

Глинский Н.А., Мац Н.А., Пастор С.В.
(АО «Геологоразведка»)

АЭРОГЕОФИЗИКА: ОПЫТ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

*Приводятся общие сведения о становлении и развитии аэрогеофизических работ для геологического изучения и поисков месторождений полезных ископаемых. Рассмотрены основные методы воздушных съемок, их становление и развитие в российской и мировой практике. Анализируется состояние аппаратурного и технического обеспечения аэрогеофизических работ, тенденции развития комплексных аэрогеофизических исследований. Показаны определяющая роль российских специалистов и ученых в формировании этого направления и контуры будущего развития аэрогеофизических методов на базе беспилотных летательных аппаратов у нас в стране и мире. **Ключевые слова:** аэрогеофизический метод, магниторазведка, электроразведка, гамма-спектрометрия, гравиразведка, навигация, летательный аппарат.*

Glinskiy N.A., Mats N.A., Pastor S.V. (Geologorazvedka)
AEROGEOFIZIKA: EXPERIENCE AND THE TREND
OF DEVELOPMENT

*The general information about formation and development of aerogeophysical works for the geological study and the searches for the layers of minerals are given. Are examined the basic methods of aerial surveys, their formation and development in the Russian and world practice. The analysis of the state of the equipment and technical support of aerogeophysical works, trend of development of comprehensive aerogeophysical studies is given. The determining role of Russian specialists and scientists in the formation of this direction is shown. Are given the outlines of the future development of aerogeophysical methods in us in the country and peace on the base of unmanned flying vehicles. **Keywords:** aerogeophysical method, magnetic prospecting, electrical prospecting, gamma-spektrometriya, gravitational prospecting, navigation, flight vehicle.*

Более полувека в мировой геологической практике используются аэрогеофизические технологии с целью геокартирования, поисков месторождений полезных ископаемых и решения ряда специальных задач.

Сначала зародились аэромагнитометрические измерения, затем последовательно стали развиваться радиометрические, гамма-спектрометрические, аэроэлектроразведочные и аэрогравиметрические съемки, которые сегодня в разных вариантах являются основными видами аэрогеофизических работ.

За рубежом аэрометоды получили широкое развитие. Многочисленные компании занимаются как проведе-

нием аэрогеофизических работ, так и разработкой аппаратуры и соответствующего программного обеспечения. Процесс создания аппаратуры и методик аэроабот осуществляется планомерно, что в конечном итоге постоянно приводит к повышению качества и эффективности всех стадий геологоразведочных работ.

В настоящее время практика системных аэрогеофизических работ в нашей стране сокращается. Вместе с тем в условиях отсутствия развитой инфраструктуры и труднодоступности территорий аэрогеофизическое направление требует пристального внимания и дальнейшего развития.

АО «Геологоразведка» имеет многолетний опыт работ в этой области. За эти годы созданы аппаратурно-технические средства, методики работ и программные системы обработки и интерпретации аэрогеофизических данных, которые в настоящее время широко используются в отрасли. В составе предприятия функционирует отраслевой Центр по метрологии и сертификации геофизической аппаратуры, располагающий всеми необходимыми уникальными системами (мерами, стандартными образцами, стационарными и передвижными установками и др.) для обеспечения метрологического контроля, калибровки и аттестации существующей и вновь создаваемой геофизической, в том числе аэрогеофизической, аппаратуры.

В разные годы региональные и поисковые аэрогеофизические работы выполнялись на твердые полезные ископаемые (ТПИ) и углеводороды (УВ) практически во всех регионах страны. Комплекс аэрогеофизических исследований, выполняемых АО «Геологоразведка», включал магниторазведку, гамма-спектрометрию, гравиразведку, электроразведку, аэрозольный метод, тепловую и газовую съемки.

Рассмотрим наиболее важные элементы аэрогеофизических съемок.

Аэромагнитометрия

В настоящее время аэромагнитометрия является основной модификацией магниторазведки, используемой для решения региональных и поисковых задач. Вся территория России покрыта качественной аэромагнитной съемкой, материалы которой служат геофизической основой для создания современных геологических карт масштабов 1:1 000 000, 1:200 000 и более крупных (рис. 1). Воздушные съемки, практически не уступая по точности наземным, существенно превосходят их по экономическим и технологическим параметрам. Это их достоинство предопределило широкий спектр аэромагнитометров, выпускаемых в мире. Аэромагнитометрия, начав свою историю с индукционных магнитометров, последовательно использовала феррозондовые, протонные и наконец квантовые магнитометры, обладающие наилучшими техническими параметрами.

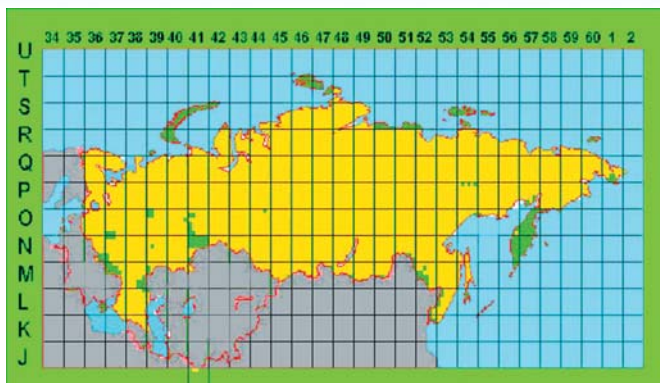


Рис. 1. Наличие цифровой аэромагнитной информации масштаба 1:200 000 в стандартной номенклатуре листов масштаба 1: 1 000 000 по территории РФ в базе данных «Гравимаг». Зеленым цветом на карте показаны площади, где данные отсутствуют

В последние годы в ведущих геофизических компаниях мира наблюдается тенденция перехода от привычных измерений магнитного поля одним датчиком к многодатчиковым системам, позволяющим измерять как модуль вектора магнитной индукции, так и его градиенты — вертикальный, продольный и поперечный.

