

Несомненно, карта углов склона — это эскиз итоговой карты, требующий дальнейшей внимательной «ручной» доводки с учетом всех факторов влияния, но общий облик будущей карты представлен вполне отчетливо. Итоговым документом с дополнениями других аспектов ландшафтов является карта районирования территории по условиям применения геохимических методов поисков на ландшафтно-геоморфологической основе.

Карта районирования состоит из трех слоев: базисного, слоя с дискретными ландшафтно-геоморфологическими группами ландшафтов и итогового слоя с возможностью применения того или иного геохимического метода поисков.

В качестве базиса служит топографическая карта или карта изогипс, являющаяся предметом анализа. Существенно облегчает решение последующих задач геоморфологическая схема с выделением линии водоразделов и тальвегов водотоков, а в случае наличия троговых экзарационных долин — построение линий бровок плеча трога.

На рис. 13, 14 приведен фрагмент карты районирования с вариантом легенды, принятой для обоснования постановки работ (столбец «Прогнозируемые объемы пробоотбора» относится не к представленному фрагменту карты, а к ее полному варианту).

Таким образом, карта районирования территории по условиям применения геохимических методов является одним из основных документов геохимических поисков на каждом этапе их ведения, определяя правомочность постановки, выбор метода, объемы финансирования и и оценку достоверности полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. — М., 1983.
2. Каждан, А.Б. Методологические основы поисков и разведки полезных ископаемых / А.Б. Каждан. — М.: Недра, 1984. — 272 с.
3. Щукин, И.С. Общая геоморфология / И.С. Щукин. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. Т. 1. — 616 с.; 1964. — Т. 2. — 564 с.; 1974. — Т. 3. — 384 с.

© Галюк С.В., Менчинская О.В., 2020

Галюк Сергей Владимирович // svgalouk@mail.ru
Менчинская Ольга Всеволодовна // menchinskaya55@mail.ru

ГЕОФИЗИКА

УДК 55.550.370

Приходько А.Ю., Багрянский А.А. (Expert Geophysics Limited, Канада)

АЭРОЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ГЛУБИННОЕ КАРТИРОВАНИЕ

*В период проведения поисковых и тестовых съемок аэроэлектроразведочная технология MobileMT, основанная на естественных электромагнитных полях, доказала свою эффективность в широком диапазоне геоэлектрических и геоморфологических условий. Результаты, представленные в данной статье, демонстрируют основные преимущества этой технологии перед другими методами и принципами измерений электрических свойств горных пород с воздуха и ее возможности в решении задач геоэлектрического картирования и поисковой геологии. **Ключевые слова:** аэрогеофизика, электроразведка, магнитотеллурика, поиски, МПИ.*

Prikhodko A.Yu., Bagryanskiy A.A. (Expert Geophysics Limited, Canada)

AEROELECTROMAGNETIC DEPTH MAPPING

The exploration effectiveness of the airborne electromagnetic technology, MobileMT, based on natural fields, confirmed in a wide range of geoelectric and geomorphological conditions

*during test and commercial surveys. The results presented in the paper demonstrate many advantages of the technology over other methods and principles for measuring the electrical properties of rocks from the air and its capabilities in geoelectrical mapping and exploration geology. **Keywords:** airborne geophysics, electromagnetics, magnetotellurics, mineral exploration.*

Введение

Привлекательность аэроэлектромгнитных систем с целью геоэлектрического картирования и решения поисковых задач связана, прежде всего, с возможностью относительно быстрых исследований больших территорий, включая как недостаточно исследованные и труднодоступные, так и исторически известные и развитые рудные районы, но на новом технологическом уровне [3]. Вслед за требованиями горной промышленности техническое развитие аэроэлектроразведочных технологий идет в направлении увеличения глубинности исследований. В частности, частотные методы или методы гармонических полей (frequency-domain), в большинстве своем развиваемые и используемые в мировой практике в 1970–1990-х годах, обеспечивали глубинность исследований 100–150 м с некоторыми вариациями в зависимости от геоэлектрической обстановки. Активно развивающиеся в последние 20 лет аэроэлектроразведочные системы метода переходных процессов (МПП, ТЕМ или time-domain) призваны обеспечить

многократное увеличение глубинности исследований относительно метода гармонических полей, что в действительности реализуется, но в тесной зависимости от найденных технических решений в каждой конкретной системе [4, 6]. Оба этих направления относятся к методам с контролируруемыми источниками питающего поля. Третьим направлением с самой большой глубиной исследований является семейство метода AFMAG (Audio Frequency Magnetics), основанного на использовании естественного электромагнитного поля Земли в качестве питающего [14, 1, 12]. Этот метод преодолевает ограничения мощности искусственно возбуждаемых полей и обеспечивает глубину исследований, в несколько раз превышающую пределы систем МПП при любых геоэлектрических условиях.

