Возможности аэрогеофизического комплекса ЭКВАТОР при поисках золоторудных месторождений различного типа.

Подмогов Ю.Г, ООО “Геотехнологии”, г. Москва
Керцман В.М., МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва
Мойланен Е.В., ИПУ РАН, г. Москва

Аннотация

Рассматривается проблема повышения эффективности комплекса геологоразведочных работ при поисках золотого оруденения. Приводится обоснование рациональности использования современного аэрогеофизического комплекса ЭКВАТОР на всех стадиях геолого-поисковых работ на золото. Рассматриваются результаты использования этого комплекса в районе Центрально-Африканского разлома на примере поисково-картировочных работ масштаба 1:50 000 и детализационных работ масштаба 1:10 000 на выявленных перспективных участках.

Ключевые слова: аэрогеофизика, комплекс ЭКВАТОР, электроразведка, магниторазведка, гамма-спектрометрия.

Введение.

Проблема повышения эффективности поисков золотого оруденения, как в пределах известных золоторудных районов, так и на новых перспективных площадях весьма актуальна.

Важную роль при этом играют аэрогеофизические методы, отличительной особенностью которых являются высокая мобильность и производительность, возможность опоискования закрытых площадей, равномерность изучения больших территорий [Becker et al., 1987; Kaufman et al., 2014].

Для каждого региона характерны свои физико-геологические особенности проявления и локализации золотого оруденения. В результате многолетних геофизических работ на золоторудных месторождениях был разработан оптимальный для Северо-Востока России комплекс наземных геофизических исследований на поисковой, поисково-оценочной и разведочной стадиях изучения золоторудных месторождений [Ерофеев и Орехов, 2014].

Результативное использования этих наземных методов при поисках и разведке месторождений золота хорошо известны специалистам [Долгаль и Христенко, 2008; Татьков, 2015; Никитин и Хмелевской, 2004; Кулаков и др., 1983; Приходько, 2006; Ростова и Копылов, 1977].

Мы безусловно признаем эффективность наземной геофизики и не призываем исключить ее при поисках разведки золоторудных месторождений. Мы покажем, как использование современных аэрогеофизических технологий вместе с традиционными наземными исследованиями позволяет резко повысить эффективность поисков золотого оруденения.
Аэрокомплекс включает геофизические методы, такие как: электроразведка методом переходных процессов (МПП) и частотного зондирования (ЧЗ), магниторазведка и гамма-

спектрометрия. Данный комплекс является достаточно универсальным и применим ко многим геолого-геофизическим типам золоторудных месторождений.

Электроразведка позволяет решить задачи выделения кварцевых жил и прожилково-жильных зон, зон дробления, разрывных нарушений различных рангов, уточнения границ тел участков, затронутых процессами дезинтеграционных изменений, выявления и прослеживания зон повышенной сульфидизации, минерализованных зон дробления, литологического расчленения горных пород. Метод позволяет уточнить элементы залегания рудовмещающих зон, картировать коры выветривания и россыпи. Фиксировать дайки различного состава в пределах интрузивных образований до глубин 300–400 метров, выполнять литологическое расчленение разреза [Collett, 1986; Fountain, 1998]. На поисковой и поисково-оценочной стадиях золото-поисковых работ, как правило используется масштаб 1:10 000 или 1:5 000 с шагом наблюдений по профилю 5-7 м.
Магниторазведка применяется для уточнения планового положения гранитоидных массивов и их апикальных частей, выделения зональности в строении контактово-измененных пород, установления даек гранодиоритового (среднего) и базитового (основного) состава, разноранговых разрывных нарушений и определения областей распространения гидротермально-метасоматически измененных пород. Как правило используется масштаб 1:10 000 или 1:5 000 с шагом наблюдений по профилю 1-2 м.

Гамма-спектрометрия. Высокоэффективный метод обнаружения зон с повышенными содержаниями калия, свидетельствующие о процессе калишпатизации, сопровождающем рудный метасоматоз. В отличие от наземных спектрометров с малым объемом детектора, аэроспектрометры имеют объем сцинтилятора 32/48 л, что достаточно для надежного определения радио геохимической специализации территорий при высоте полета до 200 м.

Для условий Северо-Востока России этот комплекс методов решает практически весь круг основных задач на стадии поисков и разведки наиболее распространенных типов золоторудных месторождений. По результатам аэроработ выделяются перспективные аномалии и области, которые необходимо заверить наземными геофизическими методами в профильном варианте, а также геохимией. В конечном итоге, применение аэрогеофизики позволяет существенно ускорить разведку территорий, а заверка наземными методами надежно определяет возможную природу выявленных аномалий и, тем самым, минимизирует объемы горно-буровых работ.

Аэрогеофизический комплекс ЭКВАТОР. Состав технических средств и возможности измерений.

Комплекс ЭКВАТОР предназначен для выполнения аэрогеофизической съемки при решении широкого круга геолого-поисковых и картировочных задач и включает в себя:

- ***Аэроэлектроразведочную систему.*** Система реализует зондирования МПП и частотные зондирования (ЧЗ). Шаг зондирований вдоль линии полета составляет 5-7 м, при средней скорости полета 150 км/ч. Средняя высота передатчика составляет 40-50 м. Измерения отклика среды выполняются в 15-ти окнах в интервале времен

5–4500 мкс и на 15-ти частотах в интервале 77-15 000 Гц. Вычисления кажущихся сопротивлений и (или) проводимостей выполняются с учетом реальной высоты рамки генератора, геометрии системы приемник-передатчик, а также реальной (измеренной) формы генераторного импульса. Это дает возможность изучать детальное распределение сопротивлений среды в диапазоне глубин 0-400 м в большом динамическом диапазоне значений (1-10 000 Ом·м) и высоким пространственным разрешением.

- ***Аэромагнитную систему.*** Система использует цезиевый квантовый датчик с чувствительность 0,2 пТл/$\sqrt{\text{Гц}}$ и магнитометр с темпом измерений 1000 Гц. Данный темп измерений позволяет исключить влияния мощного генераторного импульса и помех от вертолета-носителя. В результате шаг измерений вдоль линии полета составляет 1-2 м. Такая детальность измерений при средней высоте датчика 70 м гарантирует обнаружение намагниченных объектов с горизонтальной мощностью менее метра. А высота датчика позволяет ослабить влияние приповерхностных помех и стабилизировать условия измерений. Стабильность и точность измерений делает метрически значимыми магнитные аномалии интенсивностью в десятые доли нТл.

  Бортовой гамма-спектрометр. Объем детекторов составляет 32 л (вертолет Еврокоптер) или 48 л (вертолет Ми-8). Во время измерений ведется покристальная регистрация односекундных спектров, которые суммируются только после обработки, компенсирующей нелинейность энергетической шкалы. Это существенно повышает качество суммарных спектров и обеспечивает разрешение по ^{137}Cs (линия 0.662 МэВ) не хуже 9%. Также выполняется коррекция данных за атмосферный радон. Обработка ведется по нескольким фотопикам для урана и тория, а это увеличивает чувствительность и повышает точность [Керцман и др., 2015]. Для кларковых содержаний точность съемки составляет 0.2% для калия, для урана- 1.5 ppm, для тория- 2 ppm [Grasty and Minty, 1995].
- ***Система сбора данных и высокоточной навигации.*** Система обеспечивает синхронизацию всех регистрируемых параметров их запись и хранение. Обеспечивает точную прокладку запланированных маршрутов и точное определение координат магнитного датчика, генераторной рамки и приемника электромагнитной системы, а также блока детекторов гамма-спектрометра. Точность плановой привязки составляет не хуже 1 м.

Компоновка системы ЭКВАТОР (Рис. 1) заметно отличается от импортных и отечественных аналогов. Ее основные технические особенности прежде всего относятся к конструкции к электромагнитной системе комплекса:

- Разнесенная установка “передатчик-приемник” со специальной системой их взаимного позиционирования [Smith, 2001; Pavlov и др., 2010].

- Смешанная форма первичного сигнала (Рис. 2) и непрерывная регистрация данных в режиме “full time” позволяют одновременно выполнять зондирования во

временной и частотной областях, а также регистрировать реальную форму импульса [Volkovitsky и Karshakov, 2013].

