

Применение аэрогеофизики в зоне Центрально-Африканского разлома, на золоторудных месторождениях в Иркутской области (Сухой Лог, Урях) и в Якутии

В.М. Керцман
Е.В. Мойланен
Ю.Г. Подмогов

Введение

Современная аэрогеофизика обеспечивает высокую рентабельность и производительность (порядка 1000 км² в месяц, масштаб съемки 1:10000). Сегодня навигация летательных аппаратов позволяет удовлетворять требованиям аэросъемки в масштабе 1:5000 [2], выполняя съемку даже в горной местности (рис. 1). Одновременно возможно измерение электромагнитного, магнитного полей, гамма-спектрометрии или магнитного и гравитационного полей [9]. Аэрогравиметрия выполняется для средне- и мелкомасштабной съемки на постоянной GPS высоте и выявления структур с поперечными размерами не менее нескольких километров [9]. Для локализации рудных объектов используется первый вариант аэрогеофизического комплекса.

В таких комплексах ведется измерение магнитного поля каждые 2 м, электромагнитные зондирования как во временной, так и частотной областях измеряются каждые 7 м, до глубины 400 м, осуществляется регистрация спектров гамма-излучения каждые 40 м. Точность современной съемки составляет порядка нескольких процентов по определению удельных сопротивлений, 1–2 нТл для магниторазведки, по гамма-спектрометрии для среднемировых содержаний [4] порядка десятой доли процента для К,

Демонстрируются возможности современной аэрогеофизики для решения рудных задач.

С использованием новых алгоритмов инверсии были построены геоэлектрические разрезы, которые хорошо согласуются с данными каротажа до глубины 400 м. Показано сравнение аэро и наземных гамма-спектрометрических и электроразведочных данных. Демонстрируется, что современная аэрогеофизика позволяет получить достоверную информацию о геометрии границ даже слабоконтрастных в геофизическом плане геологических объектов.

Ключевые слова: аэрогеофизика, золото, медь, электроразведка, магниторазведка, гамма-спектрометрия.

до 1 ppm по U и Th. Спектрометры с NaI(Tl) сцинтилляторами объемом 32 л (на вертолете Eurocopter AS350B3) или 48 л (Ми-8) имеют энергетическое разрешение по линии 662 кэВ (¹³⁷Cs) не хуже 9 %.

Рассмотрим несколько примеров аэрогеофизических данных.

Центрально-Африканский разлом

В 2016–2017 гг. была выполнена аэрогеофизическая съемка всей территории Руанды [8]. Было выделено два десятка перспективных областей. Более подробно рассмотрим один из них.

Участок находится в префектуре Gikongoro в верхнем течении реки Mwego. На геологической карте в пределах участка находятся два интересных объекта.

Первый — «подковообразная» интрузия основного состава (долериты, диабазы). По данным магнитометрии и спектрометрии тело долеритов характеризуется типичными для этих пород физическими характеристиками — они сопровождаются магнитными аномалиями и минимальными концентрациями радиоактивных элементов (РАЭ). Однако, в данном случае, эти же породы характеризуются аномально

низкими сопротивлениями. Типичными для долеритов и подобных им пород являются сопротивления в диапазоне от 1 тыс. до 3 тыс. Ом·м. В нашем случае в пределах геологического контура долеритов фиксируется контрастная аномалия низких сопротивлений со значениями 50–120 Ом·м. Геоморфологические и геологические особенности участка позволяют предположить наличие полого секущего силла дифференцированных долеритов с интенсивной сульфидной минерализацией, выходящего на дневную поверхность на склонах речных долин. Расчёты показывают, что мощность этого проводника ограничена по вертикали до 50–60 м. С данным телом связана рудная минерализация Cu, Ni и МПГ.

Второй — массив кварцитов изометричной формы размером порядка 4 км. Все аналогичные многочисленные массивы кварцитов, обозначенные на геологической карте (рис. 2), в пределах района, отличаются контрастными и стабильными петрофизическими характеристиками. У них наблюдается отсутствие даже слабых магнитных аномалий, очень высокие сопротивления и предельно низкие концентрации РАЭ (особенно калия). Массив кварцитов, обозначенный на геологической карте, пространственно совпадает со сложной положительной магнитной аномалией и относительно повышенными концентрациями калия (до 3%), что не соответствует типичным характеристикам кварцитовых тел района. В пределах участка типичным характеристикам удовлетворяют только две локальные изометричные области высокого сопротивления существенно меньшего размера — 1,5 и 1 км. По контактам этих высокоомных областей и в общем контуре интенсивных магнитных аномалий фиксируется интенсивная локальная аномалия проводимости (50–100 Ом·м). По геоэлектрическим разрезам можно предположить, что интенсивность рудной минерализации с глубиной растёт.