Аэроэлектроразведочная технология MobileMT

Одной из последних разработок в области «пассивных» аэроэлектромагнитных методов, то есть основанных на естественном поле в качестве питающего, является технология MobileMT (Expert Geophysics Limited), в которой реализована непрерывная регистрация переменного магнитного поля в воздухе вдоль съемочных линий с одновременной регистрацией переменного электрического поля в базовой точке на земле [12, 7] (рис. 1). Данная технология работает в аудиочастотном диапазоне естественных электромагнитных полей 26 Гц — 20 кГц (ELF+VLF по классификации ITU), что наряду с геоэлектрическими условиями и определяет диапазон глубины исследований от поверхности до 1 км и более.

Эффективность, возможности и преимущества технологии MobileMT демонстрируются решением прямых задач и рядом практических примеров в различных геоэлектрических условиях, приведенных ниже.

Измерения и обработка данных

Одна из возможных измерительных схем естественных переменных электромагнитных полей в аудиочастотном диапазоне с воздуха, которая и реализована в технологии MobileMT, представлена на рис. 2.

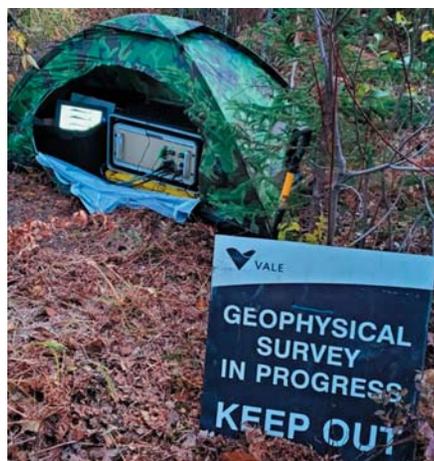


Рис. 1. MobileMT базовая станция регистрации электрического поля (слева), подвесная измерительная система магнитного поля (справа)

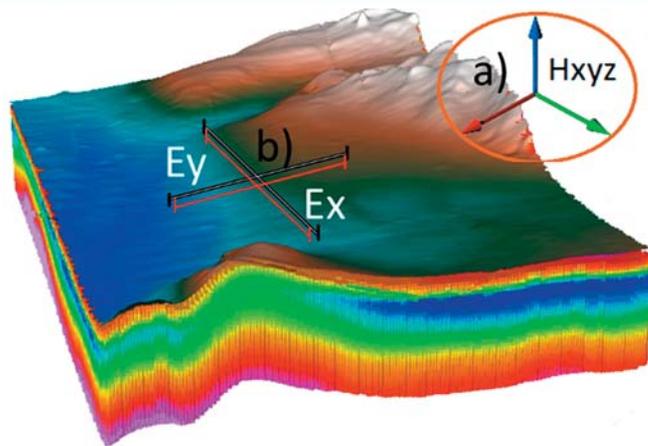


Рис. 2. Схема измерений MobileMT: а — подвесной трехкомпонентный ресивер магнитного поля H_{xyz} ; б — измерительные линии наземной базовой станции для регистрации электрического E_{xy} сигнала и эталона

Теллурические токи, индуцированные естественным электромагнитным полем Земли в геологическом полупространстве, измеряются на поверхности с помощью двух ортогональных пар заземленных электрических линий (базовая станция, рис. 2б). Каждая компонента электрического поля на базовой станции регистрируется парой независимых линий. Измерения одной из параллельных линий называются «сигнал», а другой — «эталон». Взаимная обработка данных «сигнал-эталон» позволяет эффективно исключить искажения, связанные со смещением сигналов [10]. Эти данные базовой станции синхронизируются с данными магнитных компонент, измеренных в воздухе. Подвесная измерительная система в воздухе (рис. 2а) регистрирует вариации переменного магнитного поля вдоль съемочных линий, тогда как электрическая базовая станция (рис. 2б) остается неподвижной.