Высокоточные градиентные съемки в сочетании с современной спутниковой навигацией обеспечивают детальную информацию о приповерхностных объектах и повышают надежность межмаршрутной интерпретации. Это особенно важно, когда исследуются аномалии, сопоставимые по размеру с межмаршрутными расстояниями. Кроме того, градиентометрические измерения меньше подвержены влиянию суточных колебаний геомагнитного поля и поэтому перспективны для площадей, характеризующихся значительной интенсивностью его вариаций.

Многодатчиковые градиентометрические системы устанавливаются либо жестко на борту самолета на выносных стрингерах и на крыльях, либо в виде буксируемых вертолетом конструкций. Как правило, многодатчиковые измерительные системы входят в состав комплексов, при этом используются датчики в основном одних и тех же фирм-изготовителей, а измерительные преобразователи, системы сбора информации и программное обеспечение разрабатываются фирмами, осуществляющими аэромагнитные съемки.

Некоторые фирмы для повышения точности съемки производят конструктивные доработки самолета (вертолета), выполняя детали, расположенные вблизи датчиков, из немагнитных материалов, улучшают изоляцию энергосистем самолета для минимизации вихревых токов и предпринимают специальные меры для снятия статических зарядов с корпуса самолета.

В отечественной аэроградиентометрии следует отметить работы, выполненные с экспериментальным образцом аппаратуры МГМ-05 — вертикальным градиентометром с двумя цезиевыми датчиками: съемка по участку геотраверса Новгород — Кемь, съемка на Центрально-Онежском объекте, на территории Чувашии и

тестовая съемка на территории Финляндии. Указанные работы проведены в 1998 г.

В 2001 г. выполнены съемки с экспериментальным образцом вертикального магнитного градиентометра с двумя калиевыми датчиками, разработанным в содружестве с ГОИ им. С.И. Вавилова. По результатам съемок были построены карты поля и градиента, вызвавшие интерес специалистов, однако из-за отсутствия финансирования аппаратурные разработки в этой области были свернуты.

В последние несколько лет достигнуты большие успехи в развитии аппаратуры многодатчиковых измерений геомагнитного поля с самолета и вертолета. Эти успехи связаны в частности с применением квантовых калиевых датчиков, «родиной» которых является Россия. Промышленное освоение выполнено канадской фирмой GEM Systems Inc. Магнитный градиентометр 3-AXIS AMG фирмы GEOTECH пользуется большой популярностью за рубежом при выполнении сервисных работ на суше и акваториях. Достоинства калиевого датчика заключаются в том, что он обладает наивысшей чувствительностью, составляющей 0,0025 нТл при частоте регистрации 1 Гц и наименьшей абсолютной погрешностью ($\pm 0,1$ нТл во всем диапазоне рабочих температур). Не менее важно и то, что в отличие от цезиевого датчика калиевый датчик характеризуется слабой зависимостью от ориентации и практически нулевой курсовой погрешностью.

О развитии аэромагнитной градиентометрии в первом десятилетии XXI в. можно судить в основном по зарубежным работам. Широко стала применяться аэромагнитная градиентометрия в осадочных бассейнах при работах на нефть. Миграция флюидов в толще осадочного чехла осуществляется по зонам разломов и зонам повышенной трещиноватости, производя на пути следования определенные эпигенетические изменения в зависимости от литологии вмещающих пород. Зоны низкотемпературных эпигенетических изменений пород осадочного чехла в магнитном поле отражаются линейными аномалиями незначительной интенсивности, которые могут быть выделены из наблюдаемого поля специальной программой обработки. Физико-геологическая модель, объясняющая эти аномалии, представляется в виде узкой зоны пород пониженной намагниченности среди слабомагнитных отложений осадочного чехла.

Один из первых отечественных практических опытов применения градиентометрической съемки для локализации площадей, перспективных на обнаружение залежей углеводородов, был осуществлен в 2013 г. с канадской аппаратурой GSMP-35GA3 на лицензионных участках ОАО «ТНК-Нягань», расположенных в районе гряды Чернышева и Хорейверской впадины Республики Коми [1].

Скорость полета на маршруте составляла 100–120 км/ч, высота полета — 120 м, длина троса буксируемой гондолы — 30 м, расстояние между маршрутами площадной съемки — 500 м. Основное направление генеральных форм рельефа субмеридиональное. С учетом

простираются геологические структуры, поверхности рельефа и конфигурации площади работ направление маршрутов съемки выбрано широтное, вкрест простирания основных геологических структур. Обработка и визуализация материалов съемки выполнялись с использованием программ АСОД «Воздух», Oasis Montaj, Golden Software Surfer, CorelDRAW, Adobe Illustrator, комплектов интерпретационных программ. В результате были созданы цифровые матрицы геофизических полей по сети 200x200 м. Построены основные карты в масштабе 1:50 000: аномального магнитного поля; изолинии ΔT_a ; остаточных аномалий магнитного поля, изолинии $\Delta T_{ост}$ с интервалом осреднения 2 км; карта вертикального градиента магнитного поля; карты трансформаций.