Сухой Лог
 Следующий пример — месторождение Сухой Лог в Иркутской области. Наиболее информативными, с точки зрения картирования перспективно рудоносных черносланцевых отложений оказались геоэлектрические разрезы, полученные в результате массовой 1-D инверсии аэроэлектроразведочных данных. Новые оригинальные алгоритмы инверсии [5] позволили получить достоверное распределение удельных сопротивлений среды как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях, которые хорошо согласуются с наземными работами ЗМПГ, имеющейся геологической информацией, данными бурения и каротажа скважин. ▶

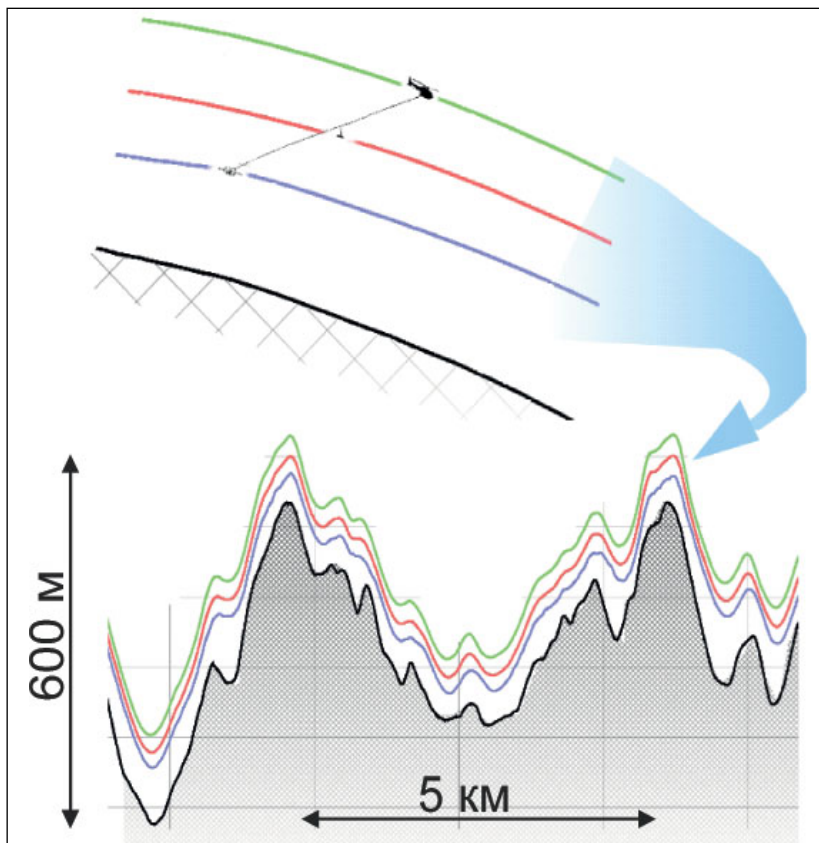


Рис. 1. Вылет в условиях горной местности

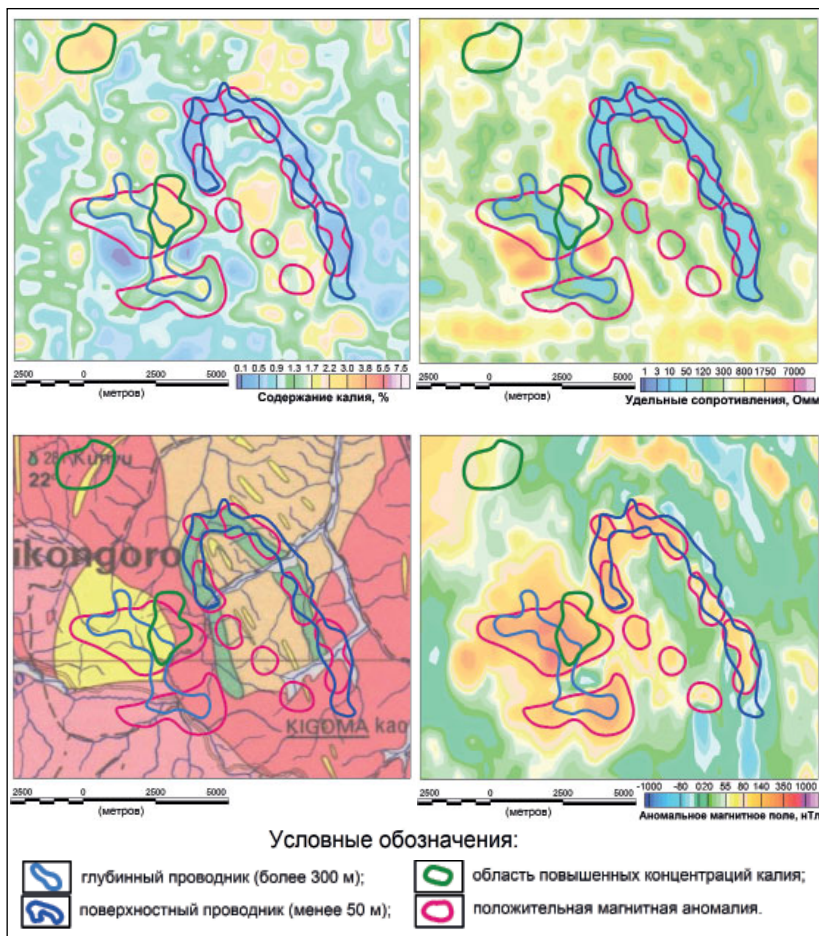


Рис. 2. Геофизические характеристики участка. Слева направо, сверху вниз: карта содержания калия; карта удельных сопротивлений для дневной поверхности; геологическая схема; карта аномального магнитного поля