Результирующим параметром взаимной обработки воздушных и наземных данных является кажущая проводимость для ряда частотных окон в общем диапазоне 26 Гц—20 кГц. Временные серии данных H (магнитного) и E (электрического) полей, полностью синхронизированные и оцифрованные с частотой 74 кГц, конвертируются из временной в частотную область с помощью преобразований Фурье. Сигналы двух горизонтальных электрических компонент, а также трех взаимно ортогональных магнитных компонент обрабатываются с помощью линейных функциональных соотношений между составляю-

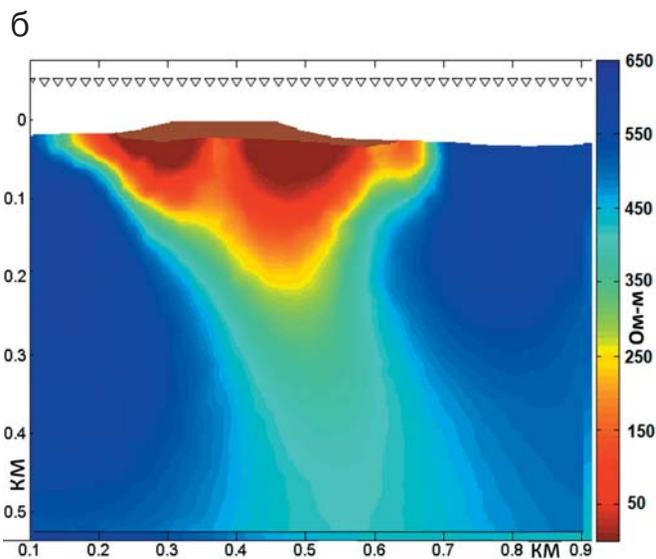
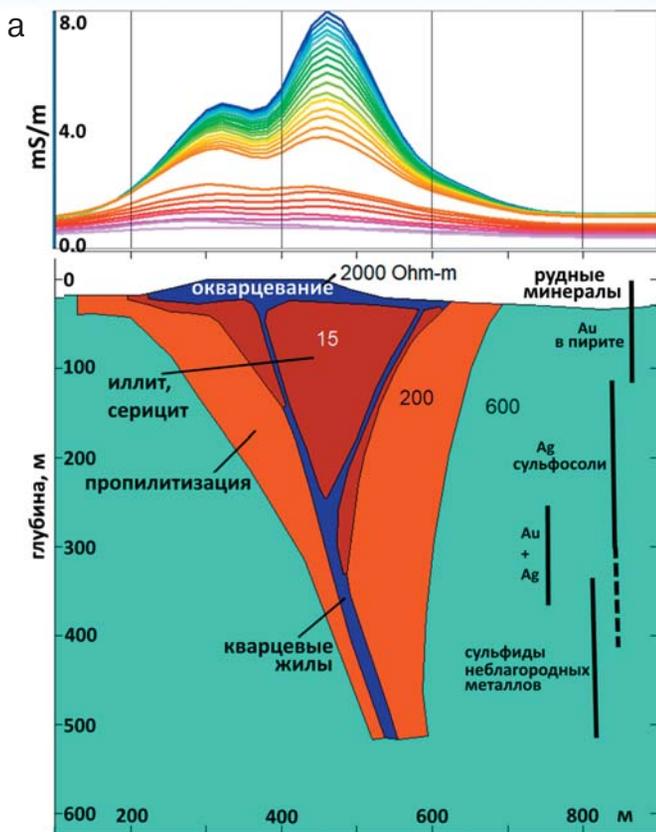


Рис. 3. а — расчетные кривые кажущейся проводимости для частот MobileMT от геоэлектрической модели эпитермального золоторудного месторождения (модель по [13]); б — результат инверсии расчетных данных с учетом мощности и сопротивления шапки зоны окварцевания

щими магнитотеллурического поля, выражающих линейные связи между компонентами электрического и магнитного полей. Эти взаимосвязи выражаются соответствующими матрицами адмитансов, обратным импедансам, используемым в обработке данных наземного магнитотеллурического метода [2]. Кажущаяся проводимость в единицах мС/м, как результирующий параметр геоэлектрического картирования MobileMT, вычисляется путем модульного расчета определителей матриц как инвариантных параметров вращения [7].