Выделение ловушек углеводородов основывалось на представлении о преимущественном их расположении в магнитном поле $\Delta T_{ост}$: в границах отрицательных аномалий и в переходных слаболожительных зонах — седловинах; в зонах предполагаемых региональных парных разрывов диагональных серий; в узлах пересечений разрывов диагональных серий.

По материалам выполненных работ, а также с привлечением данных гравитационных съемок на картах измеренного магнитного поля западная граница гряды Чернышева прослеживается по зоне локальных положительных магнитных аномалий и зоне градиента трансформант поля силы тяжести. На основе интерпретации измеренных полей уточнено положение границ геологических структур гряды Чернышева и Хорейверской впадины. Выделены основные тектонические нарушения северо-западного направления и зоны движений северо-восточного простирания. В пределах геологических объектов III порядка выделены локальные структуры, перспективные на поиски УВ.

Результаты выполненных аэромагнитных градиентометрических работ позволяют сделать следующие основные выводы:

совместный анализ карт аномального магнитного поля, его трансформант и карт вертикального градиента позволяет уверенно выделять особенности геологического строения осадочной толщи, находящие отражение в геомагнитном поле;

сопоставление данных вертикального градиента и аномального поля позволяет оперативно оценивать глубинность источников аномалий;

градиентометрическая магнитная съемка обеспечивает высокую информативность геофизических основ для геологического картирования.

По результатам комплексной аэрогеофизической съемки совместно с данными гравиразведки выделено 24 перспективных участка. В дальнейшем при планировании подобных работ на небольших площадях с целью выявления нефтегазоперспективных структур, размеры которых составляют первые километры, желательно предусматривать комплексные аэрогеофизические исследования масштаба 1:25 000—1:50 000 с включением гамма-спектрометрического метода для получения более детальных многофакторных данных. Рекомендуется совместный анализ комплексных аэрогеофизических и

3D-сейсморазведочных данных для выработки рекомендаций по заверочному бурению.

Таким образом, результаты аэромагнитометрии позволяют локализовать перспективные участки и рекомендовать их для дальнейшего изучения и постановки поискового бурения.

Аэрогамма-спектрометрия (АГС)

Метод, определяющий содержания естественных радионуклидов К, U и Th, по сути является воздушной радиогеохимической съемкой. Распределение этих элементов используется для геологического картирования и поисковых работ на полезные ископаемые.

АГС начала зарождаться в России в 1960-е годы и несколько позже за рубежом. За последние 20 лет в связи с возможностью регистрации полного спектра этот метод превратился в инструмент не только для поисков месторождений урана и широкого круга рудных месторождений, но и для решения экологических и других специальных задач с целью обнаружения искусственных радиационных источников.

По мнению зарубежных специалистов, наиболее совершенным спектрометром является GR-820/3 с регистрацией полного спектра гамма-излучения. В спектрометре используются полицистиновые детекторы NaJ(Tl) объемом от 33 до 50 л. Отечественный гамма-спектрометр ГСА-2007, успешно эксплуатирующийся в России, не только не уступает GR-820/3, но по ряду факторов превосходит его. Это, во-первых, более многофункциональная система стабилизации энергетической шкалы, обеспечивающая оперативную адаптацию спектрометра к любым радиационным ситуациям — от низкофоновых до чрезвычайных. Кроме того, наш гамма-спектрометр имеет более низкий порог обнаружения радионуклидов благодаря значительному снижению уровня собственного фона, что в сочетании с более эффективной процедурой учета влияния процессов рассеяния и поглощения гамма-излучения атмосферой дает возможность увеличить высоту полета при съемочных работах. В АО «Геологоразведка» разработана методика обработки многоканального спектра с использованием методов многомерного статистического анализа.

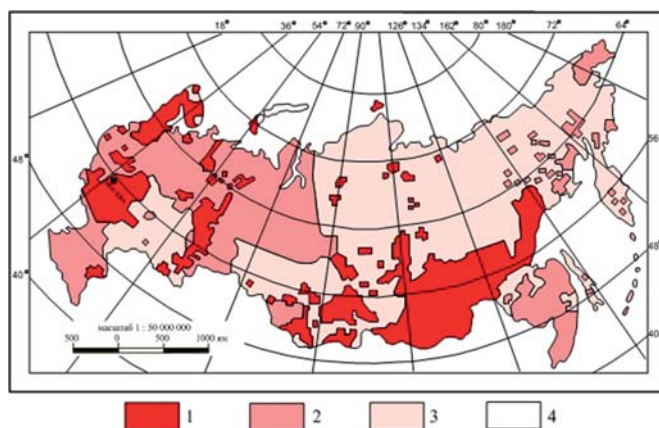


Рис. 2. Аэрогамма-спектрометрическая съемка территории России. Материалы съемки: 1 — высокого качества, 2 — среднего качества, 3 — низкого качества, 4 — съемка не проводилась

АГС-съемка с начала ее применения на территории нашей страны проводилась под научно-методическим руководством специалистов АО «Геологоразведка». Воздушные исследования выполнены в мелких (1:1000 000 — 1:2500 000), средних (1:100 000 — 1:200 000) и крупных масштабах (1:10 000, 1:25 000, 1:50 000). К настоящему времени изучено около 98 % территории России (рис. 2). Аэросъемку проводили предприятия Мингео СССР, Минприроды России и НИИ: ВИРГ-Рудгеофизика, Института прикладной геофизики, Института глобального климата и экологии и др. В 1960 — 1980 г. на территории СССР съемку проводили около 100 аэроподразделений, сейчас в России аэрогеофизические работы выполняются 6–7 организациями.