- Уникальное, для частотных систем, количество рабочих частот (15 в диапазоне 77-15000 Гц)

- Короткие времена начала регистрации МПП процесса (15 окон в диапазоне 5-4500 мкс) [Macnae и Baron-Hay, 2010].

- Оригинальные алгоритмы вычисления кажущихся сопротивлений в частотной и временной областях с учетом реальной формы импульса и поправок за реальную высоту полета и геометрию ЕМ системы.

- Пространственно-жесткая конструкция генераторной рамки обеспечивает очень важные конкурентные преимущества системы ЭКВАТОР. Точка подвеса платформы передатчика находится в её центре тяжести (показан стрелкой на рисунке 2). Это определяет горизонтальность платформы во всем диапазоне возможных скоростей полета (0-200 км/ч, рис. 3). Возможность выполнять кондиционные измерения на высоких скоростях повышает производительность съемки, а измерения на малых скоростях дают возможность выполнять кондиционные измерения с огибанием рельефа в горной местности (Рис. 4).



Рис. 1 Внешний вид и компоновка комплекса ЭКВАТОР.



Рис.2 Конструкция буксируемой платформы передатчика (стрелка показывает точку подвеса).



Рис. 3 Горизонтальное положение платформы передатчика во всем диапазоне возможных скоростей полёта.



Рис. 4. Съемка в условиях горной местности.

Комплекс позволяет с высокой детальностью одновременно получать данные о распределении электрических, магнитных и радиоактивных свойств среды. При этом навигационная система обеспечивает точность прокладки маршрутов и привязки точек измерений с точностью, удовлетворяющей требованиям технических инструкций для съемок 1:5 000 масштаба.

- Реально достигнутая производительность составляет 10 000 п. км в месяц. При съемке масштаба 1:10 000 это эквивалентно площади в 1 000 кв. км.

- В то же время компактность установки делает рентабельным работы на маленьких участках (порядка 100 км^2 и менее).

- Небольшой вес подвесной системы (150 кг) позволяет выполнять съемки при значительных удалениях от аэропорта базирования. В 2015 г. при съемке в Норильском рудном узле расстояние подлета составило 180 км.

- По сравнению с наземной геофизикой комплекс реализует высокоточные измерения тех же параметров среды по более плотной и равномерной сети наблюдений. Производительность работ больше примерно на порядок. Доступны труднопроходимые участки, в том числе с плохими условиями заземлений. Электромагнитная система комплекса ЭКВАТОР позволяет выполнять кондиционные измерения параметров электропроводности среды в условиях сильно пересеченной горной местности. Так же создается достаточно плотная и равномерная сеть гамма-спектрометрических измерений, которая обычно отсутствует или выполняется по отдельным профилям в комплексе наземных геофизических работ.

Возможные поисковые аналоги и физико-геологические модели золоторудных месторождений кварцево-жильного и кварцево-сульфидно-жильного типа.

Рассмотрим, как возможный поисковый аналог, геологическое строение золоторудного месторождения Купол (Рис. 5). Месторождение расположено в северо-восточной части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Рудные тела и зоны околорудных изменений месторождения могут выделяться в геофизических полях следующим образом:

1. Локальными аномалиями очень высокого сопротивления 5 000-10 000 Ом·м на фоне 500-2 000 Ом·м, соизмеримыми с размерами рудных тел (кварцевые жилы) на фоне агломератов и туфов.
2. По данным гамма спектрометрии контрастными аномалиями концентрации калия при минимуме содержаний тория (адуляры содержат до 18% калия).
3. Контрастными минимумами на фоне знакопеременного магнитного поля с высокой дисперсией магнитного поля, связанной с вулканитами основного состава.

Технические возможности системы ЭКВАТОР гарантируют фиксацию подобных аномалий как по амплитуде, так и пространственному разрешению. Более удобным для оценки применимости аэрогеофизического комплекса для золото-поисковых работ является рассмотрение физико-геологических моделей (ФГМ). Для примера рассмотрим

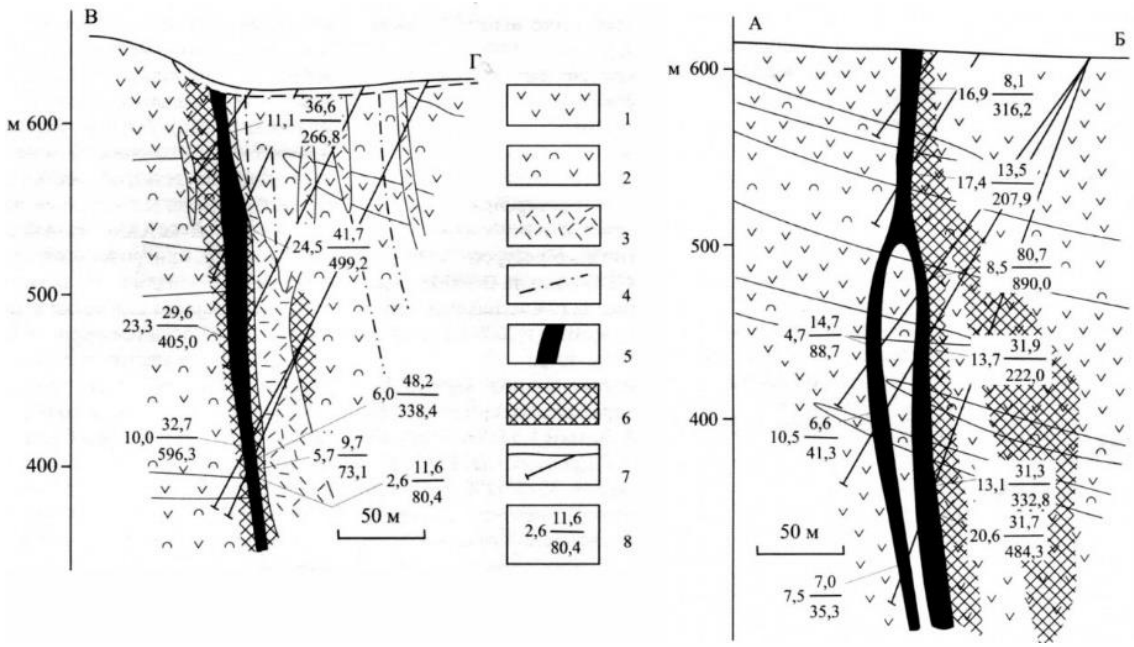


Рис. 5 Месторождение Купол. Геологические разрезы по линии АБ буровой профиль 92350N; по линии ВГ буровой профиль 91025N: 1-2 – верхнемеловые покровные вулканиты: 1 – андезитобазальты, 2 – агломератовые, лапиллиевые, пепловые туфы андезитов; 3 – позднемеловые дайки риолитов, риодацитов; 4 – разломы; 5-6 – рудные тела: 5 – адуляр-кварцевые жилы, 6 – ореол прожилкования; 7 – скважины; 8 – параметры рудных тел: мощность (м), содержания (г/т) Au (в числителе) и Ag (в знаменателе) [Константинов, 2010].

обобщенные ФГМ, разработанные по результатам многолетних поисково-оценочных работ на территории Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего востока, для трех типов золоторудных месторождений кварцево-жильного типа: в минерализованных зонах дробления, секущих складчатость, и в магматических образованиях и зонах дробления согласных со складчатостью. Все три модельных объекта встречаются в виде различных комбинаций на основных золоторудных рудопроявлениях и на территории юга Восточной Сибири.

Золоторудные поля в минерализованных зонах дробления – этот тип золоторудных объектов широко распространён на территории Восточного Саяна (месторождения Водораздельное, Кварцевое, Барун-Холба, рудные зоны Верхняя, Южная и Смежная на флангах Зун-Холбинского месторождения) и Южно-Муйского хребта (Ирокинда, Рудный, Жанокская площадь), а также на ряде других золоторудных объектов юга Восточной Сибири.

