения источника проблемы и его устранения.

4.31. Стабильность энергетического спектра контролируется путем построения средних спектров для каждого маршрута, показывающих фактические положения фотопиков K и Th относительно их допустимых положений в спектре. При съемке, где время прохождения маршрута менее 600 с (для 32-литровых спектрометров), спектры накапливаются более одного маршрута.

### Контроль качества аэроэлектроразведки

4.32. Контроль работоспособности аэроэлектроразведочной аппаратуры при выполнении съемочных работ выполняется пятью видами тестов.

- 1) Тест при включении аппаратуры на земле. Контролируются основные параметры для каждой из частот (времен задержки): таблица контрольных параметров в бортовой программе сбора и управления просматривается и сравнивается с нормативными значениями для данного экземпляра аппаратуры. После запуска двигателя и при переходе на бортовое питание данный вид контроля повторяется.
- 2) Оценка глубины подавления влияния электропроводных элементов авианосителя на этапе калибровки (см. 4.14 – 4.15) с одновременной визуальной оценкой величины и характера шумов и выяснения их природы (атмосферные либо аппаратурные).

- 3) Контроль воспроизводимости измерений на контрольном маршруте (опционально). Оцениваются форма и значения сигнала на графиках откликов по всем рабочим частотам (временам) на маршруте с известным (путем многократных проходов) полем.
- 4) Контроль данных при выполнении съемки на рабочих маршрутах. Если в процессе проведения работ оператор с течением времени отметит нарушения компенсации сигналов на приемнике, выражающиеся в сильном влиянии откликов на эволюции или прогрессирующем росте среднечастотных и низкочастотных помех, необходимо незамедлительно прервать съемку и выполнить внеочередную калибровку.
- 5) Оценка количества и кодов флагов ошибок, выдаваемых системой сбора аэрогеофизических данных в ходе полета (при наличии).

#### *Текущая отчетность*

4.33. В процессе работ инженером по аппаратуре ведется бортовой журнал, в котором, помимо всей необходимой информации о выполненных работах (времени взлета-посадки, номерах и количестве пройденных маршрутов, составе и результатах контрольно-настроечных операций и др.), фиксируются особенности поведения элементов комплекса и возникающие нештатные ситуации, а также условия выполнения работ (метеоданные).

4.34. Ежедневно вся бортовая информация (навигационные и геофизические данные, данные регистрации информации дополнительного оборудования и др.), информация с наземных магнитовариационных и базовых навигационных станций, а также борт-донесения передаются ответственному исполнителю работ для последующей записи на цифровые носители в составе полевого архива ПВК. Для пополняемого полевого архива обязательно создание резервной копии на независимых носителях.

4.35. Вся перечисленная информация в полном объеме должна регулярно передаваться уполномоченному представителю Заказчика в заранее оговоренных форматах для текущего контроля качества съемки (супервайзинга) с периодичностью, указанной в ТЗ на выполнение работ, но не реже одного раза в месяц.

#### *Полевая обработка материалов*

4.36. Текущая (полевая) обработка аэрогеофизических данных выполняется по завершении каждого вылета с целью контроля работоспособности бортового аппаратно-программного комплекса и наземного оборудования, а также для оценки качества полученной информации. На основании полученных результатов принимаются оперативные решения о дальнейшем выполнении аэрогеофизической съемки: продолжение работ в соответствии с планом; повторный пролет по участкам съемки, забракованной по тем или иным причинам; приостановка съемки для перенастройки аппаратуры и др.

4.37. Полевая обработка полученных данных выполняется после каждого вылета и в качестве обязательных включает в себя следующие процедуры:

- передача бортовых данных и данных с наземного оборудования в состав полевого архива и создание резервной копии указанных материалов (см. 4.20 и 4.34);
- текущий контроль качества полученной информации (см. 4.21 – 4.32);
- построение пополняемых карт фактических линий полетов (ФЛП) и измеренных геофизических полей;

- составление файла донесений о результатах работ за день с указанием объемов и видов выполненных работ, результатов контрольно-настроечных операций, возникавших нештатных ситуаций и т.п. Допускается ведение файла донесений в виде пополняемой таблицы согласованной с Заказчиком формы.

#### **Завершение полевых работ**

4.38. Полевые работы считаются завершенными после выполнения съемки в полном объеме, включая рядовые, опорные и контрольные маршруты, при отсутствии обоснованных (в соответствии с требованиями ТЗ) претензий со стороны Заказчика к объему и качеству выполненных работ.

4.39. По завершении работ составляется специальный Акт о выполнении полного объема работ в соответствии с требованиями ТЗ, который подписывается ответственным исполнителем работ, представителем Заказчика (в случае его присутствия в месте проведения полевых работ) и утверждается руководителем предприятия – исполнителем.

4.40. Основным результатом выполненных полевых работ является база данных в форме каталога, содержащего значения всех параметров, измеренных бортовым и наземным оборудованием, и результаты полевой обработки данных. С учетом различной дискретности регистрации измерений аэрогеофизических систем допускается представление отдельных баз данных по каждому из включенных в комплекс аэрогеофизических методов.

4.41. К каталогу в обязательном порядке прилагаются файл с описанием технологии съемки (координаты углов участка, сроки выполнения работ, места базирования полевого отряда и наземных базовых станций), файлы донесений, акты готовности к полевым работам и завершения полевых работ.

## 5. КАМЕРАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

### Камеральная обработка данных

5.1. Камеральная обработка данных частично может выполняться во время проведения полевых работ (предварительная обработка) на базе полевой партии или на базе предприятия (при наличии возможности оперативной передачи данных с места полевых работ), но, как правило, осуществляется на базе предприятия после возвращения полевой партии.

5.2. Целью камеральной обработки аэрогеофизических данных является учет влияния всех возможных внешних факторов на результаты измерения геофизических полей для получения их пространственного распределения, связанного исключительно с особенностями строения верхней части разреза Земли. Камеральная обработка данных выполняется отдельно для каждого компонента аэрогеофизического комплекса.

5.3. Обработка навигационных данных включает следующие процедуры.

- 1) Дифференциальная коррекция координат авианосителя и датчиков, обеспечивающих измерения аэрогеофизических данных, в т.ч. размещенных в выпускной гондоле. Дифференциальная коррекция координат осуществляется в автоматическом режиме с использованием специализированного программного обеспечения, в т.ч. рекомендованного фирмой – изготовителем навигационного оборудования.
- 2) Вычисление относительных превышений рельефа местности как разности между показаниями радиовысотомера и абсолютными отметками точек измерений над геоидом (эллипсоидом) по данным навигационной системы.

5.4. Обработка аэромагнитных данных подразумевает выполнение следующих операций.

- 1) Учет влияния авианосителя на результаты измерения магнитного поля (списание девиации), для чего используются результаты специального калибровочного вылета (см. 4.9). При установке датчика магнитометра в выпускной гондоле влияние авианосителя обычно находится в пределах погрешности измерений и специального учета не требует. Если значение девиации превышает погрешность измерений, то необходим ее учет в зависимости от азимута полета. При использовании жесткого крепления датчика магнитометра учет девиации выполняется с использованием специализированного программного обеспечения по показаниям трехкомпонентного феррозондового магнитометра (см. 2.7, 4.9).
- 2) Ввод поправки за вариации магнитного поля по данным одной или нескольких наземных вариационных станций.
- 3) Ввод поправки за нормальное поле Земли с вычислением аномального магнитного поля с использованием ближайшей к срокам выполнения работ модели нормального поля Земли IGRF (международного геомагнитного аналитического поля). Поправка вводится в каждую точку наблюдений с учетом ее высоты над поверхностью геоида (эллипсоида), получаемой из навигационных данных.

