

**АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ****Е.В. Каршаков, А.К. Волковицкий, Е.В. Мойланен (ИПУ им. В.А. Трөpezникова РАН)**

*Показано, что аэроэлектроразведочные технологии применяются на практике с целью разведки полезных ископаемых. Приведена классификация аэроэлектроразведочных измерительных систем. Рассмотрены технические характеристики и функциональные возможности аэроэлектроразведочных измерительных комплексов EM-4H и «Экватор», разработанных в ИПУ РАН.*

*Ключевые слова: аэроэлектроразведочные технологии, разведка полезных ископаемых, измерительные системы, геофизически значимая информация, летательный аппарат.*

**Введение**

Освоение богатств земных недр, разведка и разработка полезных ископаемых является важным направлением хозяйственной деятельности. Значимое место занимает и создание высокоэффективных методов изучения геологического строения территорий, оценки перспективности поисков полезных ископаемых. В условиях бурного развития промышленных технологий растет потребность в поисках месторождений новых видов минерального сырья в неосвоенных ранее районах. Особую значимость приобретают геофизические методы и технологии, являющиеся составляющей геологоразведочного процесса благодаря высокой эффективности, надежности, дешевизне и оперативности.

В арсенале геофизических методов одними из наиболее перспективных являются методы индуктивной электроразведки — зондирование земных недр низкочастотным переменным магнитным полем. Среди этих методов наиболее мощными при масштабных региональных исследованиях и работах в труднодоступных районах следует считать аэроэлектроразведочные, при которых зондирующая установка размещается на борту летательного аппарата-носителя.

Аэроэлектроразведочные технологии позволяют в темпе движения летательного аппарата покрыть сетью измерений значительную территорию, исключая при этом необходимость выполнения сложных и трудоемких наземных полевых работ в труднодоступных районах.

Поскольку основным назначением аэроэлектроразведочных систем является исследование физических свойств зондируемой среды, основной задачей обработки результатов измерений является выделение из общей совокупности измеренных сигналов геофизически обусловленной информации, зависящей только от электромагнитных свойств объектов зондирования и не зависящей от разного рода искажающих факторов. Геофизически значимой информацией является форма выявленной при известных условиях измерения импульсной и частотной характеристик зондируемой среды.

Обнаружительные возможности различных аэроэлектроразведочных систем существенно различаются в зависимости от класса поисковых задач. Сегодня их спектр очень широк: геофизическое картирование мощности рыхлых отложений, поиск месторождений

руд и кимберлитов, поиск подземных вод, решение инженерных и гидрогеологических задач, батиметрия на пресных и соленых акваториях [1].

**Классификация аэроэлектроразведочных измерительных систем**

По форме представления геофизически значимой информации аэроэлектроразведочные измерительные системы принято делить на частотные, для которых формой представления является частотная характеристика (или ее фрагмент), и временные, для которых формой представления является импульсная характеристика (или ее фрагмент) [2].

Исторически частотные системы появились раньше. Возбуждающее поле их передатчиков имело характер непрерывного (часто даже монохроматического) гармонического сигнала. Даже сегодня частотные системы иногда называют системами с непрерывным возбуждением. По мере технического совершенствования новых видов аппаратуры число составляющих в спектре зондирующего сигнала существенно увеличивается. Форма зондирующего сигнала во времени становится более сложной, а в некоторых даже является импульсной. Таким образом, определяющей характеристикой принадлежности системы к классу частотных или временных является форма представления геофизически значимой информации, но не форма зондирующего сигнала.

Частотная и импульсная характеристики связаны между собой прямым и обратным преобразованием Фурье, а любой периодический сигнал может быть представлен конечной или бесконечной суммой гармонических компонент, для каждой из которых возможно измерение значения комплексной амплитуды. Поэтому существует класс гибридных систем с двойной формой представления геофизически значимой информации — как в виде импульсной, так и в виде частотной характеристик. Этот класс крайне немногочисленный ввиду сложности реализации систем на этом принципе.

Аэроэлектроразведочные измерительные системы и геофизические методы принято также классифицировать по способу исключения из результатов измерений непосредственного влияния первичного зондирующего поля. Главной сложностью решения этой задачи является значительная амплитуда первичного поля, обычно многократно превышающая амплитуду поля отклика, а также сильная зависимость первич-

ного поля от изменений геометрических параметров измерительной установки. Это влияние получило даже специальное название — «геометрический шум». Для преодоления влияния геометрического шума традиционными являются следующие способы.