Основной характеристикой данной группы месторождений является приуроченность рудных тел к зонам развития крупных тектонических нарушений. Анализ типа вмещающих пород, представленных терригенными, карбонатными, черносланцевыми толщами и гранитогнейсовыми массивами, в толще которых развивается минерализованные зоны дробления, позволяет условно разделить их на четыре типа: в терригенной толще; колчеданного типа в углефицированных терригенных толщах; в зонах сканирования терригеннокарбонатной толщи; золотоносные коры выветривания и золоторудные поля в минерализованных зонах дробления терригенно-карбонатной толщи во флангах гипербазитовых массивов. Все эти типы значительно отличаются по физическим свойствам (сопротивление, поляризуемость) и морфологии аномалий. Тем не менее, их можно объединить в одну группу, основываясь на их приуроченности к крупным зонам тектонических нарушений (рис. 6). Крупными структурными элементами рудных узлов для данного типа моделей являются присутствующие в толще массивы гранитоидов, гипербазитов, а также крупные узлы сочленения региональных разломов разного направления с крупными взбросовыми перемещениями. На поверхности данные объекты проявлены системами сближенных зон дробления, смятия и рассланцевания, трещинами и разрывами различного порядка, являющимися рудоносными. По опыту работ с комплексом ЭКВАТОР в пределах Ангольского щита и Центрально-Африканского разлома все подобные объекты детально картируются и идентифицируются. Субвертикальные объекты лучше определяются в ЧЗ, так как ЧЗ дает оценку интегральных сопротивлений всего интервала разреза от поверхности до определенной глубины [Hodges, 2013]. Глубина зависит от частоты сигнала, чем ниже частота, тем эта глубина больше. Другие виды электрических зондирований (ВЭЗ, ЗМПП), рассчитанные на горизонтально-слоистые среды дают худший результат [Подмогов и др., 2019].

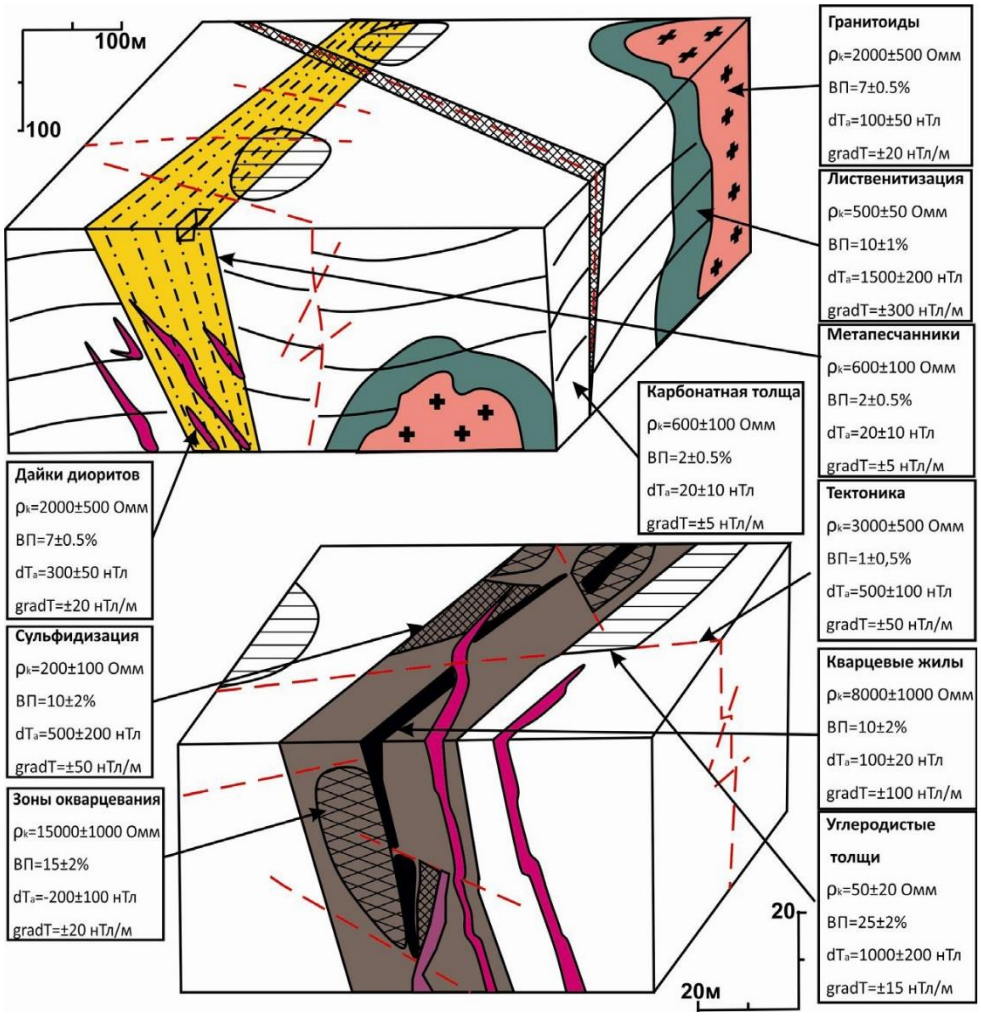


Рис. 6 Обобщенная статистическая ФГМ золоторудных месторождений, связанных с минерализованными зонами дробления [Татьков, 2014].

Золоторудные месторождения, связанные с интрузивными образованиями.

Основной характеристикой данного типа месторождений является приуроченность рудных тел к краевым частям магматических образований, развивающихся в толщах терригенных и терригенно-карбонатных пород (Рис. 7). Для них характерен золото - кварцевый и золото-сульфидный структурно-формационный тип оруденения. Несмотря на малую мощность зон приконтактных изменений (первые десятки метров) они будут надежно фиксироваться системой ЭКВАТОР магнитными аномалиями и аномалиями кажущихся сопротивлений, благодаря детальному шагу измерений и высоте магнитного и электромагнитного сенсоров Рудные тела, связанные с дайковыми комплексами, также будут уверенно выделяться методами магниторазведки и электроразведки.

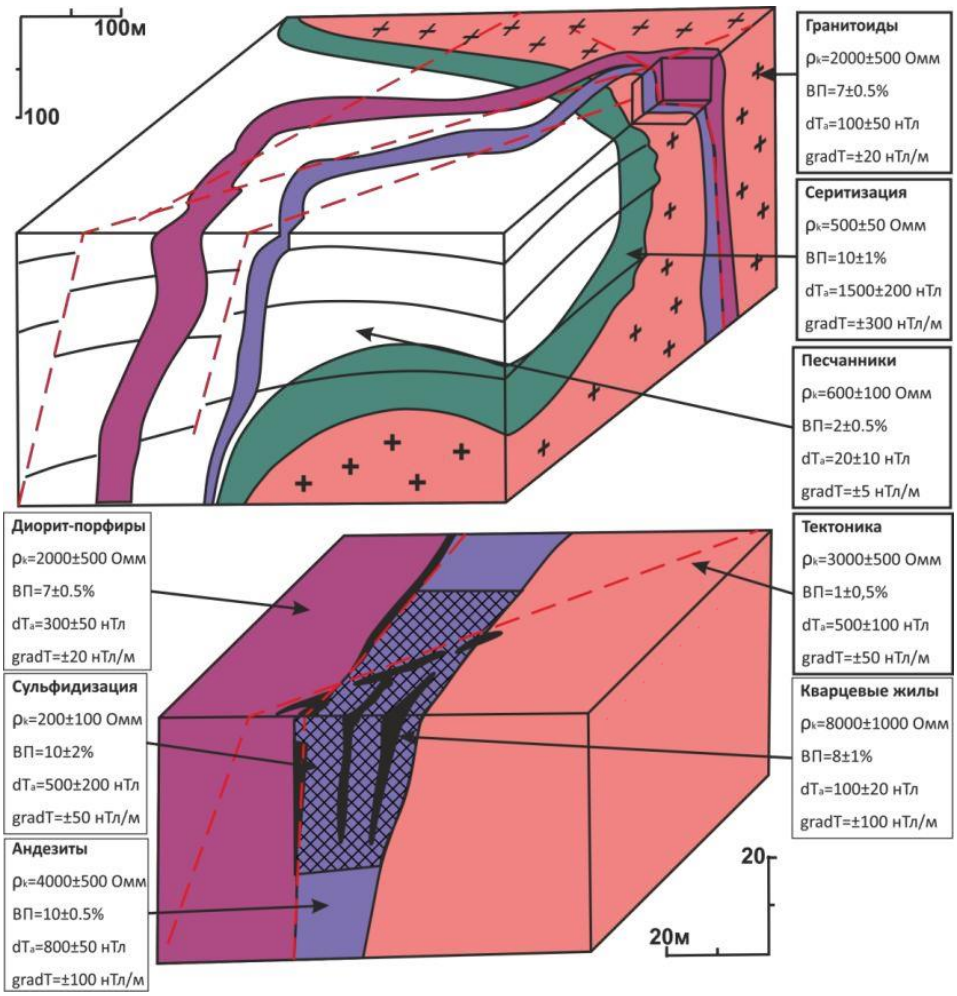


Рис. 7 Обобщенная статистическая ФГМ модель золоторудных месторождений, связанных с интрузивными образованиями [Татьков, 2014]