5.5. Обработка аэрогравиметрических данных выполняется с использованием упомянутого ранее специализированного программного комплекса (см. 5.3 и [21]) и включает следующие процедуры.

- 1) Обработка навигационных данных и данных инерциальной системы с целью получения информации о вертикальных и горизонтальных возмущающих ускорениях, действующих на измерительную систему при съемке. 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.
- 2) Расчет аномалий силы тяжести вдоль съемочного профиля [21, 22]. На этом этапе обработки учитывается масштабный коэффициент гравиметра и вычисляются все необходимые поправки (за вертикальные ускорения чувствительного элемента, горизонтальные ускорения, нормальное поле, поправка за свободный воздух, поправка Этвеша, учет сползания нуля-пункта гравиметра). Поскольку полученное решение 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 (60 ÷ 120 секунд).
- 3) Вычисление притяжения топографических масс и аномалий в топографической редукции (аномалий Буге), причем учет рельефа местности осуществляется в радиусе 200 км [22].
- 4) Увязка маршрутов по полевой опорной сети, заключающаяся в приведении рядовых маршрутов к единому уровню. Выполняется с помощью полевой опорной сети после учета притяжения топографических масс по методике ВИРГ, предложенной для аэромагнитной съемки [13].
- 5) Пересчет профильных аномалий в равномерную сеть с исключением остаточных влияний возмущающих ускорений летательного аппарата, не полностью учтенных при профильной обработке (выполняется с помощью специально разработанных технологий статистического уравнивания [22] или с использованием истокообразных аппроксимаций).

Методика обработки аэрогравиметрических данных, используемая в настоящее время, детально описана в [22].

5.6. Обработка данных аэрогамма-спектрометрии основывается главным образом на результатах калибровок, выполняемых перед началом и в ходе полевых работ, и включает следующие процедуры.

- 1) Ввод поправки за «мертвое» («живое») время, заключающейся в учете инерционности измерительного тракта (в то время как один импульс обрабатывается, все остальные входящие импульсы автоматически отклоняются). Общее время регистрации уменьшается на время, затрачиваемое на обработку всех импульсов («мертвое время»), а время, в течение которого спектрометр принимает входящие импульсы, является «живым» временем. Таким образом, «мертвое» время является разницей между временем накопления измерения и «живым» временем. Поправка обычно мала (5 ÷ 15 мкс/импульс), но может быть значимой в областях с высокой радиоактивностью.

- 2) Ввод поправок за собственное гамма-излучение воздушного судна и гамма-излучение космического происхождения, определяемые по результатам специального калибровочного вылета (см. 4.13).
- 3) Учет взаимного вклада излучения естественных радионуклидов, которое проявляется при обработке данных с использованием значений накопленного излучения в дифференциальных окнах характерных пиков калия, тория и урана. Так, гамма-кванты с высокой энергией (2,61 МэВ), связанные с радиоактивным распадом тория, потеряв энергию за счет комптоновского рассеяния, могут быть зарегистрированы в окне урана (1,66 ÷ 186 МэВ) или калия (1,36 ÷ 1,56 МэВ). Выполняется через расчет спектральных коэффициентов по результатам регистрации спектра на моноэлементных моделях с высокими концентрациями естественных радионуклидов (урана, тория, калия, см. 4.13), включая фоновую модель.
- 4) Учет поглощения гамма-излучения воздухом (поправка за высоту) с использованием коэффициентов затухания гамма-излучения в разных диапазонах спектра. Допускается использование коэффициентов затухания, приведенных в справочной литературе (см., например, [15]).
- 5) Учет вариаций атмосферной составляющей остаточного фона (атмосферного радона) в каналах урана и мощности дозы суммарного гамма-излучения с использованием специального «атмосферного» детектора (см. 2.26) либо по результатам анализа спектра.
- 6) Вычисление содержаний естественных радионуклидов и мощности дозы суммарного гамма-излучения с использованием коэффициентов чувствительности, полученных по результатам эталонирования спектрометра на специальном полигоне. Допускается использование коэффициентов чувствительности, предоставленных фирмой – изготовителем аппаратуры.

5.7. Обработка данных частотной аэроэлектроразведки включает выполнение следующих процедур.

- 1) Зарегистрированные аэроэлектроразведочной системой первичные данные распаковываются специализированным программным обеспечением, поставляемым в комплекте аппаратуры, в соответствии с руководством по ее эксплуатации. Результатом этой процедуры являются файлы, содержащие служебную информацию (координаты точек измерений, время и т.п.) и такие параметры, как реальные и мнимые компоненты сигнала для всех рабочих частот, измеренные в трех ортогональных приемных катушках и излучающей петле. Зарегистрированные аэроэлектроразведочной системой первичные данные проходят процедуру математической компенсации влияния ВС с использованием результатов настроечного компенсационного полета (см. 4.14 – 4.15). При этом учитывается возможный дрейф фазы сигнала генератора и приемного тракта.
- 2) По данным, прошедшим процедуру компенсации, рассчитываются такие параметры, как отношение полуосей эллипса поляризации, сумма их квадратов и угол направления вектора большой полуоси эллипса поляризации, позволяющие проводить дальнейшую интерпретацию данных.
- 3) Полученные данные пересчитываются в эффективные параметры среды – эффективные удельные электрические сопротивления (или эффективные проводимости). Пересчет выполняется для каждой рабочей частоты по набору

палеток, связывающих значения удельных сопротивлений с эффективной высотой полета и величиной отношения малой полуоси эллипса поляризации к большой –  $H_b/H_a$  (или мнимой частью вертикальной компоненты сигнала –  $ImHz$ ). Значение эффективной высоты для установки ДИП-А представляет собой сумму текущей высоты генератора и высоты приемника над земной поверхностью. Расчет эффективных параметров должен выполняться для модели среды «однородное полупространство».

5.8. Обработка данных импульсной аэроэлектроразведки имеет ряд отличий (по сравнению с частотной модификацией) и предполагает выполнение следующих процедур.

- 1) Распаковка бортовых данных с использованием специализированного программного обеспечения, в ходе которой из потоковой записи данных извлекаются измеренные компоненты вторичного поля (вертикальная и горизонтальные) на всех временах задержки и с частотой регистрации измерительной системы.
- 2) Определение уровня шума электромагнитных данных, который рассчитывается как стандартное отклонение значений вертикальной компоненты вторичного поля  $dB/dt$  в последнем (наиболее позднем) временном канале.
- 3) С помощью комбинации специальных линейных и нелинейных фильтров выполняется обработка сигналов с устранением единичных выбросов, в т.ч. связанных с влиянием атмосферного электричества.
- 4) Осуществляется учет калибровок, выполненных во время компенсационного полета (см. 4.15), и последующее выравнивание измеренных компонент вторичного поля для всего полета с целью устранения остаточного и нелинейного дрейфа, который не был надлежащим образом удален во время его коррекции, а также учета переходного процесса самой системы.
- 5) Вычисляются эффективные параметры разреза (сопротивления или проводимости) для оговоренных в ТЗ времен регистрации (например, раннего, среднего, позднего либо всех) с учетом параметров установки, с использованием модели однородного полупространства.

