УДК 550.37 + 550.837

Лео ФОКС
Компания «Феникс Джеофизикс Лтд», Торонто, Онтарио, Канада

НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ АППАРАТУРЫ ДЛЯ МЕТОДОВ МТЗ И АМТЗ

В разработке многофункциональной электроразведочной аппаратуры пятого поколения отчетливо наметились два равноправных подхода. Первый из них (во многом заимствованный из опыта более ранних поколений) берет за основу многоканальную систему, которая включает центральный (регистрирующий, контрольный и обрабатывающий) блок, соединенный проводами с большим числом (20-24) одно- и двухканальных предусилителей-преобразователей. Только два канала предназначены для измерения горизонтальных магнитных компонент, остальные – для горизонтальных электрических компонент. Второй подход заключается в использовании неограниченного числа пяти-, трех- и двухканальных приборов, синхронизированных с помощью GPS. Этот подход имеет ряд существенных преимуществ и доминирует на мировом рынке. Выпущенная компанией «Феникс» в 2005 г. телеметрическая система SSMT.net позволяет реализовать преимущества обоих подходов. В последние годы для поисков различных видов полезных ископаемых все шире применяются трехкомпонентные съемки с измерением только магнитных компонент естественного электромагнитного поля Земли.

There are two parallel approaches clearly appeared in elaboration of the fifth generation of multifunctional electroprospecting equipment. Both approaches have multiple channels. The first one (which is more closely related to the previous generations models) has, as the main features, a central (recording, controlling and processing) unit connected by cables to 20-24 one- or two-channel boxes, each with preamplifier, ADC and small memory. Only two channels are used for horizontal magnetic components, all other channels measure horizontal electric components. The second approach (dominating now at the world equipment market) features an unlimited number of independent (without cables) 5-, 3- and 2-channels boxes, all synchronized by GPS. Most recently (in 2005) «Phoenix Geophysics Ltd» released a telemetric multifunctional system under the trade name SSMT.net, which incorporates advantages from both mentioned approaches. Since 2003, a natural field electroprospecting technique, measuring only three magnetic components, has grown rapidly for various types of useful minerals.

Введение. В течение последнего десятилетия наметился существенный прогресс в развитии электроразведочного аппаратурно-программного комплекса, и, прежде всего, для методов, использующих естественное электромагнитное поле Земли. В настоящей статье рассматривается подход различных компаний к построению многофункциональной электроразведочной аппаратуры. Именно многофункциональной, так как к аппаратуре для методов магнитотеллурического зондирования (МТЗ) и аудиомагнитотеллу-

рического зондирования (АМТ) предъявляются такие высокие технические требования, что она может быть успешно применена для регистрации сигналов искусственного источника электромагнитного (ЭМ) поля для целого ряда электроразведочных методов (ВП, ЗС, ЧЭЗ, ЧЭЗ-ВП и др.).

Аппаратурные разработки в области многофункциональной аппаратуры в последнее десятилетие. Решающее влияние на аппаратурные разработки оказало развитие микропроцессорной техники: миниатюризация электронных компонент, снижение энергопотребления электронных схем, появление на рынке быстродействующих 24-разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Первыми многоканальную аппаратуру для непрерывного магнитотеллурического профилирования на базе 24-разрядного АЦП разработали в 1995 г. австралийские геофизики (система Мимдас – MIMDAS). Эта система имеет много электрических каналов и только два горизонтальных магнитных канала.

Американские ученые из Калифорнии (компания EMI) в 1996 г. разработали многоканальную аппаратуру (20 каналов), которая включала только два горизонтальных магнитных канала и много двухканальных электрических предусилителей, что позволяло вести тензорные измерения электромагнитного поля для каждой точки. Другим достоинством этой аппаратуры была возможность вести работы по системе с удаленной базовой точкой, что значительно повышало качество полевых материалов и их помехоустойчивость. Все двухканальные приборы соединялись с центральным блоком проводами, и это делало систему довольно громоздкой. В таком оформлении она наследовала значительную часть недостатков австралийской системы.