Инверсии данных и прямое моделирование

На первой стадии анализа и интерпретации MobileMT данных используется одномерная нелинейная итерационная инверсия методом наименьших квадратов. Алгоритм инверсии основан на методе сопряженных градиентов с адаптивной регуляризацией [2]. Этот алгоритм использует весовые функции инвертируемых параметров. Соответственно чувствительность данных к удельному электрическому сопротивлению каждого конкретного

слоя независима от глубины его залегания, и соответственно разрешаемая способность инверсий практически не меняется с глубиной. Данные, измеренные в каждой точке вдоль линий съемки, подвергаются инверсии, которая обеспечивает оперативной информацией о распределении удельного электрического сопротивления с глубиной. Кроме этого, данные инверсии используются для оценки и контроля качества измеренных данных, уровней шума, если он присутствует в конкретных частотных окнах, и в



Рис. 4. Пространственное положение двух представленных типов месторождений в бассейне Атабаска (по [5])

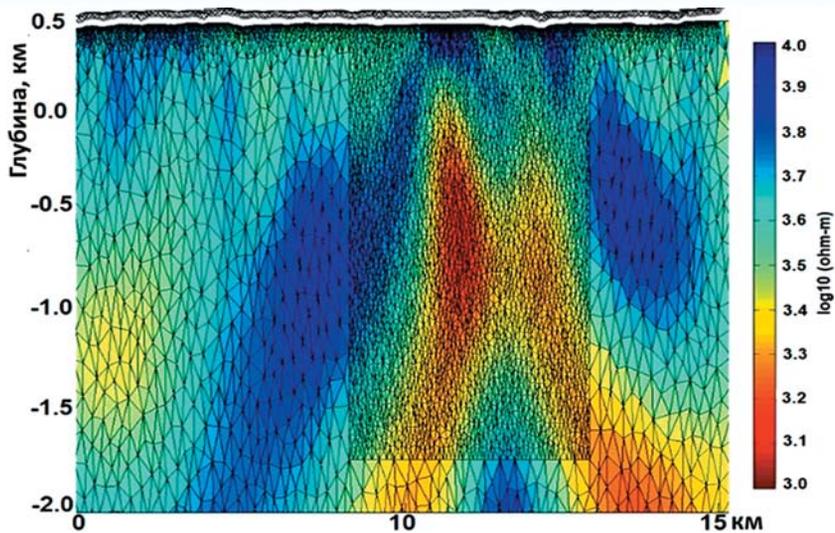


Рис. 5. Разрез удельного электрического сопротивления MobileMT по линии на краевой части бассейна Атабаска (инверсия MARE2DEM с неструктурированными адаптивными сетками конечных элементов)

целом на кривых кажущейся проводимости точек зондирований.

Следующая стадия интерпретации данных включает детальные и целенаправленные инверсии с использованием программного кода MARE2DEM, основанного на адаптивном, регуляризационном алгоритме конечных разностей [8]. Используемые в MARE2DEM неструктурированные адаптивно настраиваемые сетки конечных элементов [9] высокоэффективны для работы со сложными структурами и локальными объектами (пример на рис. 5).

Инверсии MobileMT данных также могут выполняться с учетом априорно известной информации, что позволяет значительно снизить неоднозначность решения обратных задач и получать более точные результаты. Для иллюстрации этого ниже представлен пример синтетических данных MobileMT и их инверсий с учетом знаний о мощности и сопротивлении верхнего слоя зоны окварцевания (рис. 3).

Полевые примеры

Представленные и анализируемые в статье полевые примеры взяты из коммерческих и тестовых съемок MobileMT.

Бассейн Атабаска, Саскачеван, Канада

Два примера из ураноносного бассейна Атабаска демонстрируют эффективность технологии MobileMT при поисках

структурных и минеральных ассоциаций урановых месторождений различной морфологии и на различной глубине, в краевой (1) и центральной (2) частях бассейна. Месторождения урана в краевой части бассейна приурочены к субвертикальным структурам во вмещающих породах кристаллического фундамента (рис. 4 (1)). Внутри бассейна месторождения перекрыты мощным чехлом песчаников и главным образом пространственно относятся к несогласному контакту между песчаниками и породами кристаллического фундамента (рис. 4 (2)).

