

Опыт интерпретации данных аэроэлектроразведки ЗСБ с использованием S-плоскости

В. Ю. Хальбауэр-Задорожная¹, Е. Стеттлер²

¹Консультант, Претория, ЮАР, valeriya.hallbauer@gmail.com

²Университет Витватерсранда, Претория, ЮАР, stettlere@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Целью проведенных полевых работ было обнаружение новых потенциальных запасов медных и никелевых месторождений на двух участках в ЮАР. Работы проводились с использованием электроразведочных модификаций метода становления поля: гексакоптера (дрона) и вертолета. Основной задачей наших исследований была разработка способов интерпретации данных ЗСБ для обоих способов зондирования и интерпретация полученных данных. При работе с гексакоптером на земле раскладывалась генераторная петля размером 500 x 800 м², в качестве приемников поля использовались магнитометры. Зондирования выполнялись как внутри генераторной рамки, так и вне ее (до удаления в 500 м от каждой ее стороны). Общее количество точек ЗСБ 1000. Во втором случае интерпретировались материалы, полученные компанией Skytem. Эти работы проводились компанией по классическим для электроразведки методом: генераторная и приемная рамки были подвешены под вертолетом на тросе. В первом эксперименте для интерпретации использовался модифицированный нами метод расчета кажущейся продольной проводимости σ_{au} . Вначале для каждой точки зондирования определялись параметры эквивалентной проводящей плоскости продольная проводимости при фиксированной глубине. Затем для каждой точки зондирования рассчитывалась теоретическая кривая эдс при определенных параметрах „плавающей“ плоскости. Для соблюдения условий ближней зоны расчет теоретических кривых производился для установки малых размеров. По этим теоретическим кривым эдс рассчитывалась кажущаяся продольная проводимость от глубины по общеизвестной методике. При работах с данными вертолетной разведки использовался классический способ расчета с учетом превышения установки над землей. В отличие от способа σ_{au} , широко применяемого в СССР, нами не ставилась задача расчленения разреза на определенное число слоев, а лишь выявление проводящих объектов и оценка глубины их залегания. В вертолетном варианте ЗСБ было зарегистрировано около 330 000 точек. Полный расчет и подготовка файлов для визуализации отдельно по 143 профилям составил 8 часов. В результате построены трехмерные изображения геоэлектрических параметров исследуемой территории. Все имеющиеся скважины, вскрывшие рудные тела отразились в зонах повышенной продольной проводимости. Выявлены многочисленные аномалии, возможно, связанные с неразведанными пока запасами медных и никелевых руд.

Ключевые слова: аэроэлектроразведка, дрон, ЗСБ, интерпретация

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время аэроэлектроразведка методом становления поля лидирует в шеренге модификаций этого метода. Это достаточно дешевый метод, который несоизмерим по скорости проведения полевых работ и плотности сети зондирования по сравнению с наземными методами. За несколько дней аппаратура, установленная на вертолете или самолете способна записать сотни тысяч точек зондирования. В аэроэлектроразведке используются как самолеты, так и вертолеты. В настоящее время в практику полевых работ входят такие инновации, как дроны. Новые модификации ЗСБ принесли с собой новые проблемы как технического, так и интерпретированного характера. Очевидно, что

для аэромодификаций ЗСБ необходимы алгоритмы и программы, способные максимально быстро провести первичную обработку и интерпретацию данных. И если с первичной обработкой дело состоит не так уж плохо, то программы интерпретации, как правило, лишь визуализируют вдоль профилей сигналы, зарегистрированные на всех временах. Это слишком примитивный подход к интерпретации. Неоднородности верхней части разреза могут завуалировать проводящие тела. Но самое главное, ни вертолет, ни даже дрон не летают на одной и той же высоте и изменения высоты полета могут кардинально изменить картину в выявлении проводящего объекта. При понижении высоты полета сигнал увеличивается, и наоборот. Уровень сигналов изменяется, амплитуда сигнала от проводящих тел может

быть соизмерима или меньше, чем необходима для ее уверенного выделения на кривых ЗСБ.