— Неполное извлечение геофизически значимой информации, наблюдение только той части в сигналах отклика, которая, с одной стороны, зависит от свойств геоэлектрического разреза, а с другой — не зависит от величины и направления первичного поля в точке измерения.

— Механическая стабилизация измерительной установки с тем расчетом, чтобы ни расстояние, ни углы взаимной ориентации приемника и передатчика в процессе работы установки не изменялись. При механической стабилизации приемник и передатчик объединяются единой механической несущей конструкцией, и их взаимное положение полагается неизменным, в этом предположении расчетное значение первичного поля может быть вычтено из результатов измерений.

— Определение значений набора геометрических параметров измерительной установки методами углового и пространственного позиционирования, вычисление на их основе значений вектора первичного поля в точке измерения и внесение в результаты измерений соответствующих поправок. Отметим, что для большинства аэроэлектроразведочных систем первичное поле в результатах измерений многократно превышает поле отклика, поэтому метод требует очень высокой точности определения геометрических параметров.

#### Производственное применение аэроэлектроразведочных комплексов

Эффективность применения той или иной аэроэлектроразведочной измерительной системы в ходе геофизических работ определяется не только особенностями и качеством электромагнитного зондирования, но и, в не меньшей степени, общими принципами единой производственной технологии, объединяющей [1]:

- планирование полетного задания и управление аэросъемочным полетом;
- измерение информации на борту летательного аппарата-носителя;
- контроль и регистрацию измерительной информации;
- вычислительную обработку полученной информации;
- интерпретацию полученных результатов.

Основной подход к организации аэрогеофизических работ исторически основан на многолетних традициях геофизического картирования и в общих чертах хорошо описывается простой формулой: произвести измерения необходимых сигналов в точках с заданными географическими координатами, полученные результаты представить в виде параметров,

отражающих геологическое строение исследуемой территории, а их распределение по исследуемой территории — в виде карт и разрезов. Процесс интерпретации, завершающий технологию, позволяет на их основе перейти к пониманию особенностей геологического строения и поисковых перспектив в отношении тех или иных видов полезных ископаемых.

В соответствии с этой постановкой структура большинства бортовых аэрогеофизических комплексов в настоящее время включает следующие компоненты:

— система средств геофизических измерений, представляющих собой необходимые датчики — источники геофизической информации. В качестве элемента в их число входит и электромагнитная зондирующая система;

— система управления аэросъемочным экспериментом, обеспечивающая необходимую навигационную поддержку — средства глобального позиционирования, высотомеры, датчики курса и т.п., программное обеспечение для решения штурманских задач, навигационно-пилотажные индикаторы, средства управления полетным заданием;

— система комплексной регистрации геофизической и навигационной информации, контроля и визуализации.

До конца прошлого века такое разделение было вполне строгим, указанные системы были четко индивидуализированы на аппаратном уровне. Сегодня же функции навигационного обеспечения, управления полетом, комплексной регистрации, визуализации и автоматического контроля и даже управления работой геофизических приборов зачастую объединяются в структуре единой бортовой информационно-управляющей вычислительной системы. В результате в аппаратном плане контуры структуры бортового комплекса несколько размываются, но в информационном плане она традиционно сохраняется. Это, в свою очередь, определяет основные требования к используемым аэрогеофизическим приборам и принципам информационного взаимодействия.

Общая эффективность бортового аэроэлектроразведочного комплекса зависит, таким образом, от эффективности работы каждой из входящих в него систем, полноты регистрации получаемых данных и надежности информационного взаимодействия между системами.

За годы истории развития аэроэлектроразведочных методов создано несколько десятков различных типов зондирующих систем и комплексов. Несмотря на общее единство базовых принципов далеко не все они нашли свое применение в арсенале современных технологий. За эти годы существенно менялись цели исследований, приоритеты поисковых задач и связанные с ними подходы к оценке эффективности, однако неизменно важными составляющими были и остаются следующие [1].

**Поисковая эффективность.** Степень полноты и геофизической значимости информации, получаемой в результате измерений. Глубинность и детальность зондирования, пригодность получаемых данных для геолого-геофизической интерпретации при решении тех или иных конкретных картировочных и поисковых задач, степень универсальности получаемой информации применительно к различным задачам и условиям поиска.

**Измерительная эффективность.** Аппаратурное качество зондирования, чувствительность и точность измерений.

**Картографическая эффективность.** Качество привязки получаемых данных к географическим координатам и качество покрытия исследуемой территории сетью измерительных отсчетов.

**Производственная эффективность.** Технологичность, удобство и простота эксплуатации, полнота использования летного времени, надежность, помехозащищенность, способность работать в широком диапазоне условий аэросъемочного полета (в горных районах, при боковом ветре, в условиях болтанки т. п.).