Съемочная линия, разрез сопротивления по которой представлен на рис. 5, пересекает электропроводящий структурный коридор на границе бассейна Атабаска. Примеры таких урановых месторождений, приуроченных к структурам краевой, пограничной части бассейна, показаны на рис. 4 (1). Породы кристаллического фундамента являются относительно высокоомными, что позволяет с технологией MobileMT получать информацию до глубины порядка 2,5 км. Этот пример демонстрирует возможность измерительной системы MobileMT детектирования на глубине не только сильных проводников, но и относительно слабых разностей сопротивлений в диапазоне и на фоне тысяч Ом·м, что важно для многих поисковых приложений, при которых необходимо картирование метасоматических зон и связанной с ними рудной минерализации.

Пример, представляющий случай 2 на рис. 4, приведен на рис. 6. Как видно из этого примера, MobileMT

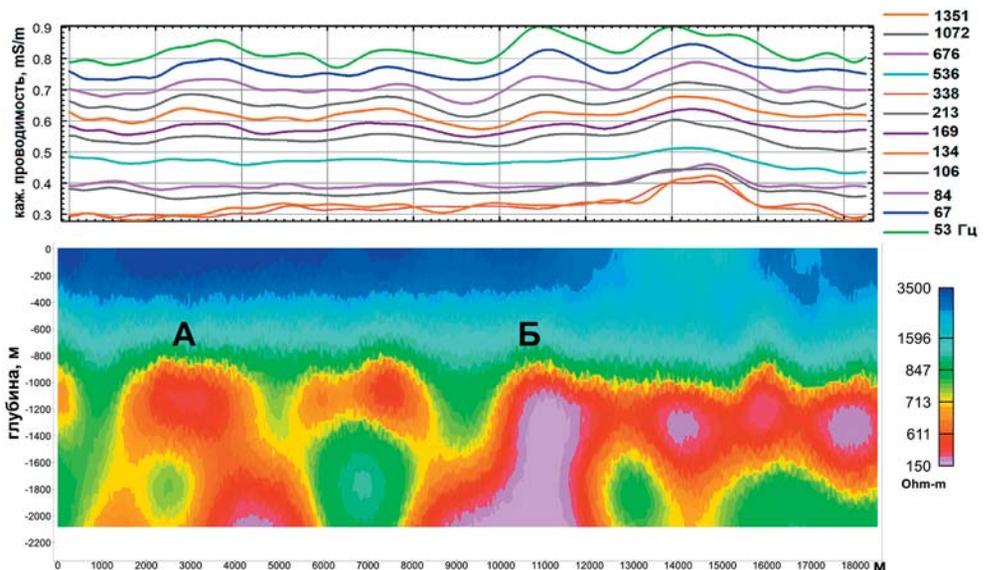


Рис. 6. Съемочная линия над месторождением Shea Creek в бассейне Атабаска: сверху — график кажущейся проводимости MobileMT; внизу — разрез удельного электрического сопротивления MobileMT (2D инверсия); А — зона Кларк Лейк, Б — зона Кианна

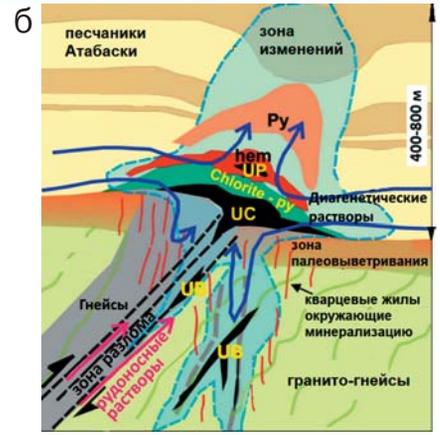
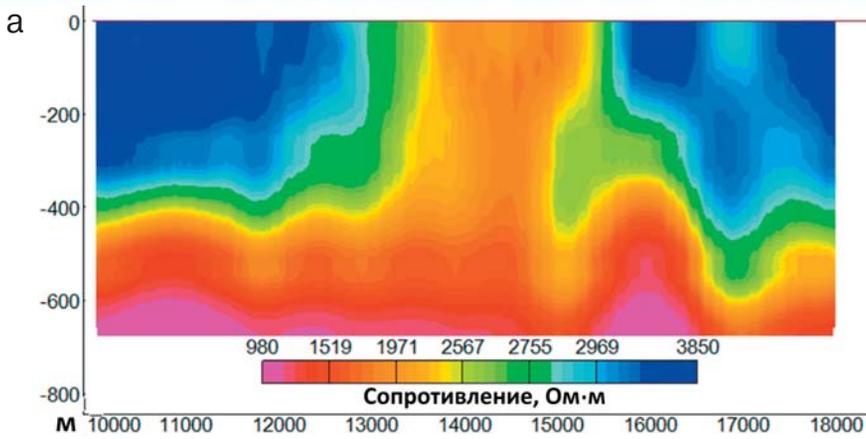