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

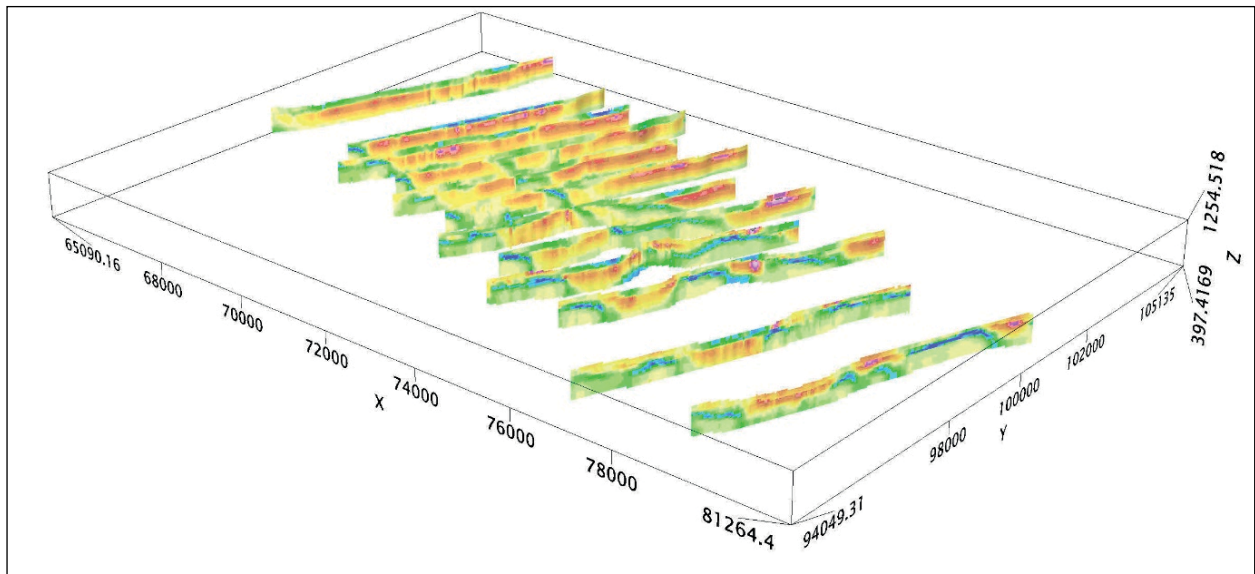


Рис. 3. Схема опорных геоэлектрических разрезов. По оси z — высота над уровнем моря, м

