

УДК 550.837.6

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ НА ПОЛИМЕТАЛЛЫ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С КОНТРОЛИРУЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ В РАЙОНЕ РУДНОГО АЛТАЯ

Бабушкин Сергей Михайлович<sup>1</sup>,  
bab@gs.sbras.ru

Егоров Алексей Николаевич<sup>2</sup>,  
uk\_ch\_alex@mail.ru

Неведрова Нина Николаевна<sup>3,4</sup>,  
NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

Шапаренко Илья Олегович<sup>3</sup>,  
ShaparenkoI@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> ТОО «Геологоразведочная компания "Топаз"», Республика Казахстан, 070001, г. Усть-Каменогорск, ул. Геологическая, 1.

<sup>3</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. академика Коптюга, 3.

<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью поиска новых промышленных рудопроявлений в связи с тем, что большая часть разведанных месторождений Убинского рудного поля уже отработана.

**Цель работы:** уточнение строения и выявление перспективных на руду объектов в глубоких горизонтах и фланговых частях Убинского рудного поля Рудного Алтая с использованием электромагнитных методов постоянного и переменного тока.

**Методы исследования:** основной объем полевых данных получен методом электромагнитного зондирования становлением поля с индуктивными соосными и разнесенными установками. Дополнительно выполнены измерения методом электротомографии на постоянном токе. Обработка, интерпретация, визуализация данных осуществлялась с помощью интерактивных программных комплексов моделирования и инверсии ЭРА, EMS, ZondTEM1D. Обоснование результатов проведено на основе анализа и сопоставления данных комплекса геолого-геофизических методов.

**Результаты.** По данным метода электромагнитного зондирования становлением поля построены разрезы по профилям наблюдений, площадные распределения удельного электрического сопротивления на нескольких интервалах глубин, а также трехмерные модели перспективных на руду зон. Впервые выявлено три типа аномальных зон, соответствующих рудным объектам, отличающихся размерами и глубиной залегания. Наибольшая глубина залегания аномальных объектов получена в юго-восточной части Убинской площади. По результатам электротомографии прослежено проявление разломных структур в верхней части разреза. Обоснованы последующие работы методами электроразведки, включающие более глубинную съемку в центральной и юго-восточной части участка и более детальные измерения в пределах выделенных перспективных зон.

**Выводы.** Применение электроразведочных методов эффективно для поисков полиметаллов в районе Рудного Алтая. По данным электромагнитного зондирования становлением поля подтверждена перспективность на полиметаллы юго-восточной части Убинской площади, где получены наибольшие глубины залегания рудных объектов и по комплексу геологических и электроразведочных данных рекомендована электроразведочная съемка до глубин 700–1200 м.

### Ключевые слова:

Рудный Алтай, Убинское рудное поле, метод электромагнитного зондирования становлением поля, электротомография, геоэлектрические разрезы, трехмерные геоэлектрические модели, низкоомные зоны перспективные на полиметаллы.

### Введение

Методы электроразведки с контролируемыми и естественными источниками традиционно широко применяются для поисков и разведки полиметаллических месторождений. Эти методы особенно эффективны при наличии интенсивного оруденения. Сульфиды и другие полиметаллы создают значимые геоэлектрические аномалии, так как имеют очень низкие значения удельного электрического сопротивления (УЭС), на несколько порядков отличающиеся от вмещающих высокоомных горных

пород. В случае вкрапленных либо маломощных жильных рудных структур электромагнитные методы позволяют выделять перспективные на руду области, обычно приуроченные к разломным нарушениям, границам блоков, а также имеющиеся зоны сопутствующих метасоматических изменений (сульфитизации, графитизации, и др.).