Золоторудные месторождения во флексурах терригенно-карбонатных толщ. Распространѐн на территории Дальнего Востока и Восточного Саяна в районе верховьев рек Бирюса и Зима. Данный тип характеризует согласные со складчатостью месторождения и рудопроявления золото-кварцевого и золото-сульфидно-кварцевого структурно-формационного типа или месторождения во флишоидных толщах и, в большинстве случаев, довольно плохо выделяется геофизическими методами в связи с малой горизонтальной мощностью поисковых объектов (рис. 8)

Основными структурными элементами являются локальные тектонические нарушения и зоны околорудных изменений вдоль даек габбро и габбро-диоритов, развивающихся по толще терригенно-карбонатных пород. Основным элементом рудовмещающей структуры в модели являются прослои аргиллитов, кварцевые жилы, сульфидизация жил и около жильного пространства, мелкие складки и флексуры жил к которым приурочены наиболее обогащенные участки.

Применение комплекса ЭКВАТОР при масштабе исследований 1:10 000 или 1: 5 000 обеспечит надежное картирование основных структурных элементов подобных объектов (тектоника, дайковые комплексы, минерализованные шовные зоны).

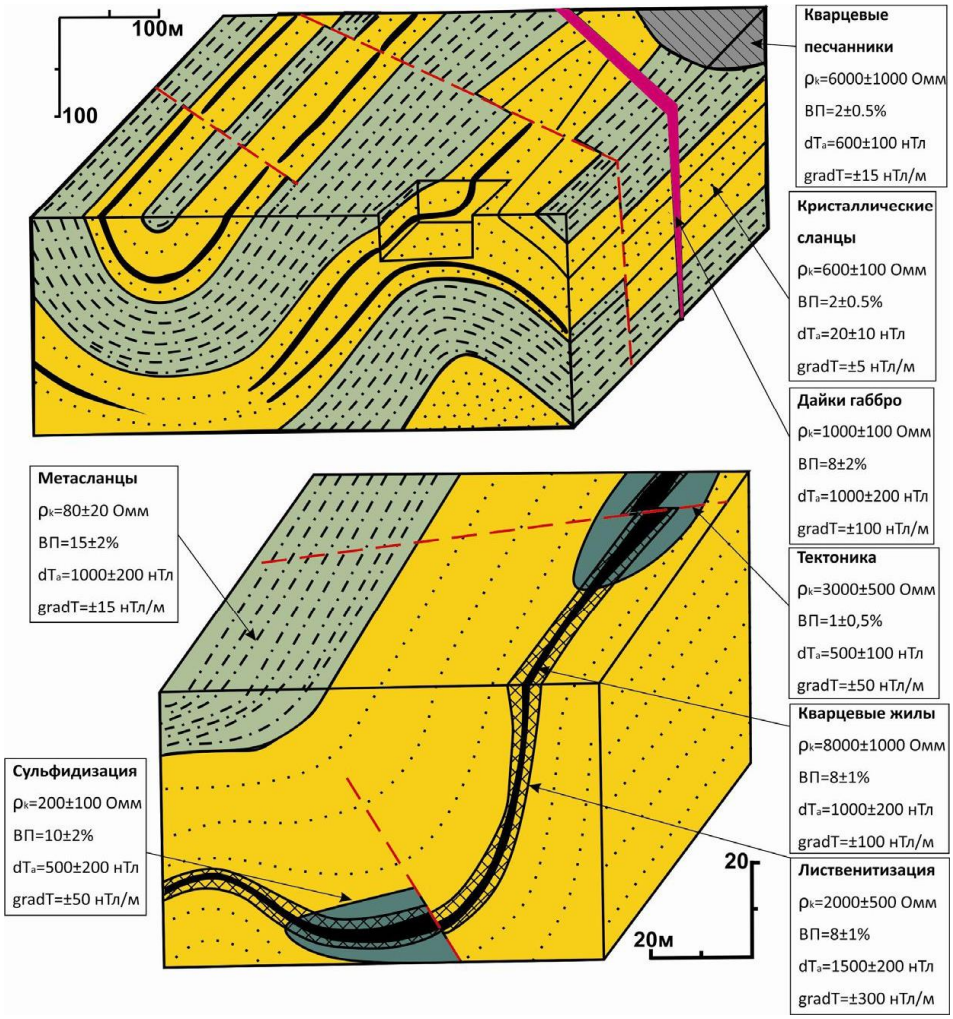


Рис. 8 Обобщенная статистическая физико-геологическая модель золоторудных месторождений во флексурах терригенных толщ (И.Г.Татьков, 2014).

Кварцевые жилы (даже с горизонтальной мощностью менее метра) и сопровождающие их зоны лиственитизации среди практически немагнитных кристаллических сланцев будут надежно фиксироваться магниторазведкой. Также эти зоны зафиксируются линейными аномалиями повышенных сопротивлений (2000-6000 Ом·м при удельных сопротивлениях вмещающих пород 500-700 Ом·м). Зоны сульфидизации как с поверхности, так и на глубине, вероятно представленные пирротином, надежно определятся положительными локальными магнитными аномалиями (300-700 нТл на фоне 10-30 нТл) и локальными аномалиями пониженных сопротивлений (100-300 Ом·м на фоне 500-700 Ом·м).

Практические результаты работ с использованием системы ЭКВАТОР. Центрально-Африканский Щит. Республика Руанда.

Основные параметры исследований:

- Масштаб съемки: 1:50 000
  1:10 000

- Площадь участка: 26 000 кв. км
- Объем работ: 58 000 п. км
- Состав комплекса: электроразведка, магниторазведка, гамма-спектрометрия.
- Высота полета ЛА: 100 м
- Высота MAG и EM датчиков: 70 м
- Высота генераторной рамки: 50 м
- Средняя скорость на маршруте: 132.3 км/ч
- Производительность: 9 620 п.км/мес
- Время реализации проекта: 6 мес.

Картирование интрузий основного состава и определение параметров аномального объекта по аэромагнитным данным.

Отрицательная локальная магнитная аномалия интенсивностью 1300 нТл и размерами 2300х950 м была выделена на поисково-картировочной стадии работ масштаба 1: 50 000. Была классифицирована как слепая интрузия основного состава. Вызвала интерес, поскольку находится в зоне развития низкоомных углефицированных сланцев. Восточный борт интрузии имеет контакт с интенсивной линейной аномалией повышенного сопротивления, вероятно связанной с кварцевой жилой. В этой связи была выполнена аэродетализация участка в масштабе 1:10 000. Результаты детализации показаны на Рис.9, 10. По результатам детализации получены следующие результаты:

- Определены размеры, контур и эпицентры магнитной аномалии (Target 4.1).
- Глубина верхней кромки магнитного объекта порядка 100 м, а нижней не менее 700-800м
- Возможная природа – крутопадающая дифференцированная интрузия пород основного состава даечного типа, размеры в плане 300х1800 м. В более глубоких частях интрузии и в зонах эндо- и экзо- контактов с вмещающими породами с ней могут быть связаны комплексные сульфидные руды никеля, меди, и кобальта, содержащих платиноиды и золото.
- Даны рекомендации по проведению наземных работ.
- Расчетные глубины магнитной аномалии:
- Верхняя кромка – 100м
- Нижняя кромка – min 700-800м
- Ось магнитной аномалии Target 4.1. совпадает с зоной пониженных сопротивлений субмеридионального простирания проходя через весь участок детализации.
- Интенсивность и ширина электропроводной зоны заметно снижается в области присутствия магнитного тела.