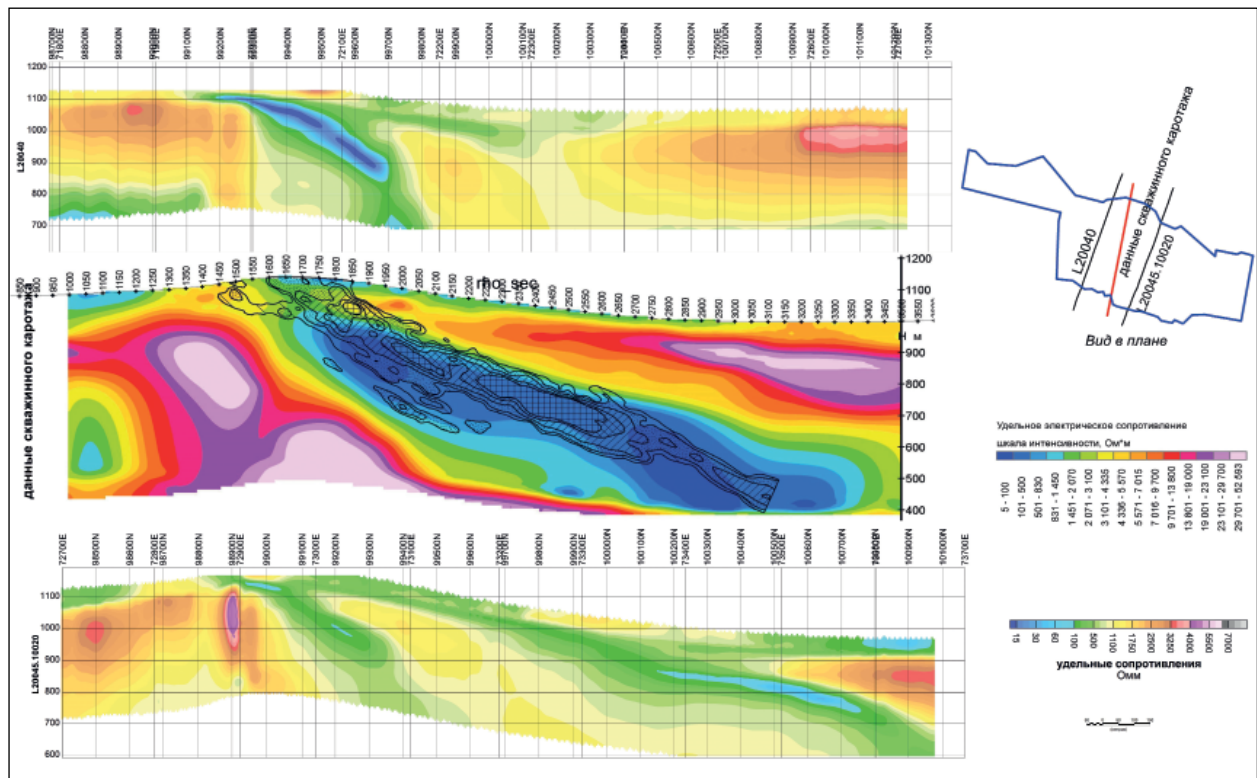


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы, построенные по данным скважинного каротажа (в центре) и аэроэлектроразведки (совместное использование и частотных, и временных данных)

Результаты инверсии приводятся в виде геоэлектрических разрезов по всем опорным (рис. 3). Черносланцевые углефицированные отложения достаточно контрастны по сопротивлениям (2–80 Ом·м) на фоне 800–3000 Ом·м характерным для вмещающих пород. Обращает на себя внимание, что большинство выделенных отложений-проводников не имеет выхода на дневную поверхность.

Распределение сопротивлений внутри черносланцевой толщи с достаточной вероятностью может связываться

со степенью их сульфидной минерализации и, как следствие, с содержанием рудных минералов. Об этом свидетельствует хорошее совпадение минерализованной зоны COG 0,6 г/т, выделенной по геологическим данным, с областью минимальных значений сопротивлений на геоэлектрических разрезах (рис. 4). Сопоставление геоэлектрических разрезов по линиям 20040 и 20045 с данными электрокаротажа по результатам бурения (рис. 4) говорит о достоверности определения границ проводников и их сопротивлений.

Дальнейшая работа с разрезами сводилась к пикированию пространственного положения проводников и выносу их проекции на линии маршрутов. Также на линии маршрутов выносились выделенные тектонические нарушения. В дальнейшем, для уменьшения плотности интерпретационной нагрузки, проекции проводников объединялись в тектонически обособленные области. Результаты этих действий показаны на схеме результатов интерпретации (рис. 5, с. 78). ▶



АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛУГИ



Алмазы



Золото



Полиметаллы

+7 499 344 04 24
info@geotechnologies-rus.com
www.geotechnologies-rus.com

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

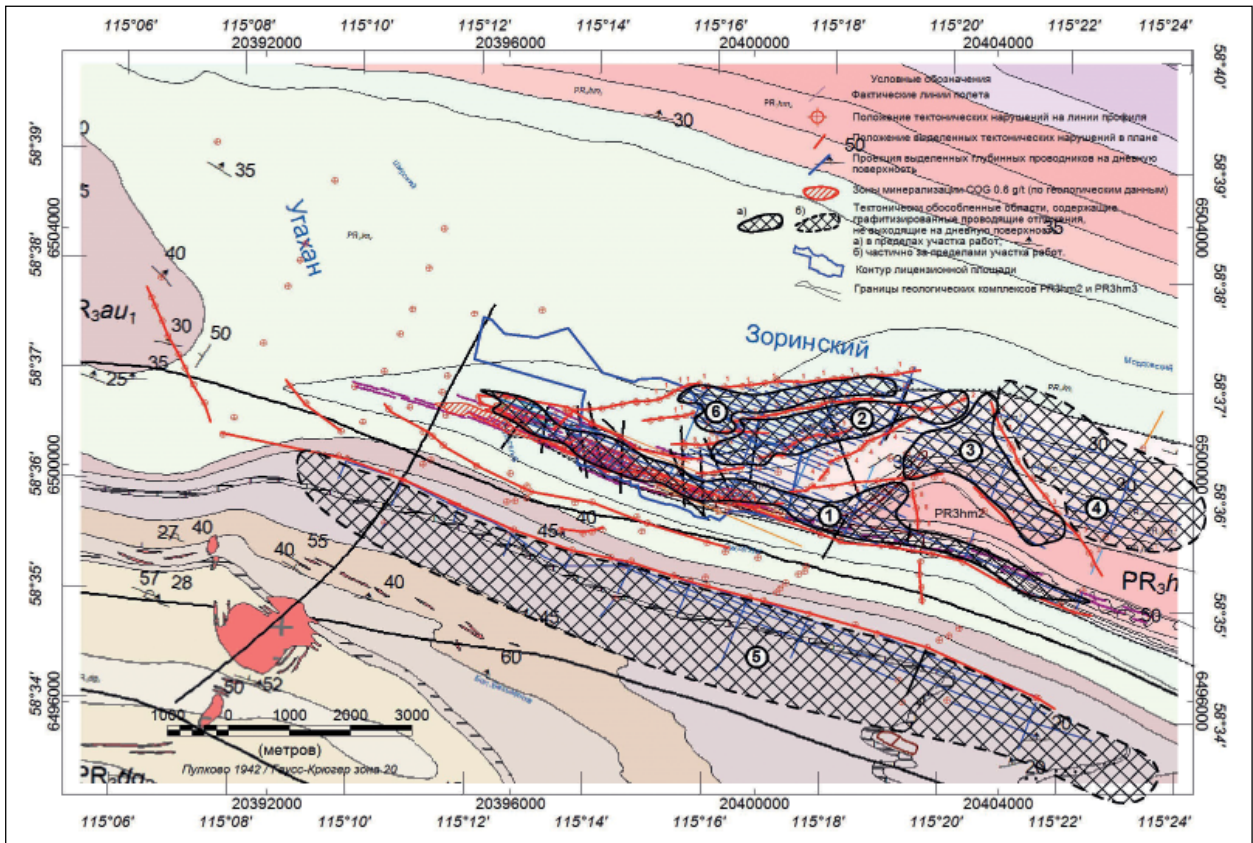


Рис. 5. Схема рудных результатов, наложенная на геологическую схему

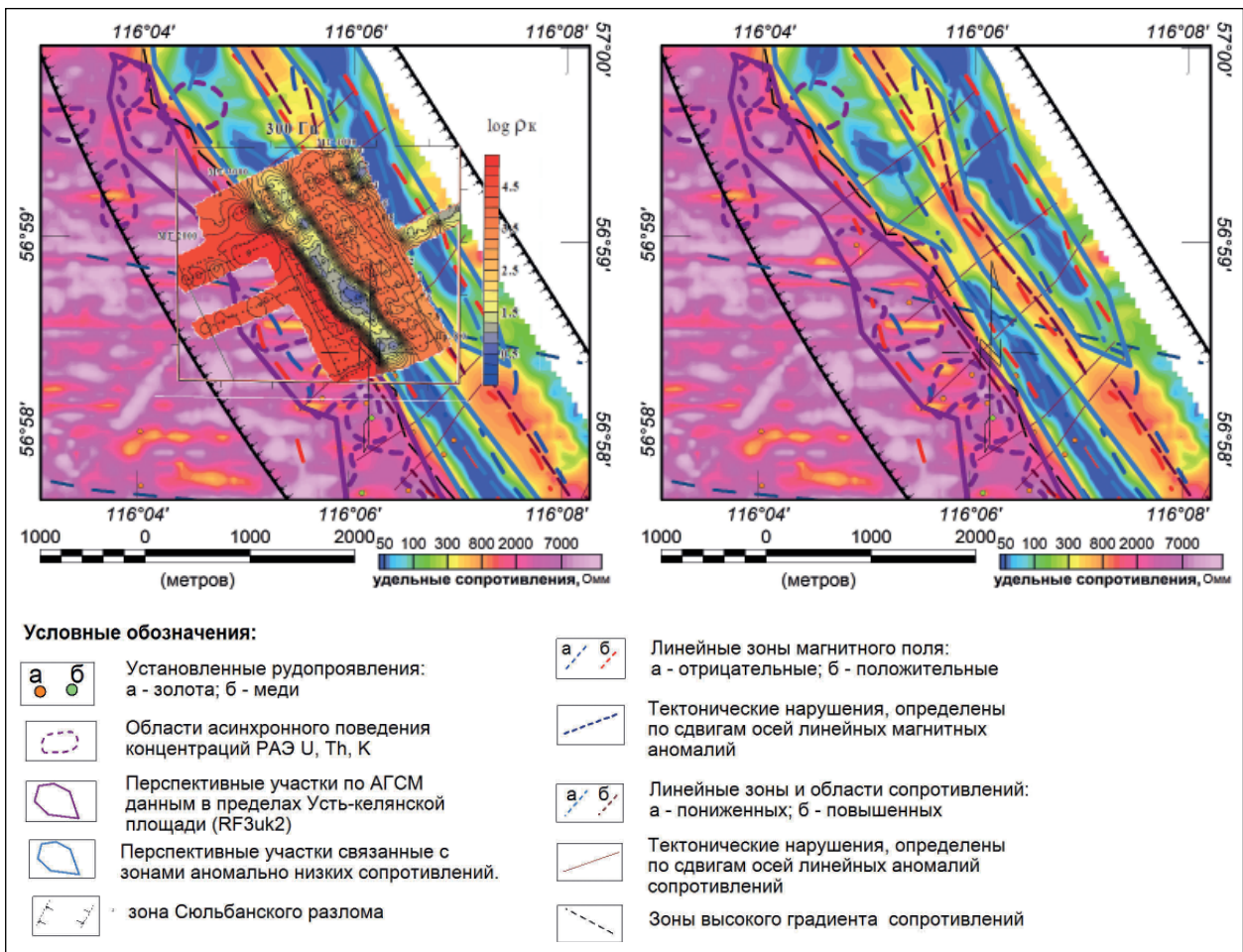


Рис. 6. Сопоставление карт кажущихся сопротивлений канала 300 Гц наземных работ АМТЗ [3] (слева) и для частотного канала 230 Гц аэроэлектроразведочной системы