5.9. После завершения камеральной обработки данных выполняется увязка данных, построение цифровых моделей геофизических полей и оценка качества съемки для каждого из методов, включенных в комплекс аэрогеофизических работ.

#### **Увязка данных**

5.10. После завершения камеральной обработки данных выполняется внутренняя увязка данных всех компонентов аэрогеофизического комплекса с использованием измерений на опорной сети. Увязке подлежат следующие данные.

- Для навигационных данных – значения относительных превышений рельефа местности (см. 5.3).
- Для аэромагнитной съемки – значения аномального магнитного поля, полученные после учета всех поправок (см. 5.4).
- Для аэрогравиметрии – значения аномалий силы тяжести в полной топографической редукции (редукции Буге) после ввода всех необходимых поправок и учета притяжения топографических масс (см. 5.5).

- Для аэрогамма-спектрометрии – вычисленные концентрации естественных радионуклидов (калия, тория и урана) и значения мощности дозы суммарного гамма-излучения.
- Для аэроэлектроразведки – значения эффективных параметров среды (сопротивлений или проводимостей), вычисленные для каждой частоты измерений для частотной модификации метода, либо для каждого времени задержки для его импульсной модификации.

5.11. Целью увязки данных является устранение остаточной «профильности» (аномалий, проявленных вдоль линии маршрутов). Увязка данных выполняется по методике ВИРГ, предложенной для аэромагнитной съемки [13], либо по другим методикам, имеющим достаточное обоснование.

5.12. Окончательная увязка аэрогравиметрических данных выполняется в процессе создания цифровых моделей поля силы тяжести (см. 5.5) совместно с исключением остаточных влияний возмущающих ускорений летательного аппарата, не полностью учтенных при профильной обработке.

5.13. После завершения увязки данных создаются предварительные цифровые модели геофизических полей с помощью алгоритмов интерполяции данных в узлы регулярной сети с формированием матрицы с размером ячейки, равным  $0,4 \div 0,5$  межмаршрутного расстояния (см. п. б). Указанные модели служат для построения отчетных карт геофизических полей и создаются для всех составляющих, перечисленных в п. 5.10. Остаточные «невязки», присутствующие в моделях геофизических полей, могут быть устранены с использованием специальных алгоритмов микроуравнивания.

5.14. Для гравитационного поля должна быть представлена модель (модели) поля силы тяжести в полной топографической редукции (редукции Буге) с оговоренными в ТЗ плотностями промежуточного слоя.

#### **Оценка качества результатов аэрогеофизической съемки**

5.15. Оценка качества результатов проведенной аэрогеофизической съемки осуществляется по результатам специально выполненных контрольных измерений после завершения камеральной обработки и увязки данных и различается для каждого из методов, включенных в состав аэрогеофизического комплекса.

5.16. Качество навигационного обеспечения работ оценивается точностью определения координат авианосителя (выпускной гондолы). Точность определяется как радиус круга, в который вписываются все измерения координат соответствующего датчика, выполненные на стоянке авианосителя в течение не менее чем 30 минут, после их дифференциальной коррекции. Оценка выполняется отдельно для горизонтальных (северная и восточная составляющие) и вертикальной (высота над эллипсоидом / геоидом) координат.

5.17. Оценка качества аэромагнитной съемки выполняется по точкам пересечения специально выполненных секущих (диагональных) маршрутов (ДМ) с рядовыми (РМ). Качество характеризуется величиной среднеквадратической погрешности ( $m_1$ ) [13], вычисляемой по формуле (2):

$$m_1 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2(n-1)}}, \quad (2)$$

где  $m_1$  – среднеквадратическая погрешность (в нТл);  $\delta_i$  – разность значений модуля полного вектора аномального магнитного поля  $(\Delta T)_a$  в  $i$ -ой точке пересечения (в нТл),  $n$  – число точек, причем  $n$  должно быть не менее 50 [13].

Для вычислений обычно используются участки спокойного магнитного поля, в пределах которых его горизонтальный градиент не превышает 50 нТл/км. В случае, если площадь работ характеризуется значительной изменчивостью аномального магнитного поля, допускается раздельное вычисление погрешности для участков со спокойным и относительно высокоградиентным полем (например, для градиента меньше 50 нТл/км, в интервалах 50 ÷ 100 нТл/км и 100 ÷ 200 нТл/км). Требуемая (максимально допустимая) величина среднеквадратической погрешности аэромагнитной съемки обычно указывается в ТЗ.

5.18. Качество аэрогравиметрической съемки определяется тремя характеристиками: погрешностями измерений на маршрутах –  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , и погрешностью построения итоговых карт аномалий силы тяжести –  $\varepsilon_3$  [22]. Погрешности  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  включают в себя остаточные возмущающие ускорения, которые в дальнейшем исключаются из результатов съемки при построении сетей. Поэтому обе эти величины (или любая из них), характеризуя главным образом условия съемки, могут использоваться только для предварительной оценки качества работ. Погрешность  $\varepsilon_3$  принимается в качестве итоговой оценки качества съемки. Эта величина учитывает все погрешности съемки и аналогична (хотя и не полностью идентична) «полной погрешности интерполяции» для наземных съемок.

Погрешность измерений  $\varepsilon_1$  оценивается в точках пересечения рядовых маршрутов (РМ) с опорными (ОМ) после обработки данных и их увязки. Вычисление погрешности осуществляется по формуле (3) [22]:

$$\varepsilon_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \delta_i^2}{N-n}}, \quad (3)$$

где:  $\varepsilon_{1,2}$  – соответствующая погрешность (в мГал);  $\delta_i$  – отклонение  $i$ -го измеренного значения от среднего (в мГал);  $N$  – общее число измерений;  $n$  – число пунктов измерений.

Если в какой-либо точке пересечения маршрутов разность аномалий имеет недопустимо большое значение в массиве других измерений, эта точка может быть исключена из процедуры оценки погрешности  $\varepsilon_1$ . Число отбракованных точек не должно превышать 2 %.

Погрешность  $\varepsilon_2$  оценивается по измерениям, выполненным на повторных маршрутах, после обработки полученных данных специальной программой [21]. Для вычисления погрешности  $\varepsilon_2$  используется формула (3). Повторные маршруты выполняются в одном направлении, 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. При значительном удалении съемки от аэропорта базирования допускается использование трассы подлета самолета к площади работ в качестве повторного маршрута.

Погрешность измерений  $\varepsilon_3$  вычисляется по двум независимым моделям поля силы тяжести, полученным в процессе его обработки (в качестве примера приведем матрицы одинаковой размерности, построенные отдельно по четным и нечетным маршрутам, см. [22]). Для вычислений используется формула (3), которая, с учетом методики измерений, преобразуется к виду (4):

$$\varepsilon_3 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_{li}^2}{2n}}, \quad (4)$$

где:  $\varepsilon_3$  – значение погрешности (в мГал);  $\delta_i$  – отклонение  $i$ -го измеренного значения от среднего (в мГал);  $n$  – число пунктов измерений.

Требуемые (максимально допустимые) величины погрешностей аэрогравиметрической съемки указываются в ТЗ. В последние годы при выполнении среднемасштабных съемок (1:50 000 ÷ 1:25 000)  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , как правило, не превышают 1 мГал, а  $\varepsilon_3$  – 0,5 мГал.