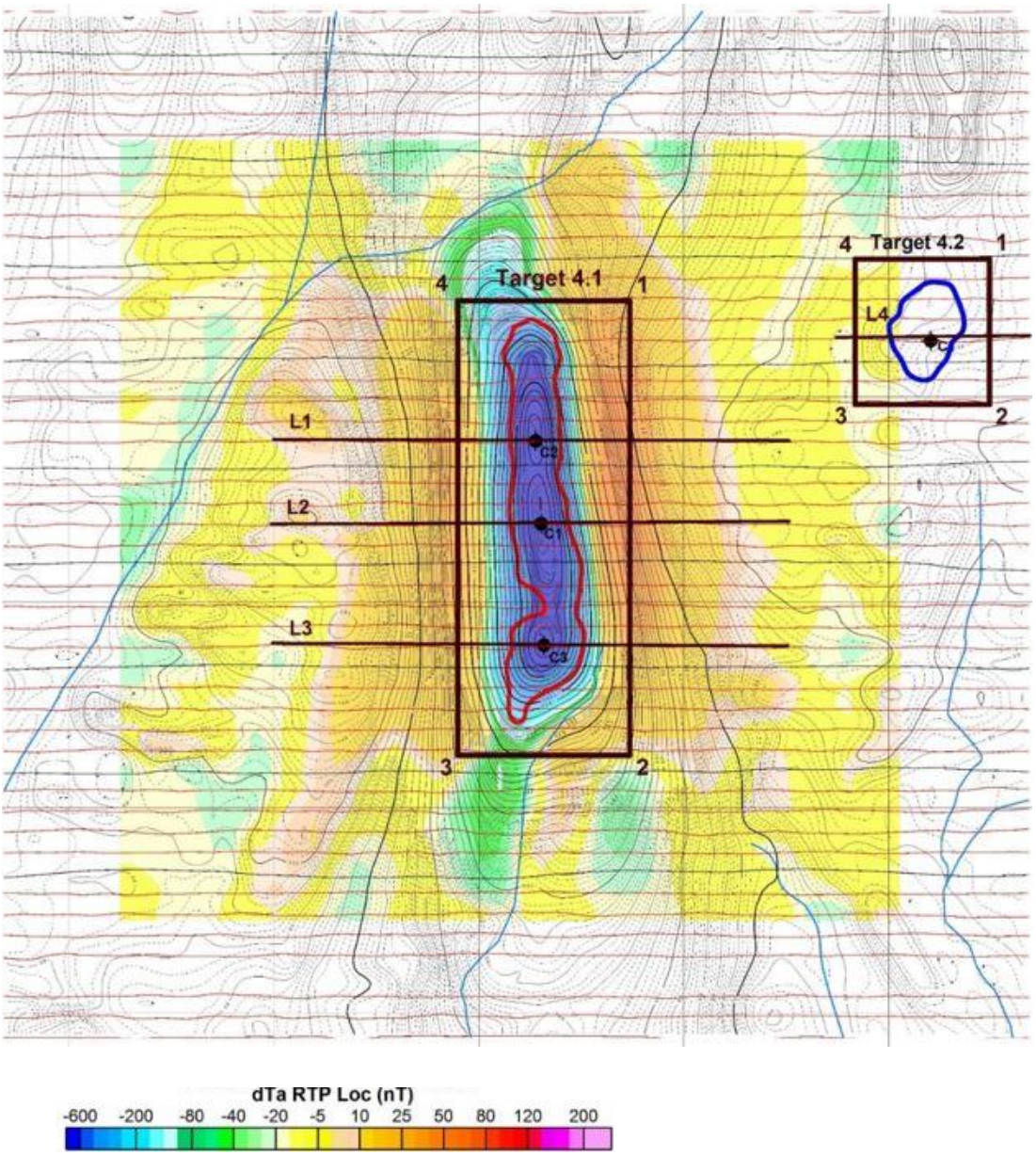


Рис. 9. Карта локальной составляющей аномального магнитного поля, редуцированного к полюсу. Горизонтальные линии представляют фактические линии полета, выполненные через 100 м.

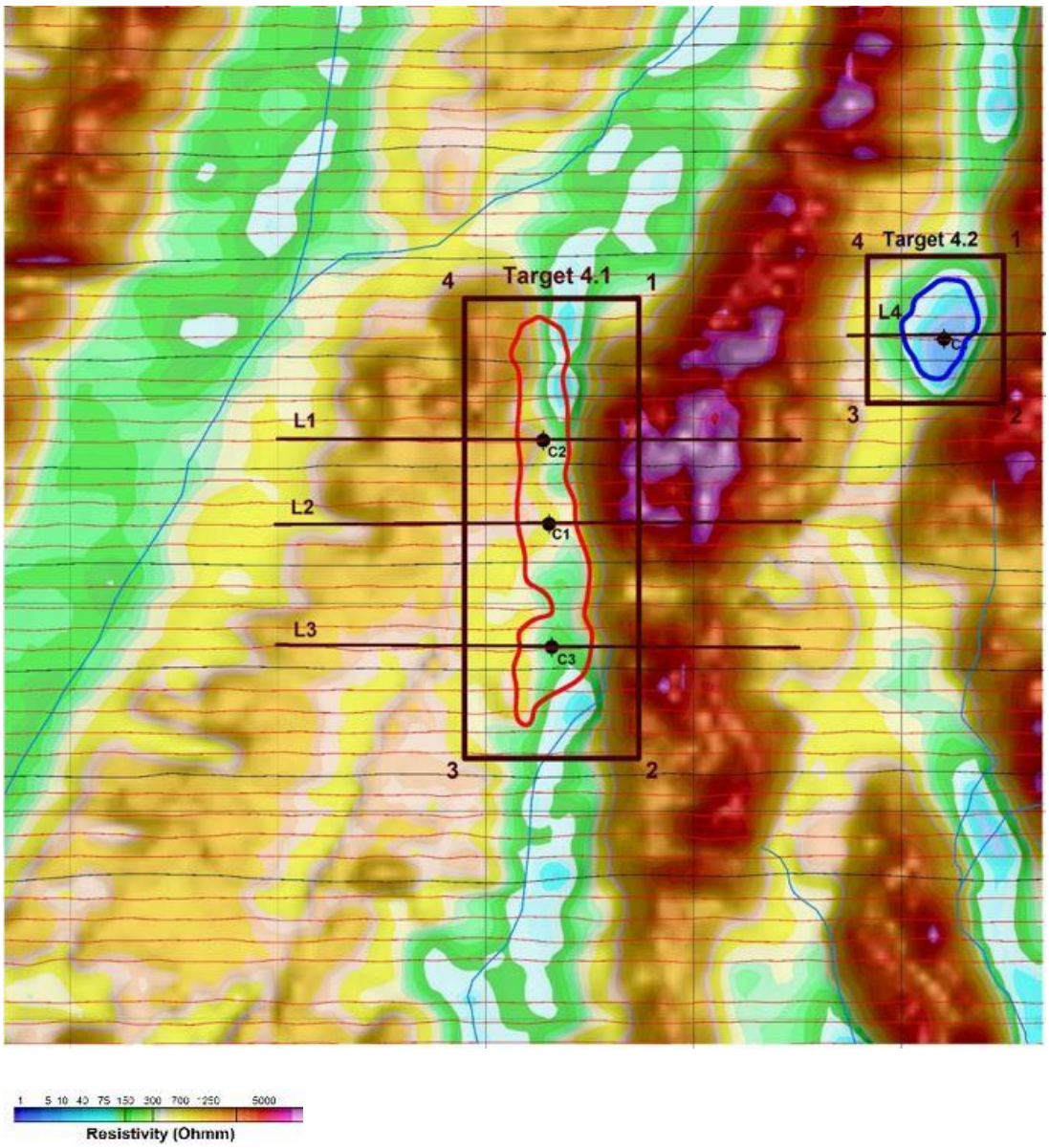


Рис. 10. Карта кажущихся сопротивлений для интервала глубин 0-200 м. Горизонтальные линии представляют фактические линии полета, выполненные через 100 м.