Анализ публикаций по этой тематике показывает, что большинство исследователей используют широкий спектр геофизических методов, их комплексирование. Вместе с электроразведкой прив-

лекают, например, магниторазведку, сейсморазведку гравиразведку, электрохимические методы, гамма-спектрометрические измерения и др. [1]. Например, при исследованиях медно-никелевого оруденения в Норильске работы проводились с помощью магнитотеллурических методов, электротомографии, вызванной поляризации (ВП), геомагнитной съемки [2]. Такой широкий комплекс дает положительные результаты, но, конечно, повышаются и финансовые затраты. Для группы методов геоэлектрики используется внутреннее комплексование, т. е. выбирают несколько разных модификаций для решения поставленной задачи. К менее затратным можно, например, отнести успешные работы двумя методами геоэлектрики при поисках ильменитовых руд в Приморье. Месторождение на глубинах 100–120 м исследовалось с помощью вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и ВП [3]. В электроразведочной практике часто применяют совместно методы ВЭЗ и электромагнитное зондирование становлением поля (ЗС). При современных исследованиях по данным метода ВЭЗ можно детально расчленив самую верхнюю часть разреза в пределах нескольких метров и получить информацию до глубин в первые сотни метров, в то время как метод ЗС имеет преимущества, заключающиеся в более высокой глубинности (первые километры) и производительности полевых работ. В целом геофизический комплекс должен быть рациональным и максимально учитывать физико-геологические условия участков исследования, которые расположены в разных рудных провинциях, отличающихся разнообразием геологических обстановок.

В настоящее время нельзя обойти вниманием методы электротомографии на постоянном токе (ЭТ). Они наиболее эффективны среди методов геоэлектрики для малоглубинных изысканий на рудные полезные ископаемые. ЭТ относится к сравнительно новым технологиям автоматизированных многоэлектродных наблюдений с высокой разрешающей способностью по сравнению с классическими ВЭЗ и электропрофилеированием [4–6]. Для этой группы методов имеются развитые аппаратные и интерпретационные средства исследования неоднородных, сложно-построенных геологических массивов, глубинность достигает в среднем до 100–150 м в зависимости от разреза [6]. Методы электротомографии, основы которых заложены в конце прошлого столетия, постоянно совершенствуются. В частности, в последние годы разработан аппаратный комплекс для наземных наблюдений методом ЭТ, с глубинностью примерно до 300 м [7].

На современном этапе следует учитывать, что поиски и разведка полиметаллов осуществляются на все больших глубинах. В частности, в Рудном Алтае эти глубины могут превышать 500 м, поэтому по-прежнему актуальны глубинные методы геоэлектрики с контролируемым источником, среди

которых нестационарные электромагнитные зондирования являются ведущими. Модификация зондирования становлением поля с индуктивным возбуждением позволяет выполнять измерения без заземлений в широком диапазоне глубин, с компактным оборудованием [8]. Новые аппаратные разработки с использованием модульных приемных систем и многовитковых компактных рамок в качестве измерительной установки обеспечивают высокую производительность работ, низкие погрешности измерений во всем временном диапазоне [9]. Кроме того, при определенных условиях можно использовать ЗС как поисковый моно-метод, конечно, с привлечением достаточного числа априорных геологических, скважинных данных и результатов предшествующих геофизических работ.

Методика интерпретации для сложно-построенных сред наиболее развита для методов постоянного тока. Вместе с тем в последнее десятилетие разработаны подходы к совместной инверсии данных разных методов: ВЭЗ и ЗС, использованных для построения глубинной геоэлектрической модели участка в Томской области [10], данных аудиоманнитотеллурики и электротомографии для решения рудных задач [11]. Для метода становления электромагнитного поля совершенствуются способы обработки полевых данных с использованием трехмерного моделирования и инверсии, развиваются технологии двух-трехмерной визуализации, привлекаются индуктивные методы вызванной поляризации [12–14].