5.19. Качество аэрогамма-спектрометрических данных оценивается значениями среднеквадратических погрешностей определения концентраций естественных радионуклидов (калия, тория и урана) и мощности дозы суммарного гамма-излучения по результатам измерения на повторных маршрутах (ПМ). Для вычислений используется следующая формула (5):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_1 - x_2)^2}{2n}}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – погрешность определения МЭД и содержаний РЭ,  $x_1, x_2$  – измерения в точке на РМ и ПМ,  $n$  – количество точек с двукратными измерениями.

Вычисляемая погрешность гамма-спектрометрических измерений зависит от средних содержаний РЭ на повторных маршрутах. В ТЗ на проведение работ обычно указывается, для какого диапазона измеряемых величин должны обеспечиваться заданные точностные параметры. Как правило, они отвечают уровню относительной погрешности в 10 %. Например,  $\sigma = \pm 0,5$  мкР/час при среднем уровне МЭД  $\leq 5$  мкР/ч; для тория  $\sigma = \pm 0,7 \cdot 10^{-4} \%$  при содержаниях этого элемента  $\leq 7 \cdot 10^{-4} \%$ ; для урана  $\sigma = \pm 0,4 \cdot 10^{-4} \%$  при содержаниях  $\leq 4 \cdot 10^{-4} \%$ ; для калия  $\sigma = \pm 0,15 \%$  при содержаниях  $\leq 1,5 \%$ .

5.20. Оценка качества аэроэлектроразведочной съемки осуществляется по результатам измерений на повторных маршрутах. При этом по формуле (6) вычисляется величина средней относительной погрешности определения эффективных сопротивлений для повторных измерений на каждой из частот (каждом из времен задержки):

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_{1i} - x_{2i}}{\frac{1}{2}(x_{1i} + x_{2i})} \cdot 100\% \quad (6)$$

где  $\delta$  – средняя относительная погрешность (в %);  $x_{1i}$  и  $x_{2i}$  – логарифмы эффективных сопротивлений в  $i$ -ой точке на рядовом и повторном маршрутах соответственно;  $n$  – число повторных измерений.

Требуемая средняя относительная погрешность аэроэлектроразведочных измерений указывается в ТЗ на проведение работ и обычно не превышает 12 % для каждой из рабочих частот (каждого времени задержки).

## **6. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ СЪЕМОК**

6.1. Неотъемлемой и важнейшей составной частью комплексных аэрогеофизических съемок является их содержательная интерпретация. Под интерпретацией здесь понимается извлечение геологической информации из аэрогеофизических данных.

6.2. Полнота и достоверность интерпретации аэрогеофизических данных может быть обеспечена только при условии использования самых современных технологий их анализа и с учетом всего спектра доступной априорной геолого-геофизической информации. В связи с этим к интерпретации данных целесообразно привлечение геологов, непосредственно работающих на объектах изучаемого типа.

6.3. Основой успешного проведения комплексных аэрогеофизических съемок и последующей интерпретации их результатов является физико-геологическое моделирование целевого объекта и вмещающей геологической среды.

### **Физико-геологическое моделирование целевого объекта**

6.4. Физико-геологическое моделирование является основой при обосновании и выборе комплекса аэрогеофизических методов, элементов методики съемки, приемов и способов комплексного анализа и интерпретации полученных материалов.

6.5. Под физико-геологической моделью (ФГМ) понимается обобщенное и формализованное представление об основных геологических и физических характеристиках изучаемого геологического объекта и его вмещающей среды, максимально приближенное к реальным условиям и соответствующее фундаментальным знаниям об объекте [5]. Основными составляющими ФГМ таким образом являются геологическая модель, петрофизические данные и модели физических полей.

6.6. Формирование физико-геологической модели целевого геологического объекта выполняется в следующей последовательности [18]:

- постановка геологической задачи;
- выбор объекта моделирования с учетом ранга целевого объекта (см. 1.12) и построение априорной геологической модели;
- обобщение петрофизических параметров моделируемого объекта и его вмещающей среды; построение петрофизической модели и выделение на ее основе структурно-вещественных комплексов. Под термином структурно-вещественные комплексы (СВК) понимают совокупность геологических образований, объединенных по одному или нескольким физическим свойствам, которая наделена соответствующими «эффективными» физическими характеристиками [6];
- построение моделей физических полей целевого объекта в реальных условиях залегания;
- оценка соответствия сформированной ФГМ реальному объекту на эталонах, т.е. на объектах, аналогичных исследуемому, но с известным геологическим строением.

6.7. Построение предварительной (априорной) геологической модели осуществляется на основе анализа и обобщения априорной геологической информации об объекте исследований. Для определения и ранжирования факторов локализации целевого объекта

(см. 1.14) целесообразно использование прогнозно-поисковых моделей, разработанных с учетом рудно-формационного типа и ранга целевого объекта (см., например, [16]).

6.8. Построение петрофизической модели с выделением полного набора СВК по каждому из геофизических параметров, изучаемых при съемке, базируется на сборе и обобщении априорной информации о физических свойствах пород и руд изучаемого района работ. При дефиците информации такого рода допускается использование данных с сопредельных территорий, а также площадей с доказанным сходством геологического строения и минерагенической специализации.

6.9. Модели физических полей получают, как правило, расчетным способом на основе решения прямой задачи для методов, включенных в аэрогеофизический комплекс. Модели учитывают данные о геометрии и свойствах целевого объекта и вмещающей среды, полученных при их геологическом и петрофизическом моделировании. При создании моделей физических полей особое внимание должно быть уделено возможным влияниям на результаты измерений помех техногенного и природного происхождения с учетом ландшафтно-географических особенностей и степени техногенной нагрузки на исследуемой площади. Допускается использование результатов натурного (результаты измерений геофизических полей над аналогичными объектами) и физического (имитационного) моделирования.

6.10. По своему назначению различаются априорные ФГМ, используемые для проектирования работ, и апостериорные ФГМ, являющиеся результатом комплексного анализа аэрогеофизических данных. Апостериорные модели служат основой для последующей геологической интерпретации материалов, надежность, достоверность и качество которой напрямую зависят в том числе от адекватности выбранных технологий и методов анализа данных.

### **Методы и технологии анализа данных**

6.11. Надежность и достоверность интерпретации комплексных аэрогеофизических данных определяется выбранным графом их обработки (последовательностью процедур и операций), включающим набор методов и технологий анализа материалов. Граф обработки аэрогеофизических данных может включать методы создания, трансформации и визуализации цифровых моделей геофизических полей; технологии вероятностно-статистического анализа данных, включая методы многомерного анализа; технологии, основанные на использовании алгоритмов прямого физико-математического моделирования, в т.ч. основанные на методах подбора и автоматизированного решения обратной задачи (инверсии геофизических полей); технологии распознавания образов, в т.ч. основанные на методах машинного обучения, и др.

6.12. При формировании графа обработки комплексных аэрогеофизических данных необходимо учитывать, что любой метод анализа материалов базируется на определенных модельных представлениях (системе упрощений и допущений), накладывающих известные ограничения на область их применения. Недоучет этого фактора с попыткой использования результатов вычислений за рамками модельных ограничений может вызвать значительные ошибки при геологическом истолковании результатов реализации формальных математических процедур.

6.13. Для обработки и последующего анализа используются аэрогеофизические данные, представленные в форме каталогов, которые являются основным результатом выполненной аэрогеофизической съемки (см. 4.40), содержат значения всех параметров, измеренных бортовыми средствами и средствами наземного оборудования, и включают результаты полевой обработки данных.