На линиях, проходящих через эпицентры магнитной аномалии, ширина проводника заметно меньше, а его сопротивления заметно выше (рис. 10). Проводящая зона, вмещающая магнитную аномалию, связана с графитизированными сланцами.

В 2018 г. разведочным бурением на 98 м был вскрыт объект с повышенным содержанием Cu, Ni, Ag, Au (рис. 11).



Рис. 11. Керн разведочного бурения на аномалии 4.

Радиогеохимическая специализация территории была получена на основе карты классов соотношения калия и тория, она существенно уточняет геологическую карту масштаба 1:100 000 (Рис. 12d)

Из сопоставления карт хорошо видно, радио геохимическая зональность не только уточняет внешние контуры отдельных массивов горных пород, но и показывает вариации их составов внутри единого блока.

Картирование гранитных интрузий и определения их вещественного состава по данным съемки масштаба 1:50 000.

Это яркий пример комплексного использования магнитных, электрических и радиоактивных характеристик исследуемой среды, регистрацию которых обеспечивает комплекс ЭКВАТОР.

Для гранитных массивов различного состава в Руанде характерна слабая дифференциация локальной составляющей магнитного поля, его интенсивность не превышает первых единиц нТл, по этому признаку достаточно надежно определяются внешние контуры гранитных интрузий. Кажущиеся сопротивления гранитов в зависимости от их типов меняются от 300 до 2500 Ом·м. Наиболее значимо граниты различаются по своей радио геохимической специализации. Физические свойства отдельных типов гранитов и их характеристики приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Физические свойства различных типов гранитов

№	Услов.	K_Th class	dT loc (nT)	Rk (Ом*м)	K (%)	Th (ppm)	Характеристика гранитных массивов.
1		22-24	0-4	500-700	0.2-0.4	3.6-17.1	Низкорадиоактивные граниты, характеризуются очени низкими содержаниями калия, относительно низкие сопротивления.
2		53-54	0-4	700-2500	2.0-2.15	11.2-16.4	Радиоактивные граниты, высокие содержания калия и средние содержания тория, высокие сопротивления.
3		33-35	0-4	300-600	0.86-0.91	10.9-24.2	Лейкограниты, содержания калия ниже средних, содержания тория средние и выше, сопротивления пониженные.
4		63-65	0-4	1300-2500	3.6-3.9	10.4-24.3	Высоко радиоактивные калиевые граниты, высокие содержания калия и тория, высокие сопротивления.

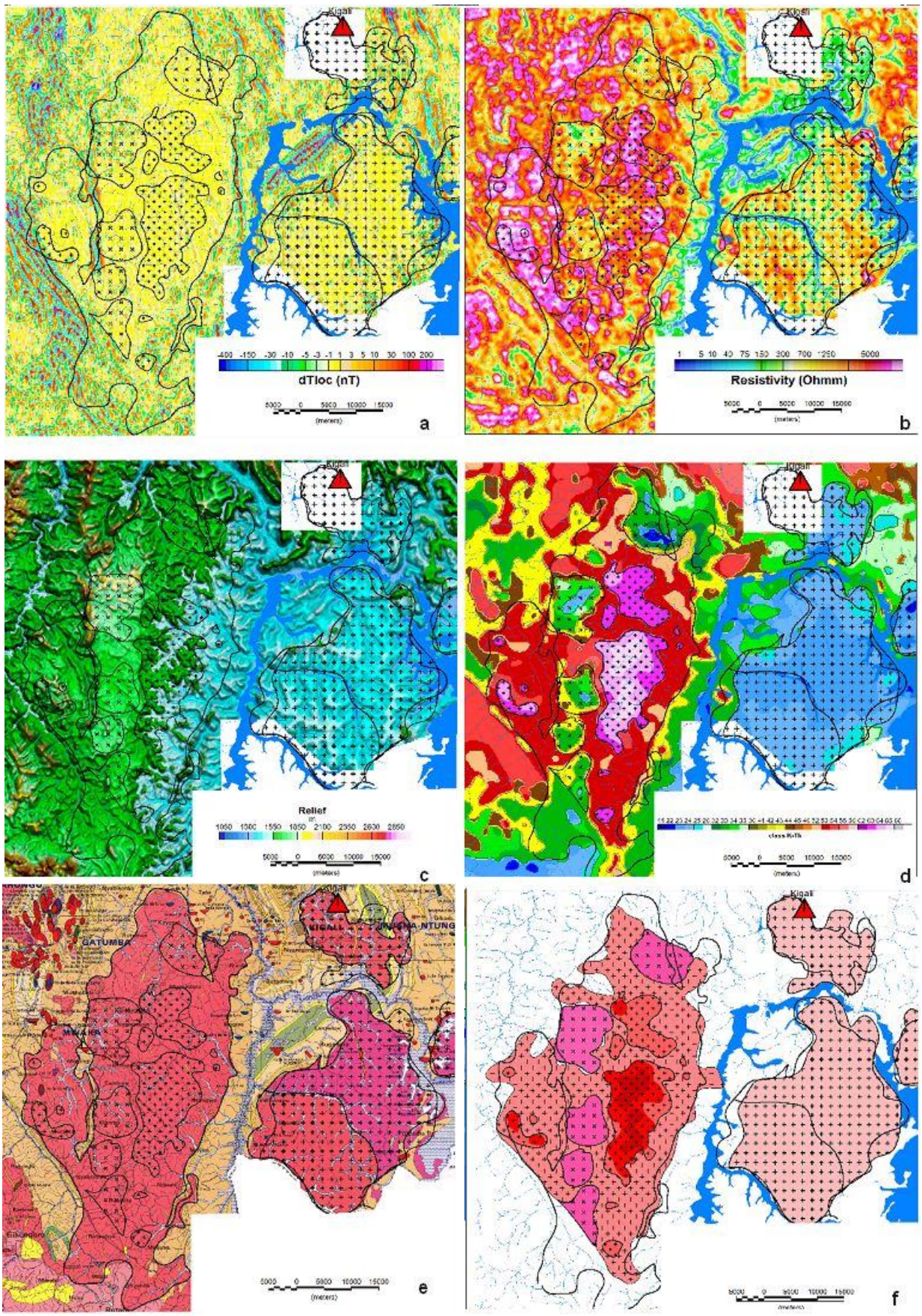


Рис. 12. Пример картирования гранитных интрузий и определения их состава.

*Карты: **a** – локальной составляющей аномального магнитного поля; **b** – интегральных кажущихся сопротивлений для интервала глубин 0-250м; **c** – цифровой модели рельефа; **d** – классов отношений K с Th; **e** – геологическая с интерпретационной нагрузкой; **f** – классификации гранитов по типам*

Пример выделения линейных аномальных зон в пределах сильнодислоцированных сложенных черносланцевыми толщами флишевых формаций протерозоя.

Площадь была выделена по результатам съемки масштаба 1:50 000 благодаря интенсивным линейным магнитным аномалиям и узким линейным зонам как высокого, так и низкого сопротивления. Указанные линиаменты находятся как на крыльях, так и в осевой части сложно дислоцированной антиклинальной складки, сложенной метаморфизованными сланцами. Результаты детализации масштаба 1:10 000 представлены на Рис. 13-17.