Нами проведены опытные работы с использованием гексакоптера и интерпретированы данные, полученные известной компанией Skytem. В основу интерпретации положен известный способ (S_{τ}). Однако, в данном случае перед нами не стояла задача расчленения разреза на серию слоев. Геологической задачей являлось выявление в разрез проводящих объектов, обусловленные скоплениями рудными минералов и оценить глубину их залегания.

Технология полевых работ ЗСБ с дроном и вертолетом

Высокоразрешающая магнитная съемка и фотометрия с помощью дронов используется давно. Новым является сбор данных суммарного переходного электромагнитного поля (TFTEM) одновременно с магнитными данными с помощью того же датчика полного поля и большой токовой петли на земле. В парке компании AeroPhysX Ltd используются два гексакоптера (дрона): DJI 600 Pro или Gaya 160S. Оба гексакоптера работают с программным обеспечением UGC, но обновлены специально для наших целей компанией UGC. В качестве приемника магнитного и электромагнитного полей (ЗСБ) используются магнитометры Geometrics MagArrow Cesium Varour, которые производят замеры на частоте 1 кГц с разрешением 0,01 нТл. Гексакоптеры могут находиться в воздухе от 50 до 70 минут с гондолой MagArrow (общий вес 1,2 кг) в зависимости от погодных условий (рисунок 1).



Рисунок 1. Гексакоптер DJI 600 Pro с подвеской, где размещены магнитометры.

Что важно в геофизической съемке с помощью дронов, так это иметь очень подробную digital terrain model (DTM) то есть карты высот в цифровом виде. Высота полета определяется с

помощью GPS. Высота полета над местностью на высоте обычно 35 метров. Для TFTEM скорость полета гексакоптера ~ 13 км/ч.

Ток в генераторной рамке 100 А, напряжение 240 В. Длина импульса тока 250 мс во включенном и 250 мс в выключенном состоянии. Обработка собранных магнитных данных заключается в том, чтобы отделить сигнал ЗСБ от магнитного поля Земли, изолировать токи отключения и суммировать переходные процессы с помощью метода Халверсона. Для подавления помех производится суммирование 16, 32 или 64 значений магнитного поля на каждом времени зондирования.

В вертолетном варианте (стандартная модификация VTEM) приемная шестигранная рамка подвешена под вертолетом, а приемная крепится на одном из ее углов (Рисунок 2). Амплитуда тока 109 А. Превышение установки над землей составляет 20-40 м.

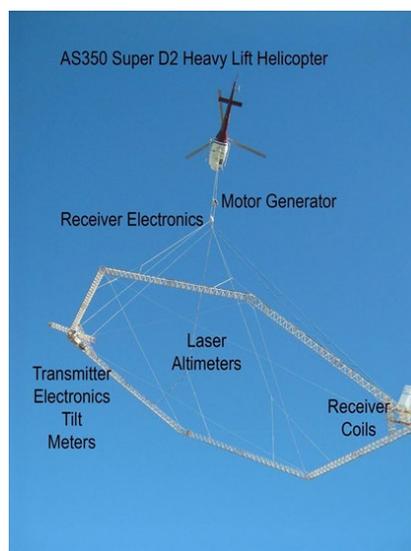


Рисунок 2. Установка зондирования VTEM, используемая компанией Skytem.

Модификация способа расчета кажущейся продольной проводимости σ_{stau}

Так называемый способ дифференциальной трансформации кривых зондирования в кривые кажущейся продольной проводимости был разработан В.А.Сидоровым и В.В.Тикшаевым в конце шестидесятых годов прошлого века. К сожалению, авторы и многие пользователи возлагали на этот способ слишком большие надежды, а наиболее увлеченные даже пытались выделить в разрезе более десяти слоев различного сопротивления. Дифференциация сигнала сама по себе приводит к флуктуациям на кривых S_{τ} . В. Задорожной в кандидатской диссертации (1984) было показано, что зачастую даже разрезы,

включающие всего три проводящие пластины, не могут быть однозначно идентифицированы. В.Агеевым (1997) провел расчеты и доказал, что локальные нарастания на кривых в большинстве своем обусловлены процессами вызванной поляризации. Сейчас в век тотальной компьютеризации большинство исследователей использует для интерпретации коммерческие программы, основанные на решении прямых задач становления поля и способ S_T ушел в историю.