В ходе многолетней совместной работы специалистов ИПУ им. В. А. Третьякова РАН и ООО «Геотехнологии» были получены теоретические и практические результаты, использованные при создании двух современных аэроэлектроразведочных систем.

#### Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система EM-4H

Система EM-4 H разработана компанией «Геотехнологии» в 2005 г. Аппаратура широко применяется при аэрогеофизических исследованиях, главным образом, для решения задач регионального геофизического картирования с целью определения зон перспективных для поиска полезных ископаемых. Аппаратура EM-4H позволяет производить одновременные измерения на четырех частотах: 130, 520, 2080 и 8320 Гц. В качестве источника поля используется закрепленная на фюзеляже летательного аппарата горизонтальная многовитковая рамка (вертикальный магнитный диполь). К настоящему моменту компанией «Геотехнологии» создано несколько вариантов системы, использующих в качестве летательных аппаратов-носителей самолеты «Ан-2», «Ан-3» и вертолет «Ми-8». Сигнал возбуждения представляет собой сумму гармоник соответствующих частот. Ориентировочные значения дипольных моментов для четырех частот в порядке возрастания равны: 20000, 10000, 6000, 3000 А·м<sup>2</sup>. Измерение параметров переменного магнитного поля осуществляется тремя взаимно ортогональными индукционными приемными рамками, расположенными в гондоле, буксируемой на тросе-кабеле длиной 70 м. Геометрические центры рамок совмещены [4].

Для подавления помехи, обусловленной влиянием вихревых токов, наведенных в металлических конструкциях летательного аппарата, возбуждаю-

*Вкус свободы полета, ты всегда будешь ходить по земле смотря в небо.*

Леонардо да Винчи

щая система дополнена двумя дополнительными диполями-излучателями. Каждый из них создает переменное магнитное поле. Специальная методика калибровки, проводимая в полете на большой высоте, в условиях отсутствия отклика от проводящей геологической среды, позволяет определить степень и характер влияния вихревых токов и ввести соответствующие корректирующие поправки в результаты измерений.

Стабильность системы обеспечена введением адаптивной коррекции с использованием эталонного поля [8], позволяющей контролировать изменчивость измерительных характеристик системы, благодаря чему значительно сокращен объем производимых контрольно-настроечных операций.

Формой представления геофизически значимой информации в системе EM-4H является частотная характеристика, определенная на четырех рабочих частотах. Дополнительно вычисляются значения традиционных для метода ДИП-А инвариантных параметров эллиптически поляризованного поля [9]: отношения полуосей эллипса поляризации, квадрата абсолютной величины вектора большой полуоси и угла его направления в системе координат приемных рамок.

Алгоритмы обработки измерительной информации системы EM-4H позволяют по данным измерений поля определить геометрические параметры взаимного расположения приемной и возбуждающей систем. Это дает возможность учесть условия зондирования при оценке геоэлектрических характеристик исследуемой среды, что значительно повышает эффективность исследований.

Система EM-4H является удобным, эффективным средством исследования свойства проводимости пород. Используется в производственном режиме различными компаниями: АО ГНПП «Аэрогеофизика» Норильским Филиалом ВСЕГЕИ, АК АПРОСА. Убедительные результаты получены при работах в различных регионах и различных геологических условиях [4]: на Урале, в Норильском регионе, Якутии, Забайкалье.

#### Аэроэлектроразведочная система «Экватор»

Комплекс разработан специалистами компании «Геотехнологии». Впервые использован при работах в Саянах в 2010 г. Тестовый полет системы «Экватор» впервые был произведен в январе 2010 г. При создании системы основное внимание было уделено повышению эффективности решения наиболее сложных задач производственного применения при аэрогеофизических исследованиях [5]:

— обеспечение возможности применения в широком диапазоне геологических и геофизических условий, как при поиске хорошо проводящих сульфидных руд, так и при разведке месторождений алмазов и гидрогеологических исследованиях;

— обеспечение технологичности и логистической мобильности: установка должна быть компактной и транспортабельной в сложных условиях;

— обеспечение универсальности в отношении использования различных вертолетов в качестве аппаратов-носителей;

— обеспечение возможности работы в условиях сложного горного рельефа исследуемой территории;

— обеспечение возможности корректной работы в широком диапазоне скоростей движения измерительной установки.

В системе «Экватор» для возбуждения применяется импульсный сигнал сложной формы длительностью около 1,9 мс. Базовая частота возбуждения составляет 77 Гц. Параметры возбуждающего поля обеспечивают значительную амплитуду высокочастотных гармонических составляющих в спектре и, соответственно, возможность интерпретации результатов зондирования как на изолирующих, так и на проводящих геоэлектрических разрезах.