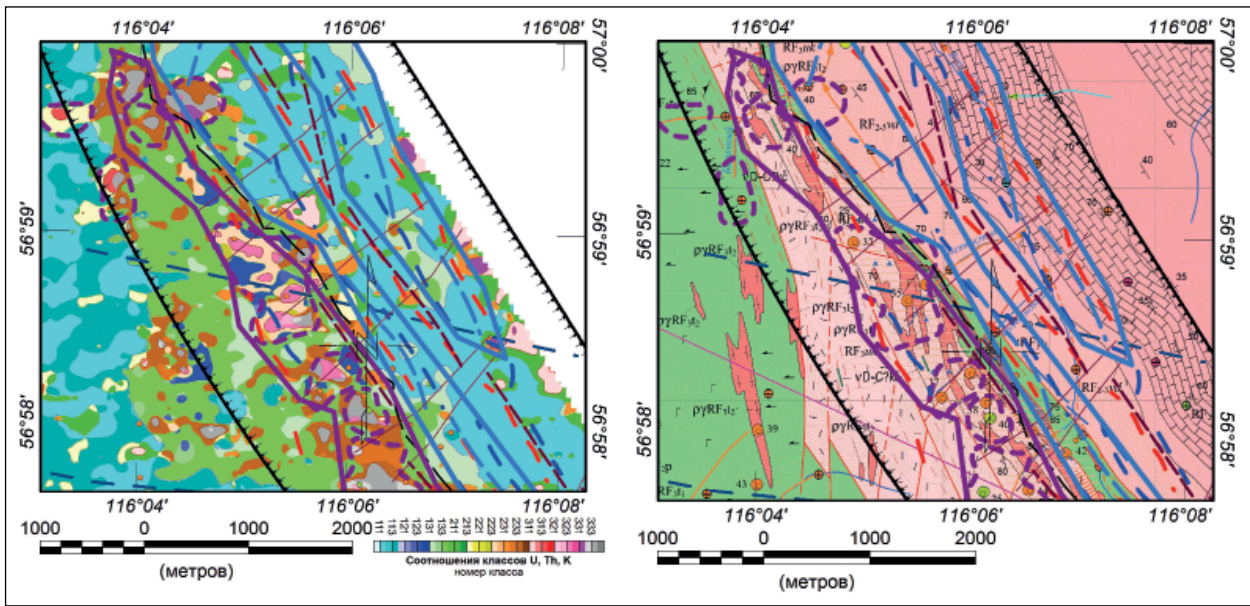


Рис. 7. Участок Урях. Карты соотношений классов урана, тория, калия (слева) и геологическая схема

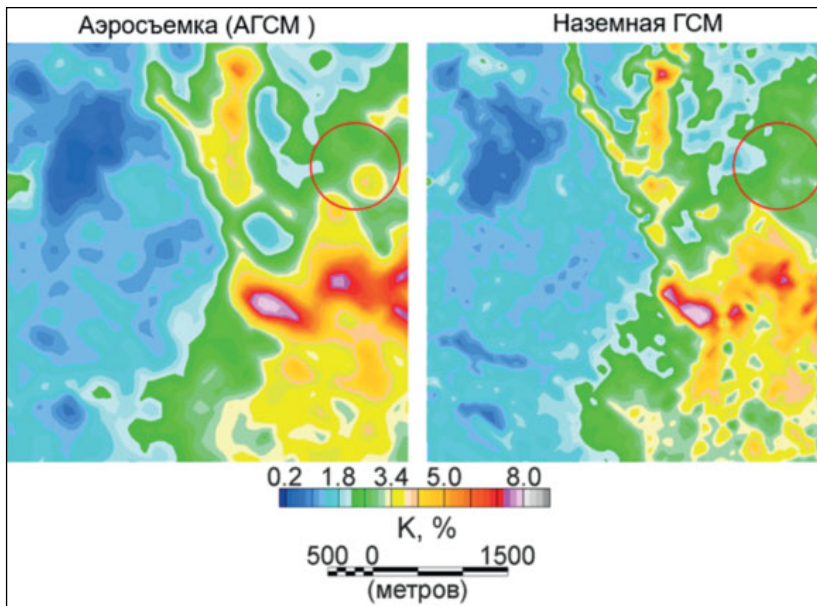


Рис. 8. Карты концентраций калия, полученные в результате аэро (слева) и наземной (справа) гамма-спектрометрической (ГСМ) съемки. В круге выделена аномалия, пропущенная в ходе наземных работ

Урях

Следующий пример — Уряхский рудный узел, приуроченный к зоне регионального Сюльбанского разлома. Эта зона изучалась в течение ряда лет и включает ряд известных месторождений и рудопроявлений золота. Карты кажущихся сопротивлений, вычисленных для схожих частотных каналов аэроэлектроразведки и наземной системы АМТЗ (рис. 6), хорошо согласуются.