Анализ материалов аэрогеофизических работ с 1964 по 2015 г. показал, что их качество неоднородно и имеет закономерную тенденцию к повышению точности и достоверности определения содержаний радиоактивных элементов, что связано с научно-техническим прогрессом в области разработок аппаратуры и методик аэросъемки [2].

Качество материалов АГС определяется такими основными параметрами, как тип аппаратуры, ее точность, метрологическое обеспечение измерений, технология привязки, обработки и интерпретации аэроданных, соответствие геологическому заданию.

Нормативной базой метрологического обеспечения являются аттестованные методики выполнения измерений. Техническими средствами метрологического обеспечения служат образцовые средства измерения в виде комплекта рудных моделей, аттестованные по энергии внешнего гамма-излучения, комплекты образцовых спектрометрических гамма-излучателей и естественные полигонные участки, аттестованные в качестве стандартных образцов массовых долей природных радионуклидов, либо по плотности загрязнения радионуклидами Cs-137 и Cs-134. На территории России было подготовлено 83 полигонных участка, аттестованных в качестве ГСО (государственный стандартный образец — полигон Пусун-Саари в Карелии), ОСО (отраслевой стандартный образец), СОП (стандартный образец предприятия).

Технология обработки АГС данных обеспечивает получение необходимых объемов цифровой информации, ее привязку к местности и приведение к единому уровню по всей территории России. На основании обобщения материалов съемок выделены три категории качества АГС материалов. За верхний уровень категорий качества принято современное состояние технического и методического обеспечения АГС крупномасштабных работ.

Низкая категория качества АГС материалов (1964–1973 гг.).

К этой категории относятся материалы, полученные аэрогамма-спектрометрами первого поколения — российскими макетными и серийными низкочувствительными образцами типа: АИ-100-1, АСГ-48, 48М, 48М2, АРС-1, АСГ-38Ж. Полевая точность определения составляла по урану $\pm 1,0 \times 10^{-4} \%$, торию $\pm 2,5 \times 10^{-4} \%$,

калию $\pm 0,5 \%$ и мощность экспозиционной дозы (МЭД) $\pm 1,5$ мкР/ч. Аппаратура устанавливалась на носителях типа АН-2, ИЛ-14, МИ-4, МИ-1. Запись информации проводилась на аналоговые регистраторы. Градуировка велась с помощью концентрационных (рудных) моделей и неаттестованных естественных полигонов. Привязка измерений осуществлялась визуально и фотографированием. Обработка аэроданных проводилась вручную или на электронных вычислительных машинах первого поколения. Масштаб съемки был мелким и средним.

Средняя категория качества АГС материалов (1973–1992 гг.)

К этой категории качества отнесены АГС материалы, полученные макетными и серийными российскими и канадскими аэрогамма-спектрометрами второго поколения со средней чувствительностью типа: АСГ-71, АГС-4К, ГСА-70, АГС-6К, МАКФАР-I II, ОРТЭК, СНЕГ-М, АТЛАС с объемом кристаллического детектора 8–12,5 дм³. В качестве носителей использовали АН-2, МИ-4, МИ-8, МИ-2. Цифровая регистрация данных проводилась разнотипными кодировщиками: РЦАГ-16, РЦД, КД-77 (ПЛ-80), РУМС-2000. Градуировка велась с помощью концентрационных (рудных) моделей и естественных полигонов. Привязка осуществлялась с помощью радионавигационных систем и телекамер (ПОИСК-ДМ, АРС, МИР-3, РСДН и др.). Точность АГС метода позволяла определять кларковые содержания урана (по радию), тория и калия. Обработка АГС материалов проводилась на ЭВМ с применением автоматизированных систем типа «Аэропоиск», АСОМ АГС/ЕС, СОД Геофизика и др. Масштаб съемки средний и крупный.

Высокая категория качества АГС материалов (с 1977 г. по настоящее время).

К этой категории относятся материалы аэросъемок, выполненные российской и канадской макетной и серийной аппаратурой третьего поколения (ГСА-77, 80, 99, 2000, АГС-2001, СВ, СКАТ-77, СТК, АСМИ, АГС-7,8к, МАКФАР-IV, GRS-410, «Scintrex» с объемом кристаллического детектора 37,5–75 дм³). Аппаратура устанавливается на самолетах и вертолетах типа АН-2, АН-30, АН-26, МИ-8, 8Т, К-26 и др. Цифровая регистрация информации предусмотрена в конструкции аппаратуры. Градуировка аэрогамма-спектрометров выполняется с помощью концентрационных моделей и аттестованных полигонов (ГСО, ОСО, СОП). Привязка аэромаршрутов обеспечивалась радионавигационными (МИР-3, ПОИСК, РСДН) и спутниковыми системами навигации ЛОЦМАН, GPS-20, АБРИС-ГЕО. Обработка данных проводилась вычислительными и компьютерными системами АСОМ-АГС/ЕС, СОД Геофизика, АСОД «Воздух», отечественными и зарубежными (DOME, DOSTA) пакетами программ и др. Современная аэрогеофизическая основа представлена в виде цифровых матриц измеренных физических полей, их трансформант и аналоговых карт. Разработаны и апробированы в различных геологических условиях технологические схемы интерпретации аэро-

данных и программные средства их реализации для геолого-съёмочных, прогнозных, поисковых и экологических задач.