Однако, способ S_T обладает определенными преимуществами. Его использование позволяет определить суммарную проводимость разреза и глубину, где происходит ее заметное нарастание, если в разрезе присутствуют проводящие тела и/или слои. Этим свойством мы и воспользовались при интерпретации данных аэроэлектроразведки.

Магнитометры, укрепленные на гексакоптере, записывают все три компоненты магнитного поля. После преобразований (вычитания суммарного магнитного поля) мы выделяем компоненту B_z . Далее происходит сложная процедура сглаживания сигнала для подавления многочисленных помех. Процедура сглаживания для компоненты поля B_z требовала особой тщательности. Способ S_T может быть использован только для условия ближней зоны, в то время, как используемая установка и расположение точек наблюдения условиям ближней зоны не удовлетворяют.

По положению Смайта (1954), независимо от положения точки наблюдения в каждый момент времени амплитуда вектор потенциала A_x (и, соответственно, B_z) будет равна амплитуде некой „плавающей“ плоскости залегающей на глубине h и с проводимостью S эквивалентной суммарной продольной проводимости всего разреза до глубины h . Для диполя или короткой электрической линии AB имеем:

$$B_z(t) = I AB \mu / 2\pi / f(m)^{3/2}, \quad (1)$$

$$\text{где } f(m) = (r^2 + 4m^2)^{3/2}, \quad 2m = 2h + z_0 + 2t/\mu S.$$

I – ток, t - время, z_0 - превышение установки над поверхностью земли, μ - магнитная проницаемость. Таким образом, вертикальная компонента магнитной индукции B_z зависит от одного неизвестного параметра m , который включает и глубину, и проводимость эквивалентной разрезу плоскости.

Определение параметров разреза в каждой точке зондирования производится следующим образом:

1. Сопоставляя зарегистрированную кривую B_z с теоретической, рассчитанной для той же установки (при фиксированном h) мы получаем $m(t)$ в каждой точке зондирования.

2. Для заданной функции $m(t)$ рассчитывается теоретическая кривая B_z , но для установки петля в петлю с малыми размерами приемной рамки ($AB=25$ м) и находящейся на поверхности земли.
3. Дифференцирование сигнала по времени позволяет получить теоретическую кривую эдс как функцию определенного нами параметра m .
4. Последующее сглаживание сигнала эдс.
5. Трансформация сигнала в кривые кажущейся продольной проводимости, по известным формулам (Сидоров В.А., Тикшаев В.В., 1970).

Что касается данных электроразведки, полученных при вертолетной съемки, то кривые предварительно сглаживались, а затем производилась трансформация кривых эдс в кривые S_T (пункт 5). Однако, часть кривых искажена явлениями поляризации, возможно, связанными с присутствием в породах рассеянных минералов. Написанная программа позволяет идентифицировать такие кривые, а при построении трехмерной модели на глубинах проявления этого эффекта сопротивление пород принималось очень высокими.

Результаты работ ЗСБ с использованием дрона

Территория исследования О'Кьер расположена на юго-востоке Южно-Африканской республики. На этой территории идет разработка месторождений меди. Минералы, содержащие медь, характеризуются, в основном, низкими или пониженными значениями сопротивлений. На рис. 3 показана трехмерная геоэлектрическая модель, построенная по данным ЗСБ. В северной стороне модели четко прослеживается падение проводящего тела с глубиной. Здесь же расположены многочисленные скважины, вскрывшие это тело. На этом участке ведутся разработки месторождения. Единичные скважины пробурены в южной части модели. Скважины эти неглубокие, они вскрыли небольшие запасы меди на этом участке. Однако, уверенная аномалия очень низкой проводимости, простиравшаяся с севера на юг и погружающаяся +600 до +250 м, пока дожидается дополнительного финансирования для производства бурения.