Рис. 7. Увеличенная часть MobileMT разреза по части линии рис. 6 в пределах мощности песчанников (слева). Обобщенная схематическая геологическая модель месторождения Shea Creek (справа, по [11]). UC — U минерализация типа несогласия, UP — U минерализация в надрудной зоне изменений, UB — U минерализация в породах фундамента

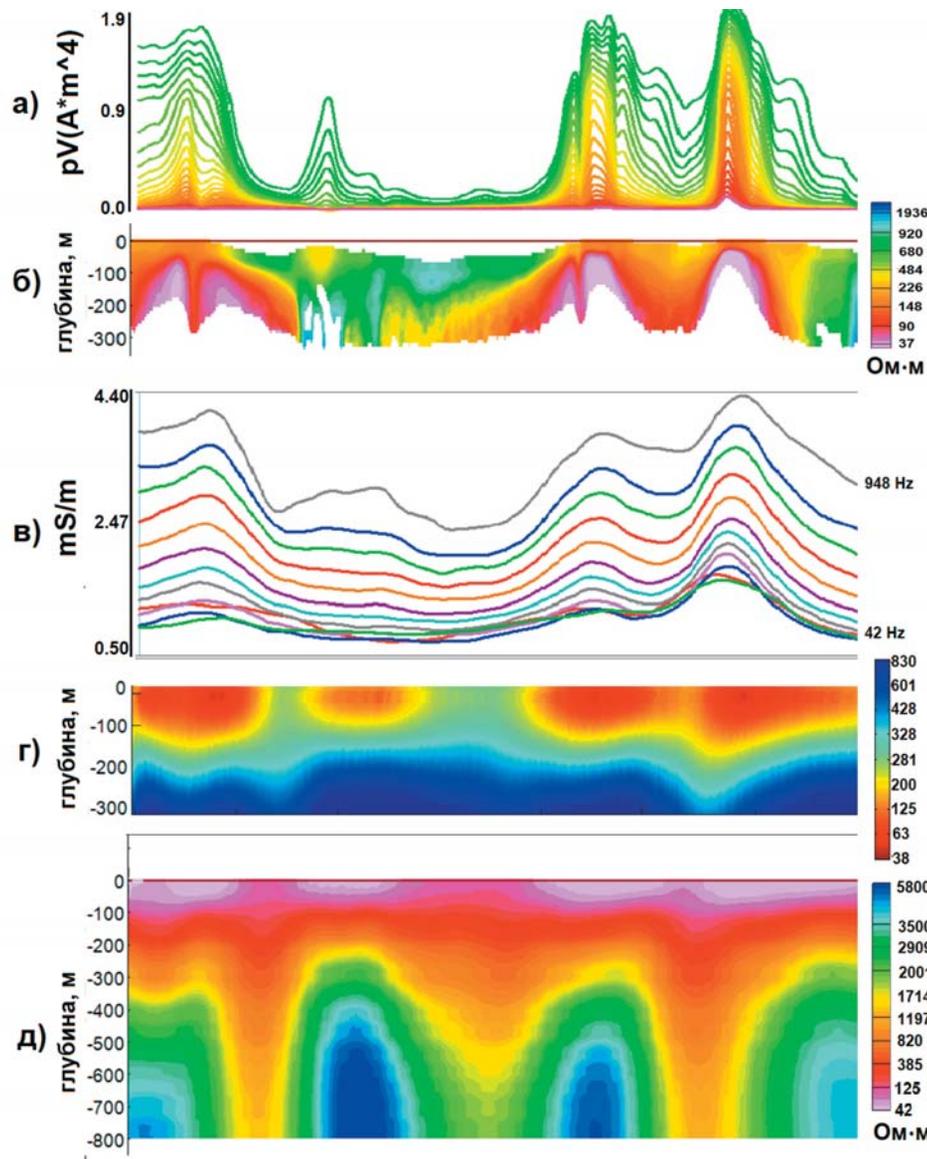


Рис. 8. Сравнительные МПП и MobileMT данные вдоль линии 7540, уч. Кокрейн: а — dV/dt графики МПП данных; б — разрез сопротивлений МПП; в — MobileMT графики кажущихся проводимостей; г — разрез сопротивлений MobileMT до глубины 300 м; д — разрез сопротивлений MobileMT до глубины 800 м

на всем протяжении линии надежно детектирует: а) горизонтальный контакт несогласия толщи песчанников с подстилающими породами кристаллического фундамента, на глубине ~600–700 м; б) зоны уранового оруденения, связанного с графитовой минерализацией на этом контакте и в тектонических зонах фундамента; в) неоднородности сопротивлений в высокоомных песчанниках, связанные с надрудной зоной хлорит-глинистых изменений (рис. 7).

Район Кокрейн (сев. Онтарио, Канада)

На Broken Evil поисковой площади, перспективной на VMS-Au тип минерализации, в прошлом была проведена аэросъемка системой, основанной на принципе МПП. Тестовая съемка MobileMT выполнена по нескольким линиям, совпадающим с предыдущей съемкой. Sattel и др. [12] отмечают прекрасную сходимость между картами, полученными из обоих наборов данных. Тем не менее имеют место и существенные отличия между ними. Графики данных и разрезы сопротивлений обоих методов по одной и той же линии наблюдений изображены на рис. 8.