Аэроэлектроразведка

Аэроэлектромагнитные методы (АЭМ) приобрели в настоящее время широкое применение при поисковых и разведочных работах во многих районах мира. Эти методы подразделяются на два основных класса: пассивные и активные. К пассивному методу относится метод VLF, использующий электромагнитные излучения сверхдлинноволновых радиостанций (СДВР), и метод AFMAG, использующий естественные электромагнитные поля. Активные методы, имеющие в настоящее время за рубежом множество модификаций, как в самолетном, так и в вертолетном вариантах, по способу возбуждения и приема электромагнитных полей подразделяются на частотные и временные. Частотный АЭМ впервые успешно прошел испытания в июне 1948 г. в Канаде. Это была самолетная одночастотная система, разработанная компанией Stanmac-McPhar.

Современные частотные системы.

Примерами современных частотных вертолетных систем являются DIGHEM (Digital Helicopter Electro Magnetics). К 1990-м годам эти системы приобрели тот облик, в котором они используются в настоящее время. Объединяет их жесткая база (гондола) длиной 6–12 м, включающая генераторные и приемные катушки. Максимальный предел глубины исследований этих систем обычно составляет 100–150 м.

Эти системы, как правило, многочастотные. Например, стандартная DIGHEM (1991 г.) обладает частотами 900, 7200, 56000 Гц с взаимно перпендикулярными системами катушек. А конфигурация DIGHEM^{VRES} (1998 г.), разработанная специально для картирования в условиях горизонтальной среды, имеет 5 частот: 380, 1400, 6200, 25000 и 10100 Гц и только с копланарным расположением катушек. Вертолетная система DIGHEM в настоящее время — это продукт развития аппаратуры в течение более чем 30-летнего периода, с которой выполнено более 1,5 млн. км съёмки по всему миру. Но в DIGHEM, имеющей пять пар (генератор — измеритель) катушек, существуют трудности взаимной калибровки всех пяти частот.

Это препятствие было преодолено в 1997 г., когда была введена в производство работ иная вертолетная многочастотная система ImpulseEM (Aeroquest Ltd., Канада). Существенной особенностью этой системы является наличие лишь одной пары катушек для всех используемых частот. Это основной фактор снижения взаимовлияния катушек, а значит, снижения шума и повышения чувствительности. Типовые рабочие частоты 870, 4350, 21750 Гц для коаксиальной катушки и 930, 4650, 23250 Гц для копланарной. Кроме того, генераторные катушки системы отличаются повышенным дипольным моментом, что повышает глубинность исследований. Эта система была единственная в своем роде вплоть до 2002 г., когда Geophex Ltd. представила свою GEM-2A, также имеющую одну установку катушек для всех частот.

Что касается пространственного разрешения, т.е. способности локализации объектов, то вертолетные частотные системы благодаря небольшой базе генератор — приемник обладают лучшими параметрами, чем аналогичные самолетные системы, где разнос генераторной петли и приемных катушек составляет несколько десятков метров.

Представителем частотной самолетной системы с жестким расположением на крыльях генераторных и приемных катушек является система HAWK (Geotech Airborne), работающая в широком диапазоне частот (200 Гц — 12.5 кГц).

Самолетные системы с нежесткой базой в мире сейчас практически не используются из-за низкой пространственной разрешающей способности, высокого уровня шумов и относительной нестабильности измерений.

В середине 1960-х годов появилась самолетная система в режиме измерений переходных процессов — аналоговая система INPUT компании Barringer Research. Вертолетная система подобного типа появилась только в 1980 г., разработанная компанией Questor Surveys Ltd. С этого времени методу переходных процессов было отдано предпочтение в области применения и при разработке аппаратуры.

Современные TDEM системы.

Представителями самолетных TDEM (Time domain) систем, использующихся в настоящее время, являются MEGATEM, GEOTEM, TEMPEST (Fugro Airborne Surveys). Развитие этих систем шло по пути увеличения «дипольного момента» до 106 А/м², что делало их весьма громоздкими. Другими недостатками этих систем в силу большого разноса генератор — приемник является низкая пространственная разрешающая способность, а также присущая всем самолетным системам асимметричность получаемых данных. Из-за относительно высокой скорости и большой высоты полета эти системы обладают ограниченными возможностями фиксации локальных проводящих объектов.

Новый виток развития с конца 1990-х годов получили вертолетные системы с режимом измерений метода переходных процессов (TDEM), которые в силу очевидных преимуществ, прежде всего по глубинности исследований, постепенно начали вытеснять вертолетные частотные и по пространственной разрешающей способности — самолетные TDEM. Своим новым качествам этот принцип измерения обязан революционным изменениям в электронной базе и схемных решениях, что выразилось в значительном снижении уровня регистрируемых шумов. С 1960-х до конца 1990-х годов он уменьшился почти на два порядка, что привело к увеличению глубинности исследований почти в 5 раз.

Вертолетные системы TDEM развивались для различных целей, и каждая имеет свои особенности. Имея базовую частоту 25/30 Гц, система VTEM (Geotech Ltd., Канада) предназначена для поисков только высокопроводящих медно-никелевых руд, а также хорошо приспособлена для работы в условиях вышележащих экранящих горизонтов.