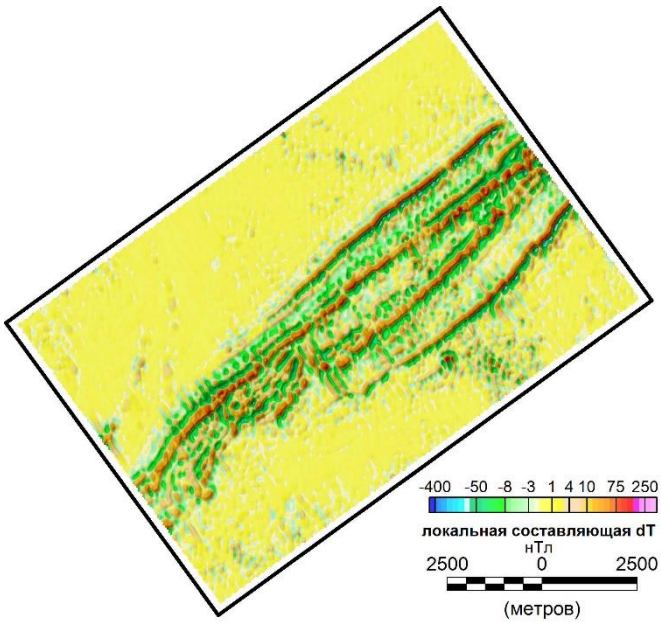


Рис. 13. ***Участок 14.*** *Карта локальной составляющей аномального магнитного поля.*

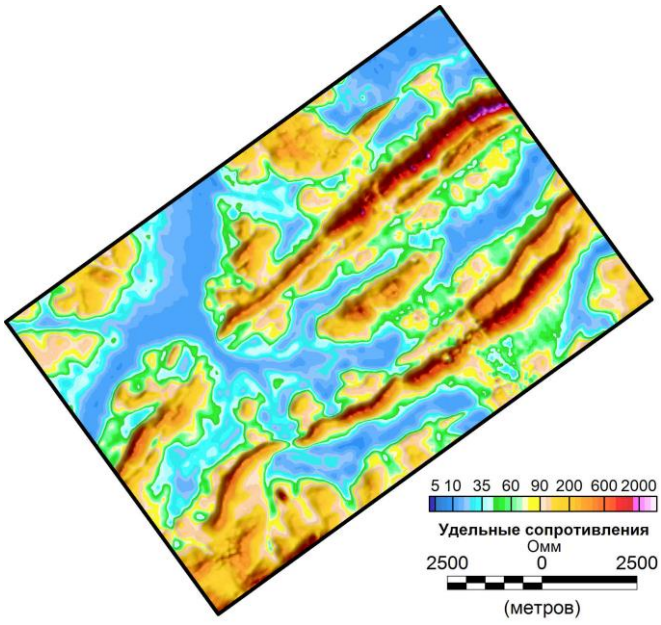


Рис. 14. ***Участок 14.*** *Карта кажущихся сопротивлений для интервала 0-200 м.*

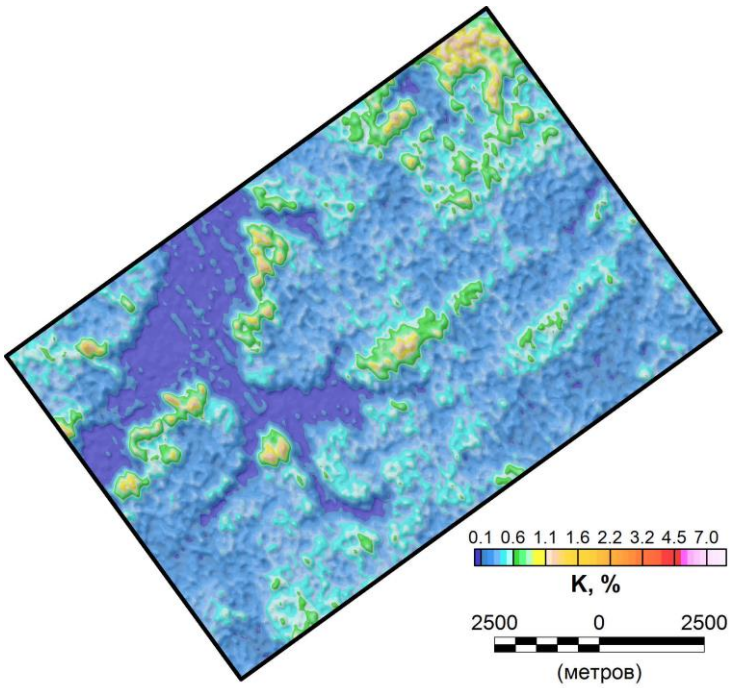


Рис.15. ***Участок 14.*** *Карта концентраций Калия.*

В результате комплексной интерпретации магнитных и электроразведочных данных выделены те аномальные объекты, которые, по нашему мнению, связаны с реальными геологическими телами они вынесены на геологическую карту и представлены на рис. 17. Таким образом детально откартированы интенсивные линейные положительно намагниченные тела. Средняя интенсивность аномалий 500-800 нТл, в отдельных экстремальных точках она достигает более 1200 нТл, по расчетам, в этих точках магнитные тела близки к поверхности. Эти тела пересекают водотоки, проходят по их склонам и локальным водоразделам, но не отражены на геологических картах. По всем признакам тела не выходят на дневную поверхность, а, скорее всего, перекрыты отложениями типа кор выветривания мощностью 150-200 м. По электрическим свойствам тела не контрастны.

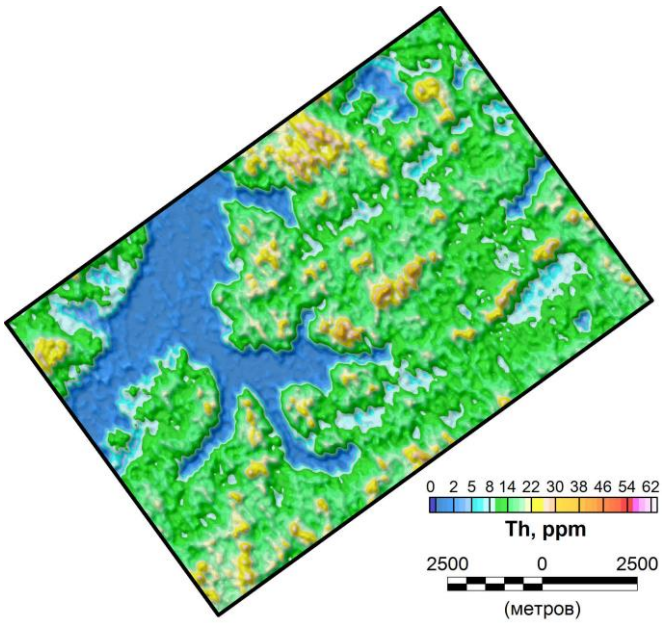


Рис. 16. ***Участок 14.*** *Карта концентраций Тория.*

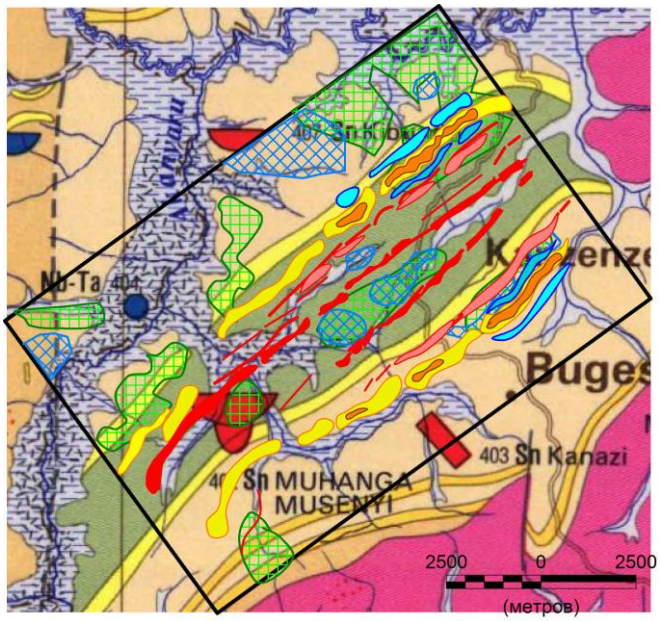


Рис. 17. ***Участок 14.*** *Выделенные линейные аномальные зоны на геологической основе.*

Условные обозначения к рисунку 17.