Результаты работ ЗСБ с использованием вертолета

Работы проводились на участке Hondekloof (собачье ущелье). Общее число точек зондирования около 330 000. Месторождения никеля приурочены к кольцеобразной структуре. Плотность зондирования - 5 м между точками, 25 м - между профилями. На рисунке 4 показана трехмерная модель,

построенная по данным ЗСБ. Синим цветом показаны зоны низкого сопротивления. На рисунке 5 показан участок, где интенсивно ведется экскавация никеля содержащих пород. Все скважины, вскрывшие рудное тело (показаны розовым цветом) находятся в центральной части данной аномалии. Скважины с невысоким содержанием никеля (желтый цвет) расположены на периферии аномальной зоны. Есть основания полагать, что зоны высокого сопротивления связаны с присутствием не массивных рудных тел, а рассеянных минеральных частиц, также представляющих поисковый интерес. На этих участках кривые становлением поля искажены эффектами вызванной поляризации.

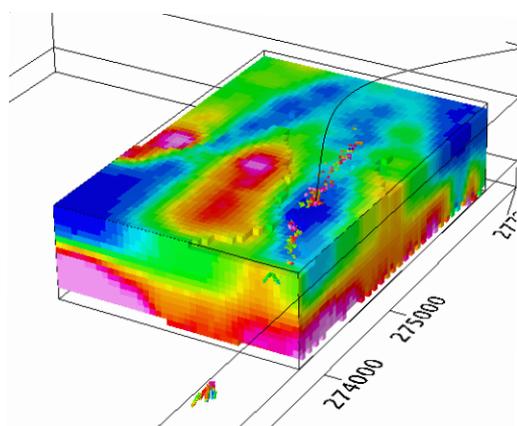


Рисунок 5. Аномалии продольной проводимости на разрабатываемом участке зондирования. Диапазон изменения проводимости показан на рисунке 4.

Выводы

Целью проведенных полевых работ было обнаружение новых потенциальных запасов медных и никелевых месторождений на двух участках в ЮАР O'Kiep и Hondekloof. Использовались электроразведочные модификаций метода становления поля. На первой территории записи сигналов эдс осуществлялись с гексакоптера, зондирования на участке Hondekloof выполнялись в классической модификации VTEM. Общее количество точек ЗСБ 1000 составляло и 330 000, соответственно. В первом эксперименте для интерпретации использовался модифицированный нами метод расчета кажущейся продольной проводимости $stau$. При работах с данными вертолетной разведки использовался классический способ расчета с учетом превышения установки над землей. Полный расчет и подготовка файлов для визуализации отдельно про 143 профилям составил 8 часов. В результате построены

трехмерные изображения геоэлектрических разрезов исследуемой территорий. Все имеющиеся скважины, вскрывшие рудные тела отразились в зонах повышенной продольной проводимости. Выявлены многочисленные аномалии, возможно, связанные с неразведанными пока запасами медных и никелевых руд.

ЛИТЕРАТУРА

- Задорожная ВЮ, 1984 Интерпретация результатов зондирований становлением электромагнитного поля в ближней зоне при поисках органогенных образований в Прикаспийской синеклизе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. М: ВНИИГеофизика.
- Сидоров ВА, Тикшаев ВВ, 1970. Интерпретация кривых становлением поля в ближней зоне. Разведочная геофизика, № 42, М: Изд-во Недр, с 48-59.
- Смайт ВР, 1954. Электростатика и электродинамика. М: Изд-во ИЛ.