В AeroTEM (Aeroquest Ltd., Канада) системе эти возможности достигнуты путем измерений во время пропускания питающего тока, наряду с режимом измерений после его выключения. При этом не теряются возможности фиксации слабых проводников. По сути это упрощенная версия HeliTEM, но технически более отточенная благодаря громадному объему опытных и производственных практических работ в разнообразных геологических и геоморфологических условиях.

NewTEM разрабатывались Newmont Mining Corp. (USA) в течение 1995–2001 гг. в основном для целей поисковых работ на золото как в проводящей, так и в высокоомной среде. Так же, как и AeroTEM, она обладает широким диапазоном измеряемых сопротивлений.

SkyTEM (Дания) разработана и используется для решения гидрогеологических задач: для оценки мощности водоносных горизонтов, слоев глин, при поисках погребенных русел и т.п.

Существуют оригинальная вертолетная HoisTEM (GPX, Австралия) и THEM (THEM Geophysics Inc., Канада) с выносной приемной системой относительно питающей установки и монтируемая на вертолете.

Из упомянутых выше пассивных методов практически затормозилось развитие систем VLF (СДВР). В части же разработок по методу, использующему естественные электромагнитные поля, внимание заслуживает вертолетная система AFMAG компании Geotech, получившая название ELF MAG (Extra LOW Frequency Magnetometry).

Наряду с развитием частотных и временных систем в последние годы компанией Terraguest Ltd. проведена разработка комбинированной (пассивно-активной) системы, измеряющей одновременно как искусственные, так и естественные электромагнитные поля в диапазоне частот 10–100 000 Гц.

В России используется при проведении аэроэлектро-разведочных работ и комплексных съемок следующая аппаратура:

СДВР с измерением пространственно-временных компонент магнитной и электрической составляющих электромагнитного поля, самолетный и вертолетный варианты (разработчик АО «Геологоразведка»);

ДИП-А-4,2 самолетная четырехчастотная с генераторной рамкой, конструктивно расположенной вокруг самолета Ан-2, и трехкомпонентным датчиком в буксируемой гондоле (разработчик ЗАО ГНПП «Аэрогеофизика»). В 2006 г. ЗАО ГНПП «Аэрогеофизика» опробовала при производственной съемке и вертолетный вариант ДИП-В. Измерения одновременно производятся на частотах 130, 520, 2080 и 8320 Гц. Подобная аппаратура ДИП-4F разработана в АО «Геологоразведка», с которой в 2006 г. выполнена съемка на самолете Ан-3 в комплексе с аэромагнитометром и гамма-спектрометром;

АМПП «Импульс-2» по методу переходных процессов с источником и приемником электромагнитного поля на подвесной конструкции, буксируемой вертолетом Ми-8 (разработчик АО «СНИИГГиМС», НТГУ и

«Сибгеотех»). Дипольный момент $M = 10^5 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, длина трос-кабеля 50 м, глубинность измерений до 500 м;

современные комплексы EM-4Н, «Экватор» (разработчик ЗАО «Геотехнологии»), успешно зарекомендовавшие себя при натурных испытаниях и работах в различных регионах и обстановках.

Аэрогравиметрия

Первые аэрогравиметры, разработанные компанией Lacoste & Romberg (Остин, Техас), базировались на наземных приборах, размещаемых на воздушном судне на инерционных (стабилизированных) платформах. Точность и разрешающая способность при этом зависели от того, насколько инерционная платформа была способна имитировать условия стационарных наземных измерений. В течение ряда лет воздушно-морской гравиметр Lacoste & Romberg оставался единственной коммерческой системой и широко использовался (и до сих пор используется) при проведении аэросъемок. Однако точности и разрешения, необходимых для поисков полезных ископаемых, с этим прибором достигнуть не удалось.

Создание нового поколения аэрогравиметров стало возможным с появлением систем глобального позиционирования (GPS). Современная аэрогравиметрическая система базируется на двух основных компонентах — акселерометре и датчике движения GPS. Акселерометр и датчик движения GPS в совокупности дают исковое значение ускорения силы тяжести в данной точке над поверхностью земли.

Первый аэрогравиметр AIRGrav (Airborne Inertially Referenced Gravimeter), был разработан компанией Sander Geophysics (SGL) и прошел летные испытания в 1999 г. В 2004 г. SGL сообщила, что по данным съемок последних лет достигнута точность 0,2–0,5 мГал при разрешении 1–2 км в самолетном варианте и 0,5–0,7 км в вертолетном. В 2001 г. в России были проведены испытания аэрогравиметров нового поколения «Гравитон-М» (разработчик ВНИИГеофизика), МАГ-1 (ЗАО «Гравтехнологии»), Чекан АМ (ФГУП ЦНИИ «Электроприбор»). Результаты испытаний подтвердили возможность выполнения аэрогравиметрической съемки масштаба 1:200 000 и построения поля с сечением 2 мГал.

Работы по усовершенствованию аэрогравиметра МАГ-1 привели к тому, что этот гравиметр с 2004 г. под коммерческой маркой GT-X (GT-1A) пользуется большим спросом за рубежом и считается одним из самых современных аэрогравиметров с полным автоматизированным измерением гравитационного поля в движении.

Перспективными для поисков полезных ископаемых представляются новые разработки в области аэрогравиградиентометрии. Первая опытная съемка была выполнена в 1999 г. в горнодобывающем районе Бархэрст (Канада) с разработанной компанией Lockheed Martin аппаратурой. В 2004 г. продемонстрированы возможности этой системы при выявлении кимберлитовых трубок на СЗ Канады.