Оси положительных линейных локальных магнитных аномалий

Немагнитные линейные зоны повышенных сопротивлений (вероятно области интенсивного окварцевания)

Линейные зоны повышенных сопротивлений (вероятно кварцевые жилы)

Положительно намагниченные объекты со средними сопротивлениями

Положительно намагниченные объекты с пониженными сопротивлениями

Линейные зоны повышенной электропроводности

Области повышенных концентраций Калия

Области повышенных концентраций Тория

Субпараллельно интенсивным магнитным аномалиям находятся линейные магнитные объекты интенсивностью порядка 250-480 нТл, отрицательно намагниченные на севере и положительно - на юге. Магнитные объекты сопровождаются аномалиями сопротивления порядка 250-450 Ом·м. Описываемые тела также не выходят на дневную поверхность.

Линейные немагнитные высокоомные тела (500-1800 Ом·м) мы связываем с кварцитами. Аномально высокие сопротивления в их пределах можно трактовать как возрастание доли кварца в их составе или присутствие кварцевых жил.

Проводящая зона на юге сопровождается узкой линейной положительной магнитной аномалией (100-150 нТл). Объяснить природу проводящей зоны наличием углистых сланцев не позволяют магнитные аномалии. С другой стороны, низкое сопротивление не свойственно кварц-магнетитовым жилам. По нашему мнению, возможной причиной повышенной проводимости является сульфидная минерализация в приконтактной зоне, либо наличие вертикальных кор выветривания.

Выводы.

Аэрогеофизический комплекс ЭКВАТОР одновременно выполняет электромагнитные зондирования, регистрацию значений геомагнитного поля и гамма-спектрометрические измерения.

Конструкция комплекса обеспечивает выполнение кондиционных измерений в условия очень сложного горного рельефа при высоте полета авианосителя 100 м, соблюдая требования технических инструкций к съемкам 1:10 000 и 1:5 000 масштаба.

Высокая производительность комплекса (10 000 п. км за месяц), простота и легкость конструкции делает рентабельными съемки маленьких участков (100 км^2 и менее).

Высокая чувствительность сенсоров системы, стабильные условия измерений, высокая плотность наблюдений и минимальная высота полета обеспечивает надежное картирование контрастных аномальных объектов с горизонтальной мощностью менее метра.

Для решения золоторудных задач комплекс ЭКВАТОР способен надежно выделять и картировать в интервале глубин 0-400 м следующие геологические объекты:

- массивы гранитоидов, определять их типы и радиогеохимическую специализацию, фиксировать приконтактные изменения, связанные с процессами серитизации и лиственизации;
- зоны окварцевания, кварцевые и адуляр-кварцевые жилы, выделять сопровождающие их зоны лиственизации и сульфидизации;
- углеродистые (черносланцевые) толщи, фиксировать в их пределах области окварцевания и сульфидизации;
- дайки различного состава (риолитового, диоритового, диорит-порфирового, андезитового, габбрового и т.д.);
- зоны дробления и тектонические нарушения различного порядка;
- коры выветривания и области повышенной мощности рыхлых отложений (возможные россыпи) в пределах современных водотоков и палеодолин;
- различные типы вмещающих пород.

Мировой опыт открытия гигантских месторождений (Kidd Creek [Cu-Zn], Канада [Bleeker и Parrish, 1996], Olympic Dam [Cu-U-Au-Ag-REE], Австралия [Roberts и Hudson, 1983]) показывает, что за этапом высокоточной аэрогеофизической съемки следуют значительные объемы геолого-геофизических, горно-буровых работ со значительными объемами бурения.

Литература

1. Антонов, В.В., 1979. Геофизические методы при поисках и разведке золоторудных месторождений: Поиски месторождений твердых полезных ископаемых геофизическими методами, сборник научных трудов. – М.: Наука, 108–119.
2. Долгаль, А.С., Христенко Л.А., 2008. Результаты и перспективы геофизических исследований при поисках рудного золота на восточном склоне Кузнецкого Алатау: Вестник КРАУНЦ, науки о земле, **2**, 57-69
3. Ерофеев, Л.Я., Орехов, А.Н., 2014. Геолого-геофизические условия на золоторудных полях Сибири: Известия Томского политех. ун-та, **324**, 80-86.
4. Керцман, В.М., Бабаянц, П.С., Лёвин, Ф.Д., Трусов, А.А., 2015. Особенности современной аэрогамма-спектрометрии: Разведка и охрана недр, **12**, 10-16.
5. Керцман, В.М., Мойланен, Е.В., Подмогов, Ю.Г., 2019. Аэроэлектроразведочная система ЭКВАТОР. Сравнение геологической информативности частотных и временных электромагнитных зондирований: тезисы докладов EAGE Инженерная и рудная геофизика, Геленджик., 22–26 апреля 2019, 1–4
6. Киселев, М.И., 1973. Рациональный комплекс геофизических методов при поисках и разведке золоторудных месторождений: Разведка и охрана недр, **8**, 31–36.
7. Константинов, М.М., 2010. Золоторудные месторождения России: М., Акварель, С. 349.
8. Приходько, А.Ю., 2006. Условия формирования золоторудных месторождений по геофизическим данным: Геофизические исследования на твердые полезные ископаемые, тезисы докладов Международной геофизической конференции. – СПб., 2–6 октября 2006. – СПб.: ООО «Издательство Welcome», 284–285.
9. Ростова, Л.С., Копылов, А.В., 1977. Результаты аэрогеофизических исследований в северо-восточной части Байкало-Патомского нагорья (отчет Хомолхинской партии за 1973-77 гг, Иркутск.
10. Татьков, И.Г., 2015. Физико-геологические модели основных типов золоторудных месторождений юга восточной Сибири: Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», С. 23
11. Becker A., Barringer A.R., Annan A.P., 1987. Airborne electromagnetics 1978---1988, in Developments and Application of Modern Airborne Electromagnetic Surveys, D.V. Fitterman (ed.). United States Geological Survey Bulletin, **1925**, 9-20.
12. Bleeker, W., Parrish, R. R., 1996. Stratigraphy and U – Pb zircon geochronology of Kidd Creek: implications for the formation of giant volcanogenic massive sulphide deposits and the tectonic history of the Abitibi greenstone belt. Canadian Journal of Earth Sciences, **33**(8), 1213–1231.
13. Collett, L.S., 1986. Development of the airborne electromagnetic techniques, in Airborne Resistivity Mapping. Geological Survey of Canada Paper, **86**, 9-18.
14. Fountain D., 1998. Airborne electromagnetic systems -- 50 years of development. Exploration Geophysics, **29**, 1-11.
15. Grasty, R.L., Minty B.R.S., 1995, A guide to the technical specifications for airborne gamma-ray surveys: Australian Geological Survey Organisation, Canberra, 90 p.

16. Hodges G., 2013. The power of frequency domain: When you should be using it. Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa, 5 p.
17. Kaufman A.A., Alekseev D.A., Oristaglio M., 2014. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. Methods in Geochemistry and Geophysics, Elsevier, **45**, 469 p.
18. Macnae J., Baron-Hay S., 2010. Reprocessing strategy to obtain quantitative early time data from historic VTEM surveys. Proceedings of ASEG, 4 p.
19. Moilanen J., Karshakov E., Volkovitsky A., 2013. Time domain helicopter EM system EQUATOR: Resolution, sensitivity, universality. Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa, 4 p.
20. Pavlov B.V., Volkovitsky A.K., Karshakov E.V., 2010. Low Frequency Electromagnetic System of Relative Navigation and Orientation. Gyroscopy and Navigation, **1**, No. 3, 201--208.
21. Roberts, D.E. and Hudson, G.R.T., 1983. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit: Roxby Downs, South Australia, Econ. Geol., **78**, 799-822.
22. Smith R.S., 2001. On removing the primary field from fixed-wing time-domain airborne electromagnetic data: some consequences for quantitative modelling, estimating bird position and detecting perfect conductors. Geophysical Prospecting, **49**, 405-416.
23. Volkovitsky A., Karshakov E., 2013. Airborne EM systems variety: What is the difference? Extended Abstracts of the 6th International AEM Conference, Kruger Park, South Africa, 4 p.