Третьей компанией, которая в 1999 г. выбрала такой же способ компоновки аппаратуры, стала компания «Квонтек (Quantech)». В конфигурации полевой расстановки аппаратура «Титан» (Titan-24) имеет чередующуюся последовательность одно- и двухканальных электрических приемников и только два горизонтальных магнитных приемника. Все приемники вновь замкнуты на один центральный (управляющий и регистрирующий) блок, что делает систему громоздкой. Одна расстановка аппаратуры охватывает 2400 м профиля (шаг между приборами 100 м), чем обеспечивается достаточно высокая дневная производительность.

Совсем другую концепцию построения многофункциональной аппаратуры в 1996 г. предложила канадская компания «Феникс Джеофизикс Лтд» (патент США – US 6,191,587 B1). Комплект аппаратуры строится на неограниченном количестве пяти-, трех- и двухканальных независимых приборов, причем работа всех приборов с высокой точностью (около одной микросекунды) синхронизирована с помощью системы глобального позиционирования (GPS). Приборы – высокоавтоматизированные устройства, каждый из которых имеет только одну кнопку «включить-выключить». Программа работы приборов достаточно быстро и просто создается на съемной твердотельной флэш-памяти, на которую ведется и запись электромагнитных полей; записанная информация доставляется в полевой лагерь, где переносится на компьютер для обработки и интерпретации.

Эта же концепция (несколько пятиканальных и много двухканальных приборов) легко реализуется с использованием независимых модулей, однако в данном случае система становится более гибкой, обладает относительно небольшим весом и обслуживается небольшой полевой группой (в среднем три человека на пять приборов). Количество обслуживающего персонала изменяется в ту или иную сторону в зависимости от условий местности (возможности передвижения). Уже два прибора в системе обеспечивают высококачественные данные, что позволяет пользователю последовательно наращивать свою систему в соответствии с финансовыми возможностями и содержанием заказа на полевые работы.

Неудивительно, что мировой рынок принял вторую концепцию, и на сегодняшний день на компанию «Феникс Джеофи-

зикс» приходится около 90 % объема продаж. Сходной концепции в построении многофункциональной аппаратуры придерживаются компании «Метроникс» (Германия) и «Зонге» (США), и на их долю приходится остальные 10 % объема продаж.

Для дальнейшего развития системы с 2005 г. компания «Феникс Джеофизикс» приступила к выпуску телеметрической системы SSMT.net, основанной на многоканальных двухпроцессорных приборах V8 и трехканальных приборах RXU-3. Один V8 может управлять и снимать данные с 16 приборов RXU-3. Кроме того, прибор V8 оснащен высококачественным дисплеем и герметичной полной клавиатурой. Обе системы (SSMT-2000 и SSMT.net) могут работать синхронно при помощи GPS, т.е. могут быть применены совместно при проведении работ методами МТЗ и АМТЗ.

Что измеряем и чем жертвуем? Система со многими электрическими каналами и ограниченным числом магнитных каналов привлекательна и по стоимости (дешевле относительно дорогих магнитных датчиков), и по производительности (не тратится время на установку магнитных датчиков). Во многих случаях она успешно решает поставленные геологические задачи. Безусловно, технология измерений МТЗ по принципу «много электрических каналов и ограниченное число магнитных» является прогрессивной, однако она имеет пределы своего эффективного применения.

Возникает вопрос, что можно предложить, не теряя в производительности, для решения тех задач, для которых технология с многочисленными электроразведочными датчиками ($2E$) не является оптимальной. Такой подход есть: это измерение на каждой точке трех ортогональных магнитных компонент. Принципиальные вопросы в успешном применении этой технологии – это точность установки датчика для измерения вертикальной магнитной компоненты и производительность работ, так как закапывание датчиков в землю и точная их ориентировка – процесс весьма ответственный и совсем не быстрый.