В данной статье рассмотрены поисково-оценочные электроразведочные работы методом становления поля, выполненные в районе Рудного Алтая на участке Убинский, перспективном на полиметаллы. В настоящее время решение поисковых задач в этом регионе связано с целым рядом трудностей, обусловленных в первую очередь сложными геолого-геофизическими моделями перспективных на руду территорий. Осложняющими факторами являются большие глубины залегания рудных объектов, разнородный литологический состав вмещающей толщи, изменяющиеся в широком диапазоне геофизические характеристики рудных тел, присутствие разнонаправленных разломных структур и зачастую горный рельеф, не позволяющий выполнить измерения с необходимым шагом. При постановке работ на участке Убинский оценивались преимущества и недостатки разных модификаций электроразведки, учитывались геологические, экономические и экологические аспекты, наличие априорных данных. На исследуемой площади ранее был выполнен комплекс геофизических методов (магниторазведка, гравиразведка, электроразведочные работы методом ВП-СГ, геохимическое картирование). Главной целью исследования являлось уточнение строения участка и выявление перспективных на руду объектов в глубоких горизонтах и фланговых частях Убинского рудного поля.

### Геологическая изученность участка исследования

Рудный Алтай относится к крупнейшим колчеданным провинциям. На сегодня имеется значительный объем материалов по геологическому строению и металлогении этого региона. Убинская площадь, в пределах которой проводятся электроразведочные измерения, находится в Прииртышском рудном районе юго-западного Алтая. Участок работ расположен в зоне сочленения Алейского антиклинория с Быструшинским прогибом. По данным скважин, результатам петрофизических измерений, литературным источникам, известны литолого-стратиграфические характеристики породных комплексов участка. В основании разреза залегают метаморфические сланцы нижнего палеозоя – корбалихинская свита. Выше с угловым несогласием разрез слагают свиты среднего девона: холозовская (песчаники с прослоями конгломератов, туфов, лав), лосишенская рудоносная (алевролиты, известняки, песчаники, тела туфов риолитовых порфиров); а также таловская и гериховская свиты верхнего девона (глинистые алевролиты, песчаники, туфы и лавы). Залегание толщ девона, субгоризонтальное на севере участка, сменяется на более крутое в южной его части. Сверху древние отложения перекрыты рыхлыми кайнозойскими глинистыми породами, мощность которых неустойчива и изменяется от нескольких метров до 250 м. Четвертичные осадки сосредоточены по долинам рек с максимальной мощностью около 50 м. Интрузивные образования развиты в северо-западном и южном обрамлении этой площади, где слагают достаточно крупные массивы – Маралихинский и Лосишинский соответственно. На дневной поверхности наблюдаются выходы метаморфических сланцев нижнего палеозоя, вулканогенно-осадочных пород девона и пестрых по составу интрузивов [15]. С учетом геологических и электрофизических характеристик горных пород, слагающих участок, было выяснено, что они хорошо дифференцированы по удельному электрическому сопротивлению, что дает основания для применения электроразведки.

В целом Верх-Убинское рудное поле в структурном отношении представлено тектоническим блоком, погружающимся на юг под рудовмещающие отложения до глубин 0,8–1,5 км. Блок ограничен по данным грави-магниторазведки на юге Шемонаихинско-Секисовской разломной зоной, на востоке – Убинским палеоуступом и на западе – габбро-гранитоидами алейского комплекса. Фактически это моноклираль с преобладающим пологим падением к юго-западу, осложненная взбросами и надвигами. Субширотные и меридиональные разломы контролируют рудные тела. Меридиональные разломы пересекают весь разрез рудного поля. Широтные разломы более четко проявляются в автохтонной части разреза.