6.14. Измеряемые геофизические поля характеризуются сложностью морфологии, связанной с суперпозицией (сложением) эффектов от множества геологических объектов, что затрудняет идентификацию последних. Для упрощения их обнаружения целесообразно использовать разделение сложных полей на более простые компоненты посредством подавления влияния аномальных объектов одной природы и подчеркивания других. Указанная цель достигается выбором способов формирования цифровых моделей геофизических полей и их последующей визуализации, включая технологии линейного преобразования геофизических полей (т. н. трансформации).

#### *Создание цифровых моделей измеренных геофизических полей*

6.15. В соответствии с требованиями регламентирующих документов прошлых лет [12, 13, 14, 25] основной и обязательной формой представления результатов геофизических съемок являются карты графиков и изолиний соответствующих геофизических полей. С учетом возможностей современных компьютерных технологий визуализации данных, позволяющих существенно повысить информативность восприятия карт, такие традиционные способы представления данных целесообразно дополнять альтернативными вариантами (светотеневой рельеф с изменяемыми углами подсветки, 3D-визуализация, синтетические изображения многоканальных данных и другие способы).

6.16. Поскольку разные способы визуализации подчеркивают особенности поля, отражающие различные элементы геологического строения, то единственным исчерпывающим способом представления итоговых результатов аэрогеофизических работ являются цифровые модели геофизических полей.

6.17. Для методов, результаты измерений в которых в процессе первичной обработки пересчитываются в эффективные параметры нижнего полупространства (аэрогамма-спектрометрия, аэроэлектроразведка), используется представление данных в виде матрицы в узлах регулярной сети. В этом случае результаты работ будут представлять собой карту распределения вычисляемых параметров на дневной поверхности (или заданном уровне отнесения для аэроэлектроразведки).

6.18. Для аэромагнитной и аэрогравиметрической съемок, выполненных с огибанием рельефа, корректной формой представления результатов является каталог с координатами реальных точек наблюдений, в котором представлены данные после выполнения всех необходимых коррекций (см. п. 5). Для удобства вычисления трансформант допустимо также представление исходных данных в форме матрицы при условии явного определения физической поверхности, к которой относятся измерения.

6.19. В состав цифровых моделей геофизических полей входят их трансформации, получаемые из исходных полей посредством их линейного преобразования. Под трансформациями понимают такие преобразования исходных полей, которые выполняются с использованием операции свертки [4].

6.20. Вычисление трансформант может осуществляться как с использованием метода скользящего окна, так и в спектральной области. В этом случае спектр Фурье трансформанты определяется как произведение спектра Фурье исходного поля и частотной характеристики трансформации; для получения матрицы трансформанты выполняется обратное преобразование Фурье для вычисленного произведения [23].

6.21. Метод скользящего окна используется для данных, представленных в узлах регулярной сети (матрицы). Вычисление трансформант в спектральной области предпочтительнее для данных, представленных в форме каталога (в узлах нерегулярной сети), с учетом высоты над эллипсоидом (геоидом). В этом случае используется полное преобразование Фурье. Частотные характеристики основных видов трансформаций представлены в [23].

6.22. По способу преобразования анализируемых полей трансформации делятся на три группы [4]:

- 1) Технологии сглаживания полей, использующиеся главным образом для подавления помех, связанных со случайными погрешностями измерений и влиянием неоднородностей верхней части разреза.
- 2) Технологии аналитического продолжения полей на заданный уровень в верхнее (дает возможность сгладить помехи, подавить локальные аномалии и выделить региональные) или нижнее (для выделения локальных аномалий на фоне региональных) полупространство.
- 3) Технологии вычисления высших производных, применяющиеся в основном для выделения локальных аномалий.

Возможно использование комбинаций трансформаций из различных групп (аналитическое продолжение вверх с вычислением горизонтального или вертикального градиента, сглаживание с последующим аналитическим продолжением вниз и т.п.).

6.23. Практическая реализация трансформаций в скользящих окнах предполагает, что преобразования выполняются с полем, заданным в узлах равномерной сети на горизонтальной поверхности. При наличии сложнорасчлененного рельефа и (или) использовании алгоритмов интерполяции для пересчета данных в узлы регулярной сети формальное использование трансформант неизбежно порождает ложные аномалии (артефакты), что необходимо учитывать при последующем анализе данных.

6.24. Использование для последующего анализа и геологической интерпретации трансформант геофизических полей может быть эффективным лишь в тех случаях, когда они носят целевой характер, т.е. вид и параметры трансформаций специально подобраны для решения конкретной геологической задачи.

#### *Физико-математическое моделирование геофизических полей*

6.25. Физико-математическое моделирование геофизических полей предназначено для определения характеристик (геометрия и свойства) объектов в нижнем полупространстве по результатам анализа распределения полей в верхнем полупространстве. Моделирование выполняется отдельно для каждого компонента аэрогеофизического комплекса с учетом их физико-математических особенностей. Различается «тотальное» моделирование, при котором определяется распределение эффективных параметров среды в заданном слое

нижнего полупространства либо в проекции на заданную поверхность (например, дневной рельеф), и локальное моделирование, при котором определяются геометрия и свойства объектов, создающих изолированные геофизические аномалии.

6.26. Ландшафтные особенности площади работ (в первую очередь расчлененный рельеф) влекут за собой значительную изменчивость высоты измерений как в абсолютных значениях, так и над дневной поверхностью. Влияние этого фактора на результаты аэроэлектроразведки и аэрогамма-спектрометрии в основном нивелируется за счет приведения измерений к уровню дневной поверхности (см. 5.6 – 5.8). Морфология же гравитационного и магнитного полей определяется сложной суперпозицией эффектов от аномальных объектов в нижнем полупространстве, изменений высоты точек наблюдения (вертикальный градиент) и форм рельефа, сложенных образованиями с различными свойствами, что может затруднить геологическую интерпретацию данных.

6.27. Физико-математическое моделирование гравитационного и магнитного полей заключается в решении обратной задачи для них в линейной (определение свойств) или нелинейной (определение геометрии, [4]) постановке. Поскольку обратные задачи геофизики в общем случае не имеют единственного решения, при моделировании гравитационного и магнитного полей целесообразно использовать классы моделей, для которых теоретически доказана единственность решения обратной задачи (горизонтальный слой с латеральным изменением свойств, компактные объекты звездной формы с однородной плотностью (намагниченностью) и т.п.). При этом необходимо следить, чтобы геологическое истолкование полученных результатов оставалось в рамках принятых модельных представлений.

6.28. По структуре алгоритмы моделирования гравитационного и магнитного полей подразделяются на три группы:

- 1) Определение пространственного распределения эффективных параметров (плотности или магнитной восприимчивости / намагниченности) на заданной поверхности в предположении отсутствия вертикальной изменчивости физических свойств.
- 2) Определение пространственного распределения эффективных параметров в заданном слое.
- 3) Количественная интерпретация изолированных аномалий с определением геометрии, свойств и/или условий залегания (глубина верхней и нижней кромок, наклон и т.п.).

6.29. Распределение эффективных параметров на заданной поверхности вычисляется посредством решения линейной обратной задачи (инверсия поля).