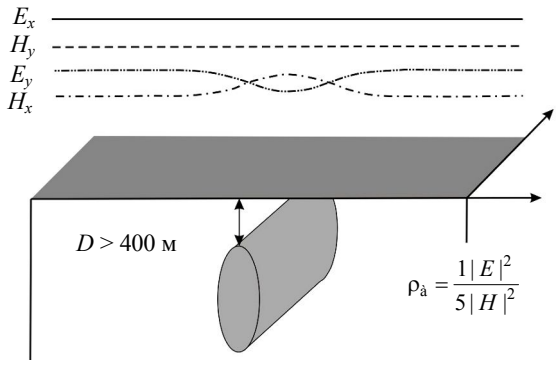


Рис.1. Основные компоненты электромагнитной аномалии над крутопадающим рудным телом

Как типичный пример геологических задач, для которых технология многих датчиков $2E$ не является оптимальной, можно рассмотреть двумерное рудное тело, залегающее на глубине 400 м. Над таким относительно проводящим объектом наблюдается отрицательная аномалия параллельной простиранию тела электрической компоненты и положительная аномалия ортогональной простиранию тела горизонтальной магнитной компоненты ЭМ-поля (рис.1).

Поскольку кажущееся сопротивление ρ_a пропорционально квадрату отношения ортогональных между собой электрической и магнитной компонент, аномалия ρ_a заметно ослабляется при нормировании аномального электрического поля на магнитное в сравнительно удаленной от эпицентра точке (что и происходит в системе со многими электрическими 2E-датчиками). При глубоком залегании проводящего объекта (рудное тело) аномалия в поперечном сопротивлении может не наблюдаться вовсе, а аномалия в продольном сопротивлении значительно ослабляется.

Таким образом, преимущества таких систем проявляются при решении некоторых геологических задач, как правило, для объектов неглубокого залегания, и выражаются в следующем:

– относительно невысокая стоимость одного канала;

– возможность применения одной расстановки приборов для работ и с естественным, и с искусственным источником поля;

– оперативность анализа регистрируемых данных.

С другой стороны, к производственным недостаткам системы кроме ограниченной чувствительности к глубинным объектам можно отнести следущее:

– значительная масса кабелей, большая численность обслуживающего персонала;

– длительное время перестановки приборов;

– очень слабая информация об изменении горизонтальных компонент магнитного поля и полное ее отсутствие – о характере изменения вертикальной магнитной компоненты электромагнитного поля;

– сложность проведения работ в условиях пересеченного рельефа, а также в густонаселенной местности;

– сложность заземления в зимний период и при проведении работ на скальных породах и других высокоомных монолитных породах;

– уязвимость протяженных кабелей для повреждений (животные, техника и т.п.) и сильные помехи в кабельной системе от грозовых разрядов;

– необходимость регулярной сети профилей для локализации аномалий в пространстве.

Опыт работ с аппаратурой компании «Феникс» за последние годы, а также результаты проведенного математического моделирования показали высокую эффективность использования измерений трех ортогональных компонент магнитного поля для решения задач геологического картирования и поисков полезных ископаемых. Функции отклика, вычисляемые по этим данным (типпер и индукционный вектор), оказались очень чувствительны к локальным объектам с удельным электрическим сопротивлением, отличающимся от сопротивления вмещающей их толщи.

Собственно, этот факт давно известен и освещен во многих публикациях, однако в предшествующие годы он был использован главным образом при региональных глубинных исследованиях. Две основные сложности его реализации: более высокая стоимость канала, длительное время установки магнитных датчиков (особенно в зимних условиях и на скальных грунтах), – оказались легко преодолимы путем использования специальных прецизионных треног для установки магнитных датчиков электромагнитного поля.