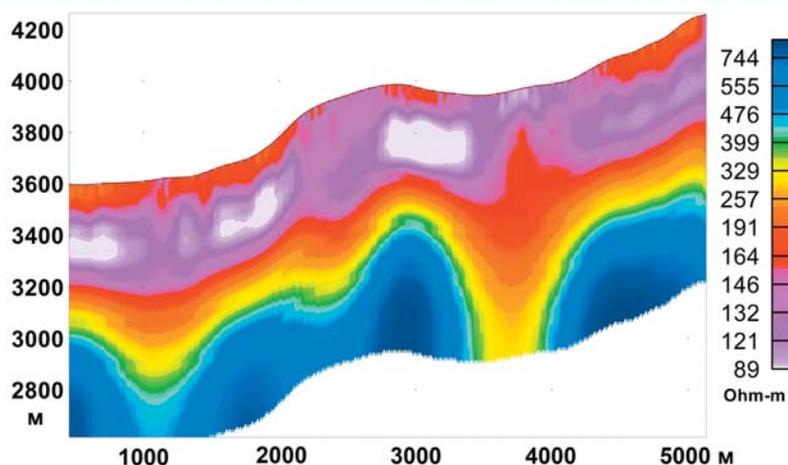


Рис. 9. Разрез удельного электрического сопротивления MobileMT вдоль линии, пересекающей золоторудную структуру в Центральной Азии, Тянь-Шанский металлогенический пояс

Как следует из сравнительного анализа, MobileMT данные, кроме близповерхностных локальных проводящих объектов, отражают и глубинные структурные проводники, которые не видны на МПП данных из-за ограниченной глубинности исследований. Геологически хорошо проводящие объекты в пределах первых 100 м глубины интерпретируются как VMS минерализация [12], но новые данные MobileMT указывают также на возможное наличие подводящих рудоносных растворов структур.

Тянь-Шанский металлогенический пояс

Следующий MobileMT пример демонстрирует возможности работы технологии в присутствии мощного, до 400 м, экранирующего, электропроводного слоя (рис. 9). Как видно из геоэлектрического разреза MobileMT картирует менее проводящую структуру на глубине под этим слоем, а также дифференцирует особенности распределения сопротивлений внутри него. Кроме способности геоэлектрической дифференциации в широком диапазоне сопротивлений этот пример демонстрирует информативные возможности технологии в условиях сильно пересеченного рельефа и соответствующие требования безопасности полетов в течение съемки.