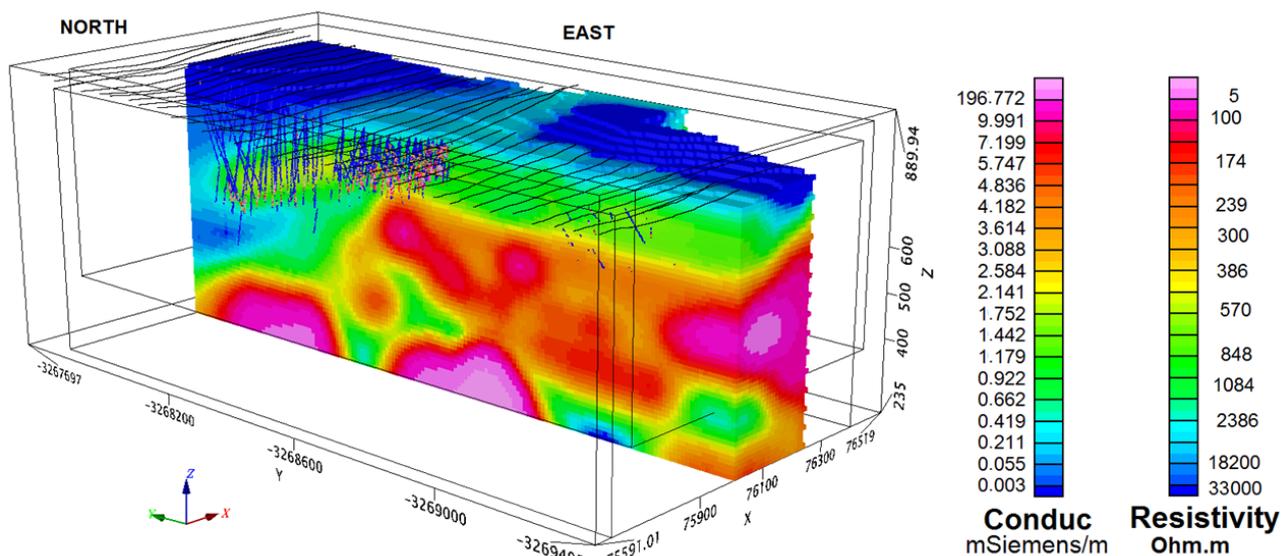


Рисунок 3. Трехмерная геоэлектрическая модель, месторождение О'Кьер.

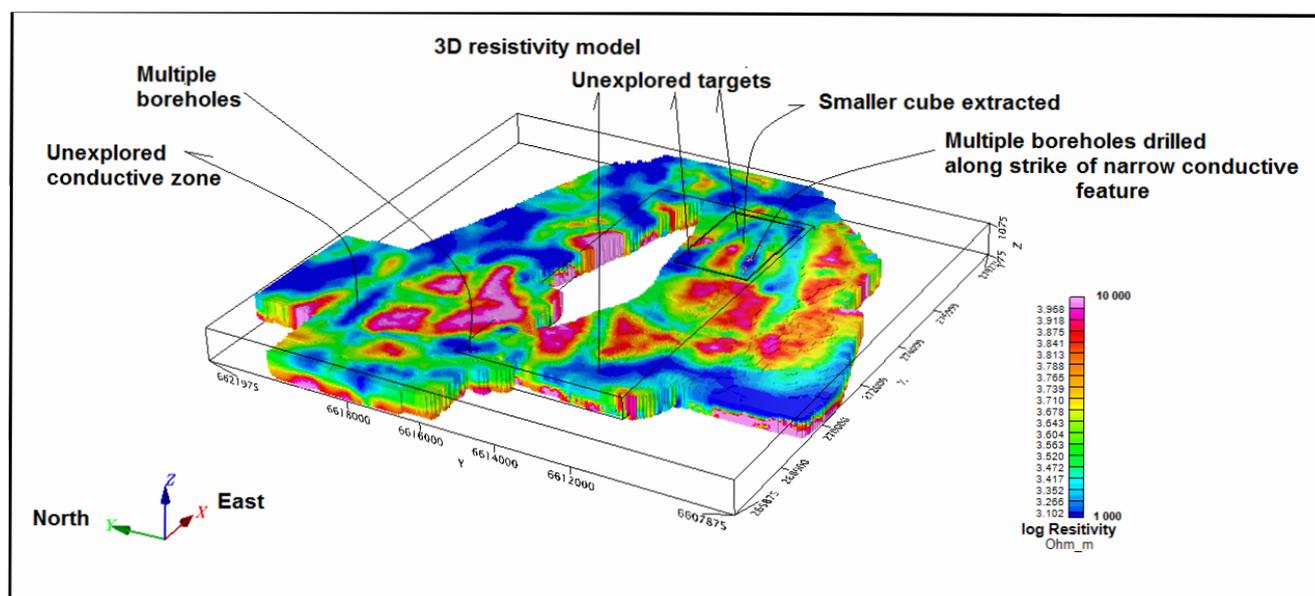


Рисунок 4. Трехмерная геоэлектрическая модель, месторождение Hondekloof.