6.30. Для определения пространственного распределения эффективных параметров в слое, ограниченном двумя контактными поверхностями (могут быть горизонтальными либо конформными реальным субгоризонтальным физическим границам), применяются методы, основанные на использовании технологии «интерпретационной томографии» [11] либо на решении линейной обратной задачи (инверсия поля).

6.31. Для количественной интерпретации изолированных аномалий может быть использован широкий спектр технологий, включая методы локализации особых точек,

методы итерационного подбора (включая интерактивный), автоматизированного решения обратных задач в линейной и нелинейной постановке.

6.32. Выбор конкретной технологии (алгоритма) моделирования должен быть основан на результатах анализа особенностей геологического строения и данных о физических свойствах пород и руд района работ. Поскольку при использовании инверсии геофизических полей есть вероятность получения так называемого гармонического решения, удовлетворительного в математическом смысле, но не отвечающего реальным обстоятельствам (см. [4]), полученные результаты необходимо верифицировать. Верификация осуществляется, например, посредством комплексного использования альтернативных методов моделирования или наложением ограничений на определяемые параметры на основании априорной информации.

6.33. Моделирование данных аэроэлектроразведки выполняется с учетом того, что в результате первичной обработки ее данные на каждой частоте (времени задержки) представляются в виде эффективных параметров (сопротивление или проводимость) нижнего полупространства. Причем значения параметра, вычисленные для каждой частоты, характеризуют слой от поверхности до максимальной глубины проникновения электромагнитного поля (скин-слой). Это открывает возможности для разделения характеристик электрической проводимости разреза по глубине с использованием аппарата регрессионного анализа, а также построения объемной модели эффективных параметров.

6.34. Для моделирования изолированных аномалий электромагнитного поля, полученных при использовании импульсной модификации аэроэлектроразведки, возможно применение технологий инверсии, реализованных в настоящее время в 1D-, 2D- и 3D-вариантах. В этом случае необходимо соблюдать требования, изложенные в п. 6.32.

6.35. Вследствие весьма малой длины свободного пробега гамма-квантов в веществе метод аэрогамма-спектрометрии практически не обладает глубинностью и характеризует содержания естественных радионуклидов и радиоактивность самой верхней части разреза. В связи с этим моделирование данных аэрогамма-спектрометрии заключается в радиогеохимическом районировании территории с определением радиогеохимической специализации отдельных участков, индикаторных отношений радионуклидов, доли вклада отдельных составляющих в суммарное поле радиоактивности и т.п.

#### *Многомерный анализ данных*

6.36. При геологической интерпретации комплексных аэрогеофизических данных можно столкнуться с проблемой слишком большой размерности исходного набора данных, что затрудняет принятие обоснованного решения, с одной стороны, в условиях неопределенности, а с другой – в условиях информационных перегрузок.

6.37. В указанных обстоятельствах большое значение имеют методы преобразования признакового пространства, позволяющие достичь следующих целей.

- 1) Формирование признаков, наиболее информативных по отношению к факторам локализации целевого объекта (включая сам объект при благоприятных обстоятельствах), в т.ч. многомерных.
- 2) Сокращение общего числа признаков без потери полезной информации (т.е. выбор наиболее информативных признаков).

3) Обеспечение по возможности статистической независимости наиболее информативных признаков.

6.38. Новые многомерные признаки могут быть сформированы посредством вычисления разного рода комбинаций параметров (индикаторные отношения радионуклидов в гамма-спектрометрии, фактор металлопроводности или металл-фактор в аэроэлектроразведке и др.), а также использованием различных классификационных алгоритмов, выполняющих интерактивную или автоматизированную классификацию данных.

6.39. При реализации классификационных алгоритмов залогом их эффективной работы является обеспечение единого уровня гипсометрической приуроченности используемого набора признаков, которое достигается в т.ч. вовлечением в обработку не исходных полей, а результатов их физико-математического моделирования, т.е. параметризованных моделей.

6.40. Сокращение общего числа признаков достигается использованием так называемых «методов снижения размерности» [2], к числу которых относятся метод главных компонент и факторный анализ. Указанные методы относятся к области прикладной статистики, предполагают, что анализируемые признаки представляют собой случайные величины с нормальным законом распределения, и эффективны только при выполнении этого условия. Если структура исходных данных не удовлетворяет этому критерию, необходимо применять предварительное нормализующее преобразование (например, логарифмирование исходных значений).

6.41. Определение статистически независимого набора признаков осуществляется по результатам анализа ковариационной матрицы признаков (парных коэффициентов взаимной корреляции). При этом признаки, характеризующиеся тесной взаимной корреляционной связью (коэффициент корреляции близок к 1), должны исключаться из рассмотрения.

#### *Методы распознавания образов*

6.42. При прогнозе и поисках слабоконтрастного оруденения важная роль принадлежит методам распознавания образов, позволяющим выделить участки, наиболее перспективные для локализации целевого объекта, и ранжировать их по степени перспективности.

6.43. В настоящее время для применения доступны технологии распознавания образов, основанные на использовании различных подходов: оптимальный прием, эвристические и вероятностно-статистические алгоритмы, методы машинного обучения и др. Во всех случаях наиболее важным является не выбранный алгоритм, а набор признаков, использованный для распознавания.

6.44. К числу алгоритмов оптимального приема в геофизике относится известный метод обратных вероятностей и его разновидности. Формально подобные алгоритмы можно отнести к классу технологий «решения обратных задач без решения прямых». Задача распознавания здесь решается в идеологии обратного фильтра: выполняется свертка измеренного сигнала с весовыми коэффициентами, равными значениям эталонного сигнала. Алгоритмы оптимального приема наиболее эффективны при прогнозе объектов, сопровождающихся выраженными (хотя, возможно, и слабыми) аномалиями характерной формы, например, при поисках коренных месторождений алмазов.

6.45. К числу эвристических алгоритмов распознавания образов относятся методы, в которых для определения информативности отдельных признаков и весовых коэффициентов, используемых при вычислении меры сходства с эталоном, применяется экспертная оценка. Преимуществом указанного подхода является возможность использования при прогнозировании эмпирических закономерностей, трудно поддающихся формализации. Главным недостатком является субъективность, т.е. зависимость результата от уровня подготовки, опыта и научных представлений эксперта, выполняющего оценку.

6.46. Вероятностно-статистические алгоритмы используют одноименные методы анализа, в частности – элементы теории оценки статистических гипотез. Такие технологии пригодны для совместного использования количественных, полуколичественных и качественных признаков и могут сохранять работоспособность в условиях неравномерной изученности территории разными методами.

### **Геологическая интерпретация результатов аэрогеофизических работ**

6.47. Геологическая интерпретация данных является важнейшей и неотъемлемой составной частью аэрогеофизического обеспечения комплексных аэрогеофизических съемок, нацеленных на прогноз и поиски месторождений твердых полезных ископаемых. Она базируется на комплексном анализе данных аэрогеофизических съемок, включая результаты целевых преобразований с помощью технологий, указанных в пп. 6.11 – 6.46.

6.48. Геологическая интерпретация должна быть направлена на решение следующих основных задач.