Заключение

Как показывает практический опыт, аэроэлектромагнитная технология MobileMT преодолевает целый ряд ограничений, присущих предшествующим методам и принципам геоэлектрического картирования с воздуха. Основные преимущества и возможности MobileMT включают:

- глубинное картирование электрического сопротивления геологической среды в присутствии экранирующих электропроводных перекрывающих толщ;

- глубинность исследований, превышающая возможности аэроэлектромагнитных методов с контролируемыми источниками первичного поля;

- картирование геоэлектрических границ любого направления, от вертикальных до горизонтальных;

- детектирование как протяженных, так и локальных неоднородностей сопротивлений на глубинах от десятков метров до более 1 км;

- дифференцирование неоднородностей как в области высоких сопротивлений, так и в области высоких проводимостей;

- получение информативных данных в сильно пересеченном рельефе при соблюдении требований безопасности полетов.

Прямое сравнение данных MobileMT с данными системы метода переходных процессов демонстрирует отличие между этими принципами измерений и преимуществами технологии MobileMT.

ЛИТЕРАТУРА

1. Багрянский, А.А. Аэроэлектромагнитная технология ZTEM для глубинного изучения недр / А.А. Багрянский, А.Ю. Приходько, Н. Бурнас, Ж. Лего // Разведка и охрана недр. — 2015 — № 5. — С. 36–41.
2. Жданов, М.С. Геофизическая электромагнитная теория и методы / М.С. Жданов. — М.: Научный мир, 2012. — 680 с.
3. Приходько, А.Ю. Глубинные аэроэлектромагнитные технологии — эффективное средство активизации ГРП на Северо-Востоке России / А.Ю. Приходько // Золото и технологии. — 2016. — № 3(33). — 13 с.
4. Приходько, А.Ю. Аэроэлектроразведка: возможности, состояние и перспективы / А.Ю. Приходько // Разведка и охрана недр. — 2005. — № 12. — С. 73–79.
5. Ainsworth, G. Arrow: a rapidly growing uranium discovery: / G. Ainsworth, G. McNamara and A. Engdahl // Saskatchewan Geological Open House, 2015.
6. Allard, M. On the origin of HTEM Species: / M. Allard. In «Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration» edited by B. Milkereit, 2007. — p. 387–398.
7. Bagrianski, A. AFMAG evolution — expanding limits: / A. Bagrianski, P. Kuzmin, and A. Prikhodko: 16th Biennial Conference, SAGA, Extended Abstracts, 2019. — p. 1–4.
8. Key, K. A parallel goal-oriented adaptive finite element method for 2.5-D electromagnetic modelling: / K. Key, J. Oval // Geophysical Journal International. — 2011. — № 186(1). — p. 137–154.
9. Key, K. Marine EM inversion using unstructured grids: a 2D parallel adaptive finite element algorithm / K. Key: 82nd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2012. — p. 1–5.
10. Labson, V.F. Geophysical exploration with audiofrequency natural magnetic fields / V.F. Labson, A. Becker, H.F. Morrison, U. Conti // Geophysics. — 1985. — № 50, no. 4. — p. 656–664.
11. Rhys, D. Geology of the Shea Creek uranium deposits: an expanding uranium district in the Western Athabasca Basin / D. Rhys, E. Sierd, Luke van der Meer // Saskatchewan Geological Survey Open House, 2010.
12. Sattel, D. A brief analysis of MobileMT data / D. Sattel, K. Witherly, V. Kaminski: 89th Annual Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 2019. — p. 2138–2142.
13. Williams, P.K. Towards a Multidisciplinary Integrated Exploration Process for Gold Discovery / P.K. Williams. In «Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration» edited by A.G. Gubins, 1997. — p. 1015–1028.
14. Ward, S.H. AFMAG — airborne and ground / S.H. Ward // Geophysics. — 1959 — v. 24. — p. 761–787.

© Приходько А.Ю., Багрянский А.А., 2020

Приходько Александр Юрьевич // alexander@expertgeophysics.com
Багрянский Андрей Александрович // andrei@expertgeophysics.com