### Характеристика полезных ископаемых

Рудное поле Прииртышского района включает медноколчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения. Разведанные месторождения и рудопроявления приурочены к отложениям лосишинской, таловской и гериховской свит и связаны с субвулканическими образованиями риолитовых порфиров. На участке исследования выявлены два типа колчеданно-полиметаллического оруденения. Первый тип ассоциируется с вытянутыми пластообразными телами, либо линзами, согласно залегающими в туфогенно-осадочных отложениях лосишенской свиты. Второй тип – штокообразный и жильный, приурочен к крутопадающим зонам повышенной трещиноватости или/и дробления. По результатам предшествующих работ, рудные тела локализованы в основном в отложениях нижней части лосишенской свиты, в которой могут присутствовать два рудных горизонта. По данным бурения, в центральной части площади в зоне Родникового рудопроявления получено промышленное содержание рудных компонентов. Лунихинское рудопроявление выявлено по данным ВП. С помощью геохимического картирования установлены два крупных поля аномально повышенной концентрации Cu, Pb, Zn (рис. 1) [15].

Все известные рудные тела месторождений Верх-Убинского, Покровского и рудопроявлений характеризуются сложным внутренним строением с тектоническими нарушениями, большой изменчивостью состава и невыдержанными содержаниями рудных и сопутствующих компонентов. Эти факторы усложняют поисково-разведочные работы. Можно отметить, что значительная часть полиметаллических месторождений, включая крупные, уже отработана, но по ряду геолого-геофизических данных на участке исследования имеются перспективы нахождения новых оруденений с промышленным содержанием Cu, Pb, Zn. Оценка ресурсов Au и Ag не проводилась.

### Аппаратурно-методические средства электроразведочных работ

Основным методом исследования является зондирование становлением электромагнитного поля, основанное на измерениях поля переходных процессов в земле. Для возбуждения поля создается импульсное переключение тока в питающей (генераторной) установке. Стандартным приёмом является включение постоянного тока в генераторной установке и через строго определённое время резкое его выключение. Наиболее широкое распространение получило ступенчатое изменение тока по определённому закону, например, импульс выключения описываемый функцией Хэвисайда. Выключение тока в источнике приводит к возникновению в проводящей земле неустановившегося электромагнитного поля, и далее изучается про-

цесс его установления. Глубина проникновения поля переходных процессов в землю возрастает с увеличением времени, прошедшего с момента включения тока, и называемого временем становления. При этом измеряемый в приёмной установке сигнал падает до нуля, изменяясь сложным образом. График зависимости нормированного наблюдаемого сигнала от времени становления называется кривой становления поля ( $\rho$ ). Вид этой кривой определяется распределением электропроводности в разрезе [16].

Главным преимуществом зондирования становлением поля по сравнению с частотным зондированием и методами сопротивлений является возможность применения установок, размеры которых существенно меньше глубины залегания целевого объекта. Множество существующих модификаций этого метода отличаются способами возбуждения поля и набором регистрируемых компонент. Наибольшее распространение получили модификации с индуктивным возбуждением и регистрацией производной вертикальной компоненты магнитного поля, имеющие ряд принципиальных преимуществ. Применение индуктивных генераторно-приемных установок не требует заземлений, на индуктивную составляющую поля практически не влияют высокоомные экраны и приповерхностные неоднородности, имеется повышенная устойчивость к промышленным и магнитотеллурическим помехам. Так как измерения проводятся вблизи источника, увеличивается локальность и детальность исследования, практически снимается вопрос о положении точки записи [17]. В целом модификация обладает высокой разрешающей способностью. Учитывая перечисленные преимущества для работ на Убинской площади, использована именно эта модификация.

Для успешной реализации полевых измерений привлечены современные аппаратные разработки. Аппаратура метода имеет ряд особенностей, определяемых характером измеряемого сигнала. Сигнал становления поля за короткое время изменяется в очень широком диапазоне (на 5–6 порядков). На малых временах становления ЭДС в приемной петле может достигать десятков вольт, а на поздних уменьшаться до долей микровольт. Поэтому измерительная аппаратура должна обладать высокой чувствительностью на поздних временах, т. е. достаточным минимальным уровнем измеряемого сигнала и широким динамическим диапазоном (отношение максимального измеряемого сигнала к минимальному), что позволит выполнить регистрацию в необходимом временном диапазоне, начиная с самых ранних времен (0,02 мс). Важной характеристикой аппаратуры, влияющей на глубинность исследования, является максимальная величина тока, которую создает генераторное устройство.