Всего в пределах площади выполненных исследований выделяются три типа перспективных участков (рис. 7):

1. Участки в пределах Усть-

Келянской толщи с асинхронным (пестрым) поведением в сочетании концентраций РАЭ, которые можно связать с активными метасоматическими процессами (показаны фиолетовым контуром и штриховкой на картах).

2. Участки с anomalно низкими сопротивлениями могут быть связаны с зонами активной сульфидизации и (или) графитизации.
3. Участки с линейно вытянутыми магнитоактивными зонами могут быть представлены основными породами или березитами с которыми связана зона активных вторичных изменений.

Якутия

Сравним результаты гамма спектрометрической съемки в воздухе на высоте 100 м и на земле (рис. 8), полученные на одном из золоторудных месторождений Якутии.

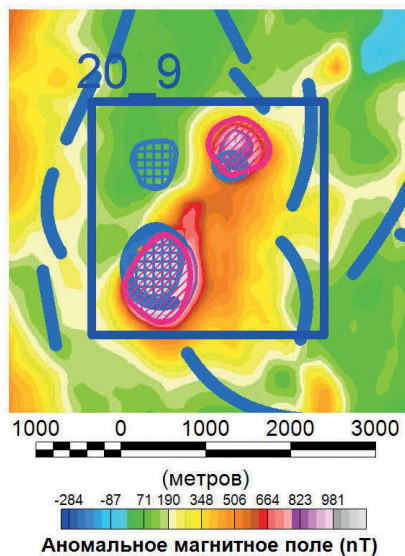
Аэроспектрометр объемом 32 л в 64 раза чувствительнее наземного объемом 0,5 л, а высота 100 м ослабляет излучение только в 2 раза. Уравнять их по чувствительности можно только увеличением времени наземных наблюдений. Например, за полный рабочий день измерить несколько десятков точек. Аэрообъекты объективно обеспечивают «не пропуск» всех значимых радиометрических аномалий, выделенных на земле [1]. Более того в воздухе фиксируются объекты пропущенные на земле. Дело в том, что размер области охвата наземного детектора составляет менее десяти метров, что может приводить к пропуску радиоактивных объектов в межпрофильном пространстве.

При аэронаблюдениях область охвата детектора составляет порядка двух-трех высот полета (100 м) [6], а его значительный объем компенсирует затухание гамма поля с высотой и обеспечивает ополоскование межпрофильного пространства.

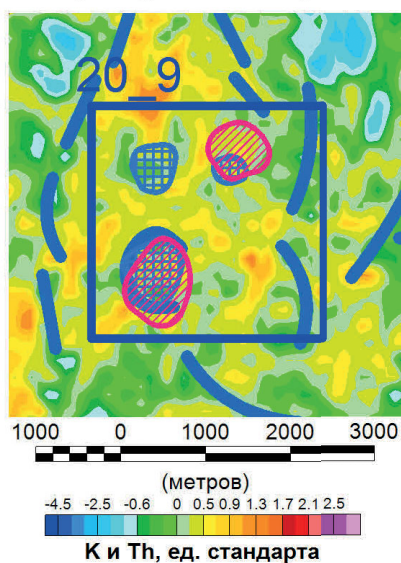
Также рассмотрим выявленную интересную область, выделенную на сопредельной площади. Фрагменты карт по участку представлены на рисунке 9 (с. 80).

Для участка характерен трансэлювиальный ландшафт. С запада наблюдаем хребет водораздела, с востока тальвег реки. Хребет совпадает в плане с линейной магнитной аномалией простирая север-юг интенсивностью ▶

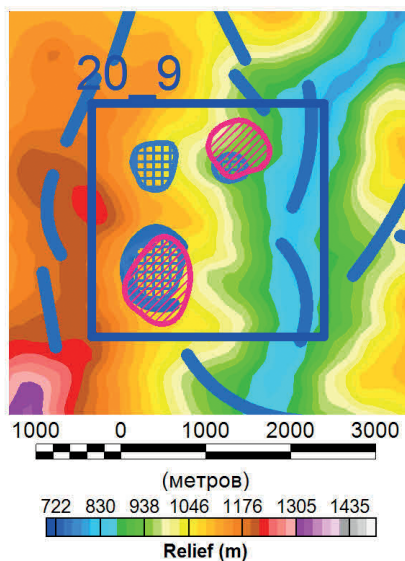
Магнитное поле



К-Th (центрированные и нормированные)



Рельеф



Удельные сопротивления (150 м)