Эти треноги изготавливают из высокопрочного термо- и морозостойкого пластика. При использовании качественных пузырьковых и цифровых уровней точность ориентировки магнитных датчиков, установленных в треногах, составляет соответственно 0,3-1,0 и 0,1-0,01°. Стоимость такой трехосной треноги фабричного производства составляет 15-20 % от стоимости трех магнитных датчиков, а производительность полевых работ с их применением увеличивается в несколько раз. При этом, благодаря точности установки и термостабилизации датчиков, значительно возрастает эффективность решения геологических задач. В конечном итоге стоимость одной точки трехкомпонентных магнитных ($3H$) измерений оказывается вполне сопоставимой со стоимостью точки одно- двухканальных электрических ($1E$-$2E$) измерений, а при зимнем проведении работ – даже значительно дешевле. Так, бригада из двух человек, обслуживающая два комплекта аппаратуры (два регистратора, две батареи, две треноги, шесть магнитных датчиков) может отрабатывать от 10 до 30 точек в день (в зависимости от шага съемки и условий местности) в диапазоне измерений 11000-0,3 Гц.

Существенным преимуществом использования индукционных векторов является возможность получить направление на аномальный объект уже после проведения ограниченного числа наблюдений, с последующим переходом к детализации на ограниченной площади. Таким образом, значительно сокращаются затраты времени и средств на поисково-разведочные работы и регулярная сеть поисковых профилей в этом случае не требуется.

Применение аппаратуры «Феникс» при трехкомпонентных магнитных съемках (естественное электромагнитное поле Земли). Рассмотрим следующие примеры:



Рис.2. Положение трубок взрыва в поле кажущегося сопротивления (изоаномалы ρ_a) в поле индукционных векторов (реальная часть) на частоте 1000 Гц аномального магнитного поля (площадь Хатат)

1. Картирование трубок взрыва, проведенное компанией «Нордвест» (Москва) на полигоне Хатат, в Якутии, на лицензионной площади компании «АЛРОСА» (рис.2). Построенные согласно конвенции Визе индукционные векторы четко фиксируют наличие двух трубок, выполненных туфами (ранее установленных бурением), причем южная из них проявлена гораздо отчетливее.

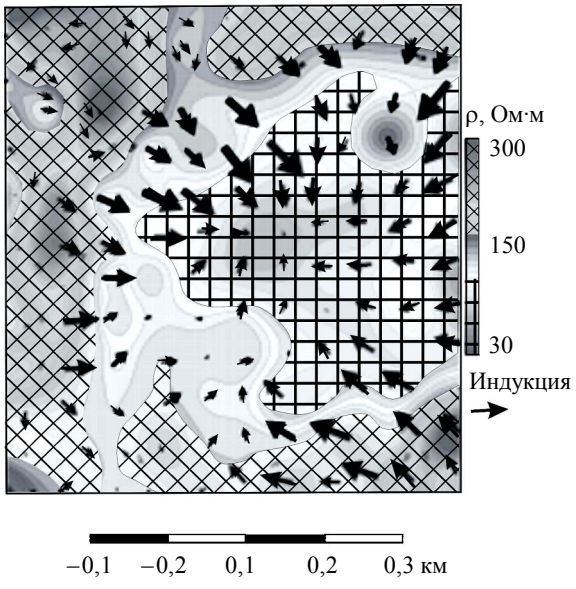


Рис.3. Локальная аномалия электромагнитного поля над залегающей на глубине кимберлитовой трубкой

2. Поиски кимберлитовых трубок методом трехкомпонентной магнитной съемки (3*H*), выполненные компанией «Нордвест» на лицензионной площади Центрального геолого-разведочного института в Архангельской области (рис.3). Ориентация индукционных векторов отчетливо локализует площадь с низкоомным аномальным объектом в коренных породах. Векторы построены согласно алгоритму конвенции Паркинсона и направлены на проводник. Последующим бурением на этой аномальной площади открыта новая перспективная кимберлитовая трубка, причем в Архангельской области впервые за последние 15 лет.