Все эти особенности учтены в цифровой телеметрической аппаратуре серии «Байкал МЭРС-Т». В измерительном блоке предусмотрена многока-

нальная телеметрическая система, предназначенная для организации как профильной, так и площадной системы регистрации высокой плотности. Полевой измеритель состоит из устройства управления, АЦП, усилителя, встроенного источника питания. Измерительные модули располагаются непосредственно у приемных конструкций, которых может быть несколько и любых типов (петли, линии, многовитковые датчики). Предусмотрено четыре независимых входа для регистрации сигналов от разных секций приемной петли (отличающихся, например, количеством витков). Прибор герметичен, защищен от воздействия факторов окружающей среды. В комплекте с измерительным блоком разработан коммутатор тока ГТИ-200, с помощью которого можно создать ток до 200 А. Для возбуждения импульсного тока в генераторном контуре используется коммутатор тока, собранный на IGBT транзисторах. Источниками напряжения на входе генератора являются аккумуляторная батарея необходимой ёмкости с напряжением от 12 до 600 В и генератор переменного тока мощностью до 100 кВт. В генераторе реализована цифровая запись формы токовых импульсов. Синхронизация генератора и приемника осуществляется по каналу GPS. Минимальная амплитуда измеряемого сигнала обеспечена на уровне 0,2–0,5 мкВ. Переносные многовитковые датчики (модульные рамки) являются наиболее перспективной разработкой метода ЗС в качестве приемной конструкции. При использовании на полевых работах они заменяют петлю больших размеров, что дает возможность оперативно провести измерения, значительно увеличивая производительность работ. Многовитковый датчик, выполненный в виде круга с площадью 1,28 м<sup>2</sup>, при измерениях является эквивалентом приемной одновитковой рамки со стороной 156,767 м. Применение аппаратуры «Байкал МЭРС-Т» в полевых условиях с широким временным интервалом регистрации и возможностью измерять слабые сигналы в доли мкВ позволяет продлить кривую зондирования до более поздних времен и определять параметры глубоко залегающих горизонтов с высокой достоверностью [9].

#### Методика измерений методом ЗС

Для проведения съемки на участке Убинский в качестве генераторной установки использована незаземленная петля квадратной формы со стороной равной 300 м. При проведении работ на тестовом участке ток в генераторной петле был выбран в 15 А с погрешностью не более 1 %. Измерения выполнены с помощью переносного датчика, на разных расстояниях соответственно от центра генераторной установки (от 0 до 0,4–0,5 км). Таким образом приемные пункты были расположены как внутри генераторного контура, так и вне его. В процессе измерения записывались два дубля переходного процесса с количеством накоплений в каждом дубле не менее 300. Погрешность регистрации переходного процесса в информативной области времен

становления (0,1–100 мс) составила менее 5 %. Максимальная глубинность исследования порядка 500–600 м была достигнута за счет измерения сигнала с минимальной амплитудой в 0,2–0,5 мкВ. В начале и в конце каждого маршрута проводились контрольные зондирования в одном из выбранных приемных пунктов сети. Масштаб геофизической съемки 1:10000 обеспечивается расстоянием между профилями в 100 м и шагом по профилю в

40 м. Таким образом, сеть наблюдений состоит из системы субмеридиональных профилей и объединяет пикеты измерений всех генераторных контуров, увязанные между собой. Всего на площади исследования было разложено 11 генераторных контуров и выполнено 2224 физических наблюдения (рис. 1). Фактическая площадь электроразведочных работ составила 8000000 м<sup>2</sup>. До начала работ в пакете MapInfo был подготовлен проект, в котором