- 1) Картирование основных разрывных нарушений площади работ с определением их взаимоотношений, иерархии и, по возможности, кинематики, рудоконтролирующей и рудогенерирующей роли.
- 2) Картирование образований перекрывающего осадочного комплекса (включая русловые, склоновые и т.п. отложения) с оценкой их распространенности, мощности и (по возможности) вариаций состава.
- 3) Картирование осадочных, метаморфических и магматических комплексов пород, в т.ч. под наносами, в слепом и погребенном залегании.
- 4) Картирование зон развития наложенных процессов (гипергенных, гидротермально-метасоматических и других эпигенетических изменений) с дифференциацией по их характеру и оценкой рудоконтролирующей роли.
- 5) Картирование полей распространения радиоактивных элементов с определением путей их миграции и оценкой радиогеохимической специализации основных комплексов пород.
- 6) Выявление признаков и факторов локализации прогнозируемого или поискового объекта с выделением и ранжированием перспективных участков.

В зависимости от особенностей геологического строения изучаемой территории состав решаемых геологических задач может быть существенно конкретизирован и дополнен.

6.49. Корректность, адекватность и достоверность решения каждой из перечисленных выше задач должна быть обоснована аналитически и подтверждена результатами моделирования (возможно – натурного) и / или иллюстрациями.

6.50. Синтез результатов анализа, направленный на создание единой модели геологического строения территории, выполняется с использованием специальных систем,

предназначенных для сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственно привязанных данных – геоинформационных систем (ГИС). Конкретный вид используемой ГИС указывается в ТЗ на выполнение работ.

6.51. По итогам геологической интерпретации составляются:

- 1) Карта (схема) результатов геологической интерпретации с элементами прогноза, сопровождаемая соответствующими пояснениями, которая при необходимости может состоять из нескольких слоев (например, схема тектонического строения, схема структурно-вещественных комплексов, схема результатов прогноза и т.п.).
- 2) Рекомендации по составу, формам и способам проверки основных геологических выводов и заверки выделенных перспективных участков.

## 7. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ

7.1. По завершении работ представляется окончательный геологический отчет о результатах выполненных исследований, который должен быть составлен в соответствии с требованиями ТЗ и ГОСТ Р 53579-2009 [10]. Отчет включает картографическую информацию и пояснительную записку к ней как в твердых копиях (на бумаге), так и в электронной форме. В состав электронной версии отчета включаются:

- цифровые базы данных первичной бортовой информации и результатов ее обработки и интерпретации;
- ГИС-проект, содержащий весь спектр использованной априорной геолого-геофизической информации, данные промежуточной и окончательной обработки и моделирования аэрогеофизических материалов, результаты их интерпретации.

### Содержание отчета о результатах выполненных работ

7.2. По результатам выполненных работ представляются следующие материалы.

- 1) Комплект геофизических карт в масштабе и географической проекции, оговоренных в ТЗ (обычно – в проекции Гаусса-Крюгера в системе ГСК-2011), и в форме (способ визуализации и палитра, см. 6.15 – 6.16), по мнению исполнителей обеспечивающей наилучшую геологическую информативность. Карты представляются для компонентов, включенных в комплекс аэрогеофизических методов, из следующего списка:
  - карта относительных превышений цифровой модели рельефа;
  - карта аномального магнитного поля;
  - карта аномалий поля силы тяжести в редукции Буге с заданной в ТЗ плотностью промежуточного слоя;
  - карта мощности дозы суммарного гамма-излучения;
  - карта содержания калия;
  - карта содержания тория;
  - карта содержания урана;
  - карты эффективных сопротивлений (проводимостей) на рабочих частотах (обозначенных в ТЗ временах задержки).
- 2) Карты соответствующих трансформант геофизических полей (если их представление оговорено в ТЗ).
- 3) Карта (схема) результатов геологической интерпретации данных комплексных аэрогеофизических съемок с элементами прогноза, которая при необходимости может состоять из нескольких слоев (см. 6.51).
- 4) Пояснительная записка (текст отчета), составленная в соответствии с требованиями [10] и содержащая подробное описание методики и технологии выполненных аэрогеофизических съемок, методики и результатов геологической интерпретации данных, рекомендации по составу и очередности последующих заверочных работ.

7.3. В состав электронной версии отчета включаются цифровые версии перечисленных выше геофизических карт (в форматах представления, оговоренных в ТЗ); электронная версия текста геологического отчета, включая иллюстрации и графические приложения; результаты физико-геологического моделирования и обработки аэрогеофизических данных;

цифровые помаршрутные базы данных первичных и увязанных материалов комплексной аэрогеофизической съемки в следующем составе.

- 1) Для аэромагнитной съемки: структурированный массив данных маршрутных наблюдений (цифровых данных в текстовом формате), содержащий дату и время измерения; измеренное значение геодезических широты и долготы в заданной системе координат; вычисленные X- и Y-координаты в заданной прямоугольной системе координат; высоту датчика над рельефом; наблюденное магнитное поле; аномальное магнитное поле до и после увязки; магнитовариационные данные.
- 2) Для аэрогравиметрии: бортовые данные, содержащие данные чувствительного элемента гравиметра в виде бинарных файлов; данные горизонтальных акселерометров; данные гироинерциальной платформы (при наличии), используемые для оценки погрешности построения вертикали; показания датчиков углов X и Y карданова подвеса; параметр привязки к гринвичскому времени; данные спутниковой навигационной системы; наземные бинарные файлы, которые формируются и записываются на базовых навигационных станциях; каталог гравиметрических пунктов вдоль съемочных профилей в виде текстового файла; цифровая модель рельефа для расчета поправки за притяжение топографических масс.
- 3) Для аэрогамма-спектрометрии: база данных маршрутных наблюдений, содержащая дату вылета и GPS-время; «живое» время; координаты точек измерения, включая прямоугольные; высоту полета авианосителя над рельефом; атмосферное давление на высоте полета; температуру воздуха за бортом; скорости счета в дифференциальных каналах тория, урана и калия и в интегральном канале; скорость счета в канале космического излучения; содержания естественных радионуклидов, в т.ч. содержания урана после коррекции за влияние атмосферного радона; суммарную мощность гамма-излучения, в т.ч. после коррекции за влияние атмосферного радона; базу данных, содержащую полные измеренные энергетические спектры гамма-излучения; данные градуировок и контрольно-настроечных операций.
- 4) Для аэроэлектроразведки: база данных маршрутных наблюдений, содержащая дату вылета и GPS-время; координаты точек измерения, включая прямоугольные; высоту полета авианосителя над рельефом; канал флагов ошибок; первичные измеренные данные для каждой частоты (каждого времени задержки); значения логарифмов эффективных сопротивлений (проводимостей) до и после увязки для каждой частоты (каждого времени задержки).

#### **Сопровождающая информация**

7.4. Дополнительно к отчету прилагаются в электронной форме следующие данные.

- 1) Банк данных (в оговоренных в ТЗ форматах) картографической и фактографической информации, включающий первичные полевые данные, априорную геолого-геофизическую информацию, промежуточные и окончательные результаты обработки полевых материалов, общей геофизической интерпретации и интерпретационные схемы. Банк данных создается на электронных носителях. В корневой директории архива

помещается текстовый файл в ASCII-коде с полным описанием содержимого архива. Каждый элемент архива размещается в отдельной директории. При необходимости в состав архива включаются программные средства, позволяющие визуализировать данные и конвертировать их в альтернативные форматы.