В марте 2004 г. компания ARKEX Ltd. (Кембридж, Великобритания) также выпустила новый аэрограви-

метр, базирующийся на технологии Lockheed Martin. В Канаде компания Gedex Inc. (Миссиссога, Онтарио) разрабатывает аэрогравиметрическую и аэрогравиградиентометрическую систему по технологии, предложенной компанией Rio Tinto, Университетом Западной Австралии и Космическим агентством Канады.

В настоящее время наблюдается подлинный расцвет аэрогравиразведки. Конечно, потребуется время для выбора наиболее информативных параметров и разработки тензорных градиентометров. По имеющимся данным здесь лидирует компания Bell Geospace Inc., опубликовавшая в последние годы несколько полевых примеров их использования.

Аэронавигация

В настоящее время для вождения ЛА при аэрогеофизической съемке и привязки ее результатов используются спутниковые системы глобального позиционирования — GPS (Global Positioning System, США) и ГЛО НАСС (Глобальная навигационная спутниковая система, Россия).

Как у нас, так и за рубежом используются аэроприемники (приемоиндикаторы) ведущих фирм разработчиков: NovAtel Inc., Javad Navigation Systems, Magellan Comporation.

Из используемых отечественных аэрогеофизических навигационных систем, можно назвать систему ЛОЦ-МАН, разработанную в ГНПП «Аэрогеофизика», АБРИС-ГЕО (ВИРГ — Рудгеофизика и ТРАНЗАС — Авиация) и МРК-11 (ФГУП НПП «Радиосвязь», г. Красноярск), функциональные возможности которых тождественны зарубежным. Единственное, что является новым в технологии зарубежных аэроаэроаэроаэро, это применение комплексной системы управления полетом, обеспечивающей пилота трехмерной информацией. Кроме отклонений от заданного маршрута на прибор пилота выводится вертикальное отклонение от заранее рассчитанной оптимальной высоты полета с использованием цифровой модели рельефа, что облегчает работу пилота, повышает качество работ и безопасность полетов.

За рубежом все шире применяют режим передачи дифференциальных поправок от базовых станций к потребителю в реальном времени по радиосвязи (системы Landstar, Omnistar, INMARSAT, использующие геостационарные спутники) или широкодиапазонные системы дифференциальной навигации WAAS (США) и EGNOS (Европа), которые передают поправки потребителю на частотах передачи навигационных сообщений от спутников.

Современные системы позволяют получить точность определения координат: по горизонтали 5 м, по высоте 2 м в обычном режиме; в дифференциальном режиме соответственно по горизонтали $0,3 \div 0,4$ м, по высоте $0,3 \div 0,5$ м.

В стадии завершения находится система GALILEO (Европейское сообщество), использующая кроме двух систем GPS GLONASS (GNSS) дополнительные частоты, которые позволят определять высоту с точностью до 0,1 м.

Исходя из анализа состояния основных аэрогеофизических методов в России и за рубежом, можно сделать следующие **основные выводы:**

По аэромагнитному направлению у нас практически с 2001 г. прекратились работы, способствующие дальнейшему развитию градиентометрических измерений, переходу к многодатчиковым измерительным системам, позволяющим получать дополнительную геологическую информацию. При проведении аэромагнитной съемки при жестком креплении датчиков невозможно повышение точности измерений без использования специально конструктивно доработанных носителей.

По аэрогамма-спектрометрическому направлению анализ состояния показывает, что в ближайшее время до появления новых типов сцинтилляторов или возможности применения на борту высокоразрешающих полупроводниковых детекторов ждать качественно новых достижений маловероятно. Сегодняшний уровень как наших, так и зарубежных гамма-спектрометров вполне удовлетворяет потребителей.

По аэроэлектроразведочному направлению большое количество зарубежных фирм, занимающихся разработкой различных модификаций аппаратуры с техническими параметрами, превосходящими параметры нашей отечественной немногочисленной аппаратуры, оставляет мало шансов на то, что в ближайшее время мы можем серьезно конкурировать с подобной аппаратурой. Но учитывая тот факт, что эта аппаратура в отличие от магнитометрической, спектрометрической и навигационной не поставляется зарубежными фирмами, нет других вариантов, как вести свои разработки в этом направлении, используя опыт ЗАО НПП «Аэрогеофизика», АО «Геологоразведка», «Сибтехгео», СНИИГГиМСа.

По аэрогравиметрическому направлению за последние годы уровень разработки отечественных аэрогравиметрических систем не уступает зарубежному, доказательством чему является поставка за рубеж аэрогравиметра GT-1F производства ЗАО «Гравтехнология», который считается одним из лучших современных аэрогравиметров. Следует отметить, что объемы проводимых у нас аэрогравиметрических съемок невысоки по сравнению с объемами зарубежных съемок, и они выполняются на больших самолетах. Отстаем мы также в части создания и освоения гравитационных градиентометрических аэросистем.

По авиационному обеспечению многие зарубежные фирмы имеют собственный парк специальных самолетов и вертолетов для проведения на них аэрогеофизических съемок. Необходимо отметить, что в практику аэросъемок начали активно внедрять беспилотные летательные аппараты (БЛА), которые в последнее десятилетие получили широкое распространение во многих странах мира для решения главным образом военных задач. В отдельных случаях для проведения аэросъемочных работ за рубежом находят применение дирижабли.

Ряд компаний — Universal Wing Geophysics Corp. (Ванкувер), Magsurvey Ltd. (Великобритания) и Fugro

Airborne Surveys в последнее время предоставляют услуги по проведению магнитных съемок по этой технологии. По-видимому, внедрение в практику поисковых работ БЛА получит более широкое развитие в ближайшие годы. Достоинства новой технологии очевидны. Это — малая высота полета, увеличение детальности и оперативности получения геологической информации, исключение риска гибели летного состава, существенное сокращение стоимости работ, отсутствие необходимости взлетной полосы и др. С развитием этого интересного направления мы связываем перспективы будущего в области поисковой аэрогеофизики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мац, Н.А. Перспективы аэромагнитной градиентометрии для решения поисковых задач в нефтяной геологии / Н.А. Мац, В.В. Шиманский, И.В. Шпуров // Недропользование. XXI век. — 2014. — № 6. — С. 20–25.
2. Visokoostrovskaya, E.V. IAEA Library Cataloguing in Publication Data. Radioelement mapping / E.V. Visokoostrovskaya, E.I. Zubov, A.I. Krasnov, N.A. Mats, O. Tchuloon. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. — P. 58, 79, 85 (IAEA nuclear energy series, ISSN 1995–7807; no. NF-T-1.3).STI/PUB/1463. ISBN 978–92–0–106110–2.

© Глинский Н.А., Мац Н.А., Пастор С.В., 2017

Глинский Николай Александрович // g.n.48@yandex.ru

Мац Николай Александрович // nmats51@mail.ru

Пастор Сергей Владимирович // s.pastor@geolraz.com

УДК (550.83/553.81)+553.3.041

Тимофеева И.К. (АО «Геологоразведка»)

ВЫДЕЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НА АЛМАЗЫ ПЛОЩАДЕЙ В ПРЕДЕЛАХ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ВОЛЬСКО-ВЫМСКОЙ ГРЯДЫ (ЛИСТ Р-39-V) ПО КОМПЛЕКСУ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

На базе материалов геофизической основы масштаба 1:200 000 для листа Р-39-V и его обрамления был выполнен комплексный анализ геолого-геофизических данных с целью локализации площадей, перспективных на алмазы в пределах южной части Вольско-Вымской гряды. Для проведения прогнозных построений материалы ГФО были дополнены целевыми трансформантами, цифровой моделью рельефа местности. **Ключевые слова:** геофизическая основа, критерии алмазоносности, геофизические критерии локализации областей алмазоносного магматизма.

Timofeeva I.K. (Geologorazvedka)

ALLOCATION OF THE PERSPECTIVE AREAS ON DIAMONDS WITHIN THE SOUTHERN PART OF THE VOLSK AND VYMSKY RIDGE (SHEET R-39-V) ON THE COMPLEX OF GEOPHYSICAL DATA

On the basis of materials of geophysical bases scale 1: 200 000 for the sheet P-39-V and its surroundings was carried out a comprehensive analysis of geological and geophysical data in

order to localize the areas, per-promising for diamonds in the southern part of the Wolski-Vymsky ridge. For the forecast constructions materials of geophysical bases were supplemented by targeted transformants, a digital model of the terrain. **Keywords:** geophysical base, criteria of diamonds, geophysical criteria of localization areas diamondiferous magmatism.

В последние годы для решения картировочных и прогнозно-минерагенических задач при составлении геофизических основ (ГФО) успешно применяются современные технологии, ориентированные на анализ комплексных (геофизических, дистанционных, геохимических и др.) данных. Их использование усиливает прогнозно-минерагеническую направленность работ, позволяет выявлять локальные площади, перспективные на выявление полезных ископаемых, и повышает эффективность использования геофизических данных при уточнении элементов геологического, в том числе глубинного строения территории.

В 2013 г. для листа Р-39-V, в пределах которого расположена южная часть Вольско-Вымской гряды, на основе подготовленной ГФО-200 была выполнена комплексная геолого-геофизическая интерпретация материалов геофизической основы с уточнением структурно-тектонического районирования территории и составлением прогнозно-геофизической схемы на алмазы.

Основным инструментом построения прогнозной схемы послужила разработанная в ФГУНПП «Геологоразведка» компьютерная технология прогнозно-геофизических исследований, позволяющая выделять площади, перспективные на выявление полезных ископаемых, на основе всестороннего анализа комплекса геоданных. При этом особое внимание уделяется геологическим предпосылкам прогноза, обоснованию и выбору геофизических прогнозно-поисковых критериев, анализу современных литературных источников.

Территория исследуемого листа Р-39-V относится к Тимано-Уральскому региону, который включает Канино-Тиманский кряж, Урал, Пай-Хой и примыкающие районы Восточно-Европейской платформы. В работах [3, 13] этот регион, несмотря на высокий уровень неопределенности, представляется одним из наиболее перспективных алмазоносных регионов европейской части России.

1. Оценка перспектив алмазоносности территории листа Р-39-V

Предварительный анализ опубликованной и фондовой литературы различных лет позволил установить, что имеется ряд региональных критериев для выявления на территории листа Р-39-V областей кимберлитового магматизма (рис. 1):

принадлежность внутренней зоне палеосубдукции, с которой связывают перспективы обнаружения алмазоносных щелочно-ультраосновных пород в пределах Тимано-Уральского региона [5]. Ось внутренней зоны палеосубдукции трассирует с юго-востока на северо-запад ряд поднятий фундамента, к склонам которых в