В качестве источника поля используется дипольный петлевой излучатель диаметром 7,5 м, размещаемый на платформе, буксируемой с помощью троса-кабеля длиной 70 м. Индукционный датчик приемной системы располагается в гондole, прикрепляемой к тому же тросу-кабелю на 40 м выше. Приемник системы «Экватор» производит непрерывную регистрацию поля трехкомпонентными индукционными рамками. Для точной привязки результатов измерений к географическим координатам в гондole установлен приемник спутниковой навигационной системы.

Для контроля условий зондирования и определения взаимного расположения передатчика и приемника используется метод электромагнитного позиционирования. Специально разработанные алгоритмы позволяют определить параметры взаимного расположения возбуждающей и приемной систем: расстояния с точностью до нескольких сантиметров и углов ориентации с точностью порядка 1° [7]. Высота установки над землей контролируется радиовысотомером, установленным на буксируемой платформе.

Стабильность измерительных характеристик системы, так же, как и в комплексе ЕМ-4 Н, обеспечена введением адаптивной коррекции по эталонному источнику поля. Благодаря этому обеспечена возможность долговременной работы при минимальном объеме контрольно-настроечных операций [5].

Непрерывность процесса регистрации измерительной информации позволяет получать геофизически значимую информацию в форме как переходной, так и частотной характеристики. Благодаря этому при

геофизической интерпретации могут использоваться методы, традиционно эффективные как для частотных, так и для импульсных систем. Совместная «частотно-временная» интерпретация также повышает эффективность исследований.

#### Применение системы «Экватор»

Применение высокоточной аэроэлектроразведки для поиска мелких, изометричных в плане, объектов (диаметром менее 200 м) становится все более актуально. Например, это могут быть вкрапленные руды, кимберлиты. Для поисков коренных источников алмазов в Архангельской области была проведена аэроэлектроразведочная съемка масштаба 1:5000 [7]. Общая протяженность маршрутов составила 2000 км. Съемка была выполнена за одну неделю, включая монтаж-демонтаж, перелет к месту базирования на площади работ, тестовый полет. При этом средняя длина маршрута была чуть меньше 10 км. В условиях плоского рельефа удалось выдержать постоянную скорость на маршруте — 140 км/ч. Качество проводки проверялось по координатам гондолы. Максимальное боковое отклонение от программной линии пути не превысило 15 м.

Для электромагнитной системы «Экватор» при высоте полета носителя 100 м около 80% энергии поля сосредоточено на поверхности земли в круге радиуса 70 м. Это и позволяет выполнять съемку масштаба 1:5000 — покрывать территорию сетью параллельных маршрутов с дистанцией 50 м между маршрутами. Важнейшим результатом данной съемки является выделение небольших по размеру слабоконтрастных аномалий. По результатам съемки для сравнения были построены карты удельных электропроводностей в масштабах 1:10000 и 1:5000 [7]. На более детальной карте удалось выделить дополнительные структуры. Выделение таких слабоконтрастных аномалий оправдывает масштаб съемки. Применение такой высокоточной аэроэлектроразведки для поиска мелких, изометричных в плане объектов особенно актуально при работах на территориях, прилегающих к уже разрабатываемым или выработанным месторождениям [7].

Система «Экватор» является наиболее современным средством для исследования электрических свойств пород. Система активно используется в производственном режиме компанией ООО «Геотехнологии». Убедительные результаты получены при работах в различных регионах и различных геологических условиях в России и зарубежом [4]: в Архангельском и Норильском регионах, в Якутии, Забайкалье, в Анголе и Руанде.

#### Заключение

Аэроэлектроразведочные измерительные комплексы играют значимую роль в решении задач поиска полезных ископаемых, исследования рудных месторождений и изучения геоэлектрического строения территорий. Большое внимание вопросам

разработки новых алгоритмов, развитию методов и средств аэроэлектроразведочных измерительных комплексов уделяется в ИПУ им. В.А.Трапезникова РАН. Результаты работ, воплощенные в аэроэлектроразведочных комплексах EM-4 Н и «Экватор» благодаря своим техническим характеристикам и функциональным возможностям широко применяются при аэрогеофизических исследованиях. Работы в области развития системы продолжают в настоящее время.