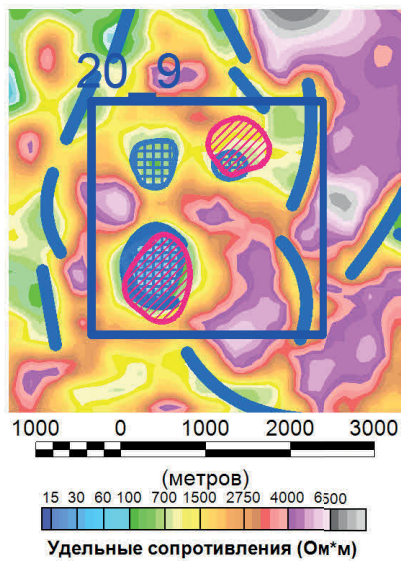


Рис. 9. Результаты работ по Участку 20_9

100–150 нТл. На картах сопротивлений вдоль хребта фиксируются линейные зоны относительно низких сопротивлений. На самом участке к востоку от хребта — две локальные изометричные аномалии интенсивностью порядка 900 нТл (южная) и более 500 нТл (северная) ориентировочная глубина залегания верхних кромок магнитных объектов около 60–100 м. Южная аномалия идеально совпадает с аномалией пониженных удельных сопротивлений 350–750 Ом·м. Интересные результаты показывают геоэлектрические разрезы через эпицентр аномалии. Относительно низкие сопротивления сосредоточены только в приповерх-

ностной области в интервале глубин 0–50 м. Далее по глубине идут достаточно высокоомные породы (3000–4000 Ом·м), также заметно понижение сопротивлений как минимум на 1000 Ом·м в области боковых контактов магнитоактивного тела. Такое соотношение физических характеристик может свидетельствовать о наличии слепой интрузии основного состава, которая внедрилась в архейский массив кислых пород (биотитовых и лейкократовых гранитов). Понижение сопротивлений в приконтактных частях основной интрузии связаны с развитием рудоносных зон глубокой гидротермальной проработки.

Выводы

Аэрогеофизические исследования по сравнению с наземной геофизикой обеспечивают более высокую производительность, стабильно-равномерные условия измерений, более детальный шаг исследований вдоль линии профиля.

Современная навигация позволяет выполнять аэросъемку с межмаршрутным расстоянием 50 м (масштаб 1:5000).

Аэроэлектроразведочные зондирования позволяют изучить геоэлектрическое строение вплоть до глубины 400 м.

При измерениях магнитного поля высотой полета надежно фильтруются источники приповерхностных помех, что существенным образом повышает соотношение сигнал/помеха. Затухание поля с высотой компенсируется чувствительностью датчика и высокой точностью измерений магнитометра.

Аэрогамма-спектрометрия обнаруживает объекты повышенной радиоактивности между профилями наблюдений. Спектрометр с NaI(Tl) сцинтиллятором объемом 32 л имеет соизмеримую чувствительность и разрешение с наземными приборами.

Благодарность

Авторы выражают глубочайшую признательность компаниям Нгали Холдингс, Нордголд, Полюс за возможность публикации материалов, а также Е.В. Каршакову за ценные советы и замечания. ♦



1. Бабаянц П.С., Керцман В.М., Левин Ф.Д., Трусов А.А. Особенности современной аэрогамма-спектрометрии, Разведка и охрана недр. 2015. С. 11–16.
2. Каршаков Е.В. Особенности алгоритмов управления летательным аппаратом при аэросъемке, Проблемы управления. 2012, № 3. С. 71–76.
3. Кузьмицкая Л.Ю. Применение метода аудиоманнителлурического зондирования при поисках коренных месторождений золота в черносланцевых толщах (Сухоложское, Уряхское и Олбот-Верне-Хатынское рудные поля). Выпускная работа, СПбГУ, 2018, 97 с.
4. Grasty R.L., Minty B.R.S. A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys: Australian Geological Survey Organisation, Canberra. 1995, 90 p.
5. Karshakov E. Iterated extended Kalman filter for airborne electromagnetic data inversion, Exploration Geophysics 51(1):66-73, 2020, DOI: 10.1080/08123985.2019.1593790.
6. Minty B.R.S., Luyendyk A.P.J., Brodie R.C. Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry, Journal of Australian Geology and Geophysics. 1997, 17(2), pp. 51–62.
7. Olesen A., Forsberg R., Gidskehaug A. Airborne gravimetry using the LaCoste and Romberg gravimeter — an error analysis, Proceedings of International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation (KIS-97). University of Calgary, Canada, 1997, pp. 613–618.
8. Podmogov Yu.G., Moilanen J., Kertsman V.M. Results of the Complex Airborne Geophysical Survey in the Central African Ridge Area, Practical and Theoretical Aspects of Geological Interpretation of Gravitational, Magnetic and Electric Fields. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences, Cham, Switzerland, Springer, 2019, pp. 387–394.
9. Reeves C.V., Zeil P.W. Airborne geophysics and remote sensing: some common ground in presentation techniques and interpretation In: Remote sensing: an operational technology for the mining and petroleum industries. Springer, Dordrecht, 1990, pp. 75–88, www.doi.org/10.1007/978-94-010-9744-4_8