- 2) Сводный ГИС-проект (в оговоренных в ТЗ форматах), составленный по результатам выполненных работ, с обязательным указанием системы координат (файл проекции). Слои проекта должны включать: фактическое расположение площади работ и маршрутов съемки; данные о геолого-геофизической изученности территории, задействованные при выполнении работ; основные элементы инфраструктуры площади; результаты интерпретации в форме отчетных карт; схему расположения перспективных участков, выделенных по результатам интерпретации данных и рекомендуемых для последующих работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационный гравиметр ГТ-2А. Руководство по эксплуатации (в 6 книгах). ЛОНХ 461529.001РЭ. – Москва, 2009.
2. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справочное издание. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
3. Асламов Ю.В., Бабаянц П.С., Глинский Н.А., Зубов Е.И., Мельников П.В. Методические рекомендации по проведению комплексных аэрогеофизических съемок. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2022. – 50 с. [https://vsegei.ru/ru/about/nrs/gphs/met\\_rec-aero.pdf](https://vsegei.ru/ru/about/nrs/gphs/met_rec-aero.pdf)
4. Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. – М.: МГРИ, 2012. – 232 с.
5. Бродовой В.В. Комплексование геофизических методов : Учебник для вузов. – М.: Недра, 1991. – 330 с.
6. Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Моделирование в разведочной геофизике. – М.: Недра, 1987. – 192 с.
7. Воздушный кодекс Российской Федерации. Федеральный закон от 19.03.1997 № 60-ФЗ (ред. от 14.03.2022) (с изм. и доп., вступ. в силу с 05.06.2022). <https://legalacts.ru/kodeks/Vozdushnyi-Kodeks-RF/>
8. Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, переработанное и дополненное / Главный редактор О.В. Петров. Т. 1. А – Й. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. – 432 с.
9. Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, переработанное и дополненное / Главный редактор О.В. Петров. Т. 2. К – П. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2011. – 480 с.
10. ГОСТ Р 53579-2009. Система стандартов в области геологического изучения недр (СОГИН). Отчет о геологическом изучении недр. (Общие требования к содержанию и оформлению). – М.: Стандартинформ, 2009. – 51 с.
11. Долгаль А.С., Шархимуллин А.Ф. О гравитационной томографии и путях ее дальнейшего развития // Вестник Пермского университета: Геология, 2009, вып. 11 (37). – С. 114 – 120.
12. Инструкция по гравиразведке. – М., 1980 г.
13. Инструкция по магниторазведке. – Л.: Недра, 1981. – 263 с.
14. Инструкция по электроразведке. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.
15. Коган Р.М., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Основы гамма-спектрометрии природных сред. – М., Энергоатомиздат, 1991. – 233 с.
16. Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. Выпуск «Медь» / Под ред. А.И.Кривцова. – М.: ЦНИГРИ, 2002. – 212 с.
17. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (второго издания). Версия 1.4. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2019. – 188 с.
18. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексование геофизических методов. Учебник для вузов. – М., ГНЦ РФ ВНИИГеосистем, 2012. – 346 с.

19. Паршин А.В., Цирель В.С., Ржевская А.К. Методические рекомендации по выполнению маловысотной аэромагнитной съемки. – М., ВИМС, 2018. – 32 с.
20. Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые). – М., Министерство природных ресурсов РФ, 2013. <https://docs.cntd.ru/document/902349871?marker=7DC0K7>
21. Программное обеспечение SR2MSU камеральной обработки данных для авиационного гравиметрического комплекса GT2A. – М., МГУ, 2009.
22. Рекомендации по выполнению аэрогравиметрической съемки для создания современной геофизической основы Госгеолкарты 1000/3 и Госгеолкарты 200/2. – М.: АО «ГНПП Аэрогеофизика», 2014. – 25 с.
23. Серкерев С.А. Гравиразведка и магниторазведка : Учебник для вузов. – М.: Недра, 1999. – 437 с.
24. Старостин В.И., Игнатов П.А. Геология полезных ископаемых. – М., Академический проект, 2020. – 512 с.
25. Техническая инструкция по аэрогамма-спектрометрической съемке. – М.: МГ СССР, 1977. – 221 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Протокол секции ресурсов и лицензирования твердых полезных ископаемых НТС  
Федерального Агентства по недропользованию от 25 января 2023 г. № 04-17/1-пр.

1

"УТВЕРЖДАЮ"

Председатель секции ресурсов и  
лицензирования твердых полезных  
ископаемых НТС Федерального агентства  
по недропользованию



А.А. Гермаханов

25 января 2023 г.



№ 04-17/1-пр  
от 25.01.2023

### ПРОТОКОЛ №

заседания секции ресурсов и лицензирования твердых полезных ископаемых  
научно-технического совета Федерального агентства по недропользованию  
по рассмотрению Методических рекомендаций по аэрогеофизическому  
сопровождению прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые,  
подготовленных и представленных Российским геологическим обществом (РОСГЕО)

**ЗАМЕСТИТЕЛЬ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ СЕКЦИИ НТС РОСНЕДРА:** А.В. Руднев,  
начальник Управления геологии твердых полезных ископаемых Федерального  
агентства по недропользованию

### ПРИСУТСТВОВАЛИ:

#### члены секции:

Шамов Д.С., заместитель начальника Управления геологии твердых полезных  
ископаемых - начальник отдела геологии твердых полезных ископаемых;  
Касымова Н.Г. - заместитель начальника отдела геологии твердых полезных  
ископаемых;  
Андросова Г.Б. – советник отдела геологии твердых полезных ископаемых;  
Казанов О.В. – генеральный директор ФГБУ «ВИМС»;  
Черных А.И. – генеральный директор ФГБУ «ЦНИГРИ».

### ПОВЕСТКА ДНЯ:

Рассмотрение Методических рекомендаций по аэрогеофизическому сопровождению  
прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые, подготовленных и  
представленных Российским геологическим обществом (РОСГЕО).

### СЕКЦИЯ ОТМЕЧАЕТ:

«Методические рекомендации по аэрогеофизическому сопровождению  
прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые» рассмотрены на  
заседании Научно-методического совета по твердым полезным ископаемым РОСГЕО  
(Протокол №1/22 от 07.12.2022) с учетом замечаний и предложений специалистов

ФГБУ «ЦНИГРИ», ФГБУ «ВИМС» и Норильского филиала ФГБУ «ВСЕГЕИ». Состав авторского коллектива, включая специалистов ГНПП «Аэрогеофизика», при составлении документа использовал опыт, достигнутый уровнем эффективности и качества работ ГНПП «Аэрогеофизика», Норильского филиала ФГБУ «ВСЕГЕИ», компании «Геотехнологии» и др., при выполнении аэрогеофизических съемок в составе геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые. Необходимость подготовки документа обусловлена современными экономическими условиями, изменившимися техническими характеристиками аппаратуры, необходимостью и целесообразностью комплексирования различных методов при прогнозировании и опoисковании перспективных на наличие полезных ископаемых площадей, особенно с учетом преимущественного смещения поисковых работ в труднодоступные регионы с поисками скрытого, неперfоверхностного орудения.

### СЕКЦИЯ РЕШИЛА

Отметить актуальность выполненной работы «Методические рекомендации по аэрогеофизическому сопровождению прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые».

Одобрить использование «Методических рекомендаций по аэрогеофизическому сопровождению прогнозных и поисковых работ на твердые полезные ископаемые» в качестве регламентирующего документа при проектировании и проведении прогнозных и поисковых работ, выполняемых за счет средств федерального бюджета и средств недропользователей.

Заместитель Председатель секции

А.В. Руднев

Ответственный секретарь

Д.С. Шамов