3. Применение высокоточного метода вызванной поляризации (ВП) с аппаратурой MTU (система SSMT-2000) над известными кимберлитовыми трубками в Якутии. Данная аппаратура не позволяет оперативно получить результат в точке измерений: требуется перезапись и обработка полевых данных в компьютере. Предпочтение ей было отдано в связи с требованием высокой точ-

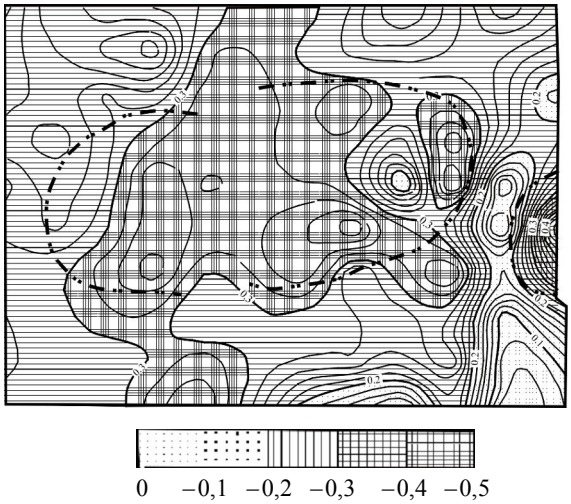


Рис.4. Локализация кимберлитовых трубок высокоточным методом ВП с использованием системы SSMT-2000



Рис.5. Аппаратурный комплекс пятого поколения: *а* – прибор V8; *б* – трехканальный прибор RXU

ности работ (рис.4). Фазовый параметр: возбуждение АБ2; компонента Еу; частота 0,61 Гц. Точность вычисления дифференциального фазового параметра по результатам повторных наблюдений составила 0,01º. Над трубками взрыва наблюдаются отчетливые малоамплитудные аномалии ВП. Это, согласно исследованиям российских ученых, увеличивает вероятность того, что данные трубки являются алмазоносными.

Приведенные примеры показывают, что аппаратура MTU (SSMT-2000) позволяет успешно выделять слабоконтрастные по удельному электрическому сопротивлению и вызванной поляризации объекты при работах как с использованием естественных полей, так и с контролируемым источником электромагнитного поля.

Дальнейшее развитие многофункциональной аппаратуры пятого поколения. Кроме расширения частотного диапазона, повышения точности измерений и улучшения условий эксплуатации известной системы SSMT-2000 компания «Феникс» продолжила разработки в дальнейшем развитии системы. Усилия были направлены на реализацию преимуществ обоих подходов при конструировании аппаратуры пятого поколения. В результате была разработана телеметрическая система на базе прибора V8 как центрального базового прибора и серии двух или трех трехканальных приборов RXU (рис.5). Последние могут быть приемниками-регистраторами двух или трех электрических каналов или трех магнитных каналов. Прибор V8 имеет цветной дисплей, герметичную клавиатуру, два процессора.

Один процессор ведет регистрацию данных, второй – обеспечивает связь с другими приборами, обмен данными, обработку собственных данных и данных других приборов, входящих в систему. Оба варианта аппаратуры пятого поколения, выпускаемой компанией «Феникс», полностью совместимы и могут работать совместно. Синхронизация обеих систем осуществляется с помощью GPS.

Выводы

1. С начального этапа конструирования многофункциональной аппаратуры пятого поколения – в 90-х годах прошлого века, определились два принципиальных подхода:

– системы, включающие центральный блок, соединенные с ним кабелями выносные приборы и многочисленные электрические каналы, имеют два горизонтальных магнитных канала и не определяют вертикальную составляющую магнитного поля;

– независимые пяти-, трех- и двухканальные приборы, синхронизированные с помощью GPS, позволяют реализовывать

гибкую конфигурацию системы с оптимальным количеством электрических и магнитных регистрирующих каналов.

Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки. Последняя разработка компании «Феникс» – телекоммуникационная система SSMT.net позволяет реализовать преимущества обоих подходов.

2. Опыт последних лет показал, что наиболее эффективна методика поисковой электроразведки, основанная на измерении трех ортогональных составляющих естественного магнитного поля Земли. Кроме существенных преимуществ в решении геологических задач эта технология обеспечивает высокую производительность полевых работ и возможность эффективно проводить их в условиях, сложных для устройства электрических заземлений. Широкому применению этой технологии в последние годы способствовало появление на рынке аппаратуры прецизионных треног, позволяющих быстро и с высокой точностью выполнять в точке измерений подготовительные и заключительные операции.