#### Список литературы

1. Павлов Б.В., Волковицкий А.К. Аэроэлектроразведочные измерительные комплексы и пути повышения их эффективности // Управление большими системами. Выпуск 154. 2015.
2. Spies B. R., Frischknecht F. C. Electromagnetic sounding // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. 1988. Vol. 2. P. 285-406.
3. Palacky G.J., West G.F. Airborne electromagnetic methods // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. 1988. Vol. 2. P. 811-879.
4. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Попович В.В. Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система EM-4Н // Записки Горного института. 2009. Т.183.
5. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойланен Е.В. Новая вертолетная аэроэлектроразведочная система «Экватор» для аэрометода переходных процессов // Записки Горного института. 2011. Т.194.
6. Ley-Cooper Y., and J. Macnae. Amplitude and phase correction of helicopter EM data // Geophysics. 2007. N.3. P.119-126.
7. Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойланен Е.В. Высокорастворимая аэроэлектроразведка в масштабе 1:5000 // Записки Горного института. 2013. Т.200.
8. Волковицкий А.К. Адаптивный алгоритм управления измерениями квазистационарных периодических процессов // Проблемы управления. 2019. № 5. С. 60-67.
9. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 656 с.

*Каршаков Евгений Владимирович — д-р техн. наук, заведующий лабораторией  
Андрей Кириллович Волковицкий — канд. техн. наук, старший научный сотрудник,  
Евгений Викторович Мойланен — научный сотрудник ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН.  
Контактный телефон (495) 334-90-80.*

#### Робот-трекер для удаленной работы

ИТ-компания КРОК совместно с партнером Infobot разработали голосового робота-коллегу, который поддерживает сотрудников в достижении ежедневных планов. С одной стороны, он поможет тысячам офисных работников сохранять мотивацию и не отвыкать от командной работы, а с другой - позволит управленцам выстроить простую и эффективную систему подотчетности отделов для работы в удаленном режиме.

Согласно исследованию HeadHunter, примерно 1/3 россиян некомфортно выполнять свои рабочие обязанности из дома. В частности, для 34% участников опроса ключевой недостаток удаленного режима - нехватка рабочей атмосферы. Так как до карантина большинство сотрудников никогда не работали на «удаленке», возникают трудности с совмещением рабочих и домашних обязанностей. Также из-за перехода на удаленный режим, появилось много управленческой отчетности, которую до этого сотрудники вели в более упрощенной форме или попросту обсуждали лично.

Для решения возникших сложностей КРОК и Infobot создали робота-трекера, который общается с сотрудниками несколько раз в день по рабочим и даже личным вопросам. Это помогает сотрудникам не только поддерживать рабочий ритм и фокусироваться на запланированном, но и сокращает время на оцифровку «план-фактов». А руководители отделов с помощью робота получают информацию о выполненных задачах и соблюдении KPI компании в кратчайшие сроки и без дополнительных усилий. Кроме того, такой трекинг задач поможет максимально быстро увидеть субъективные или объективные ограничения для выполнения задач и среагировать на них.

Робот очень универсален. Он способен обзвонить 200 сотрудников в минуту и собрать любую необходимую информацию. Приведем пример алгоритма его работы у

одного из клиентов: утром он собирает планы сотрудников на день или неделю, а вечером узнает результаты или то, что помешало достижению поставленных целей. Вся информация собирается голосовым роботом, транскрибируется, сводится в единый документ и отправляется руководителю, короткая версия дублируется в командные чаты в мессенджерах. Таким образом, начальство понимает положение дел своего отдела и компании по всем задачам, а сотрудники не тратят время на составление рутинных отчетов по проделанной работе.

Для внедрения голосового робота требуется от 1 дня с момента подачи заявки. В качестве сервиса для распознавания речи используется Yandex Speech Kit, а для работы с текстом — собственная NLP/NLU технология Infobot, адаптированная под телефонные разговоры. Система одновременно обрабатывает множество распознанных вариантов и выбирает наиболее подходящий по контексту в отличие, например, от большинства текстовых чат-ботов, где пользователь должен сам сформулировать мысль только в одном predetermined варианте.

Ключевая особенность технологии — возможность поддержки и сохранения командного духа сотрудников во время карантина. Голосовой робот не только собирает, но и делится информацией. По сути, он способен выполнять многие функции секретаря и менеджера по корпоративной культуре, скажем, голосовой робот может напомнить сотрудникам помыть руки или измерить температуру, поинтересоваться их самочувствием и даже оказать моральную поддержку. Робота также можно сказать слова благодарности или передать через него поздравления с каким-либо событием коллегам по компании. А если у руководства есть важные новости, анонсы для своих сотрудников, робот может донести их в течение нескольких минут абсолютно до всех.

<http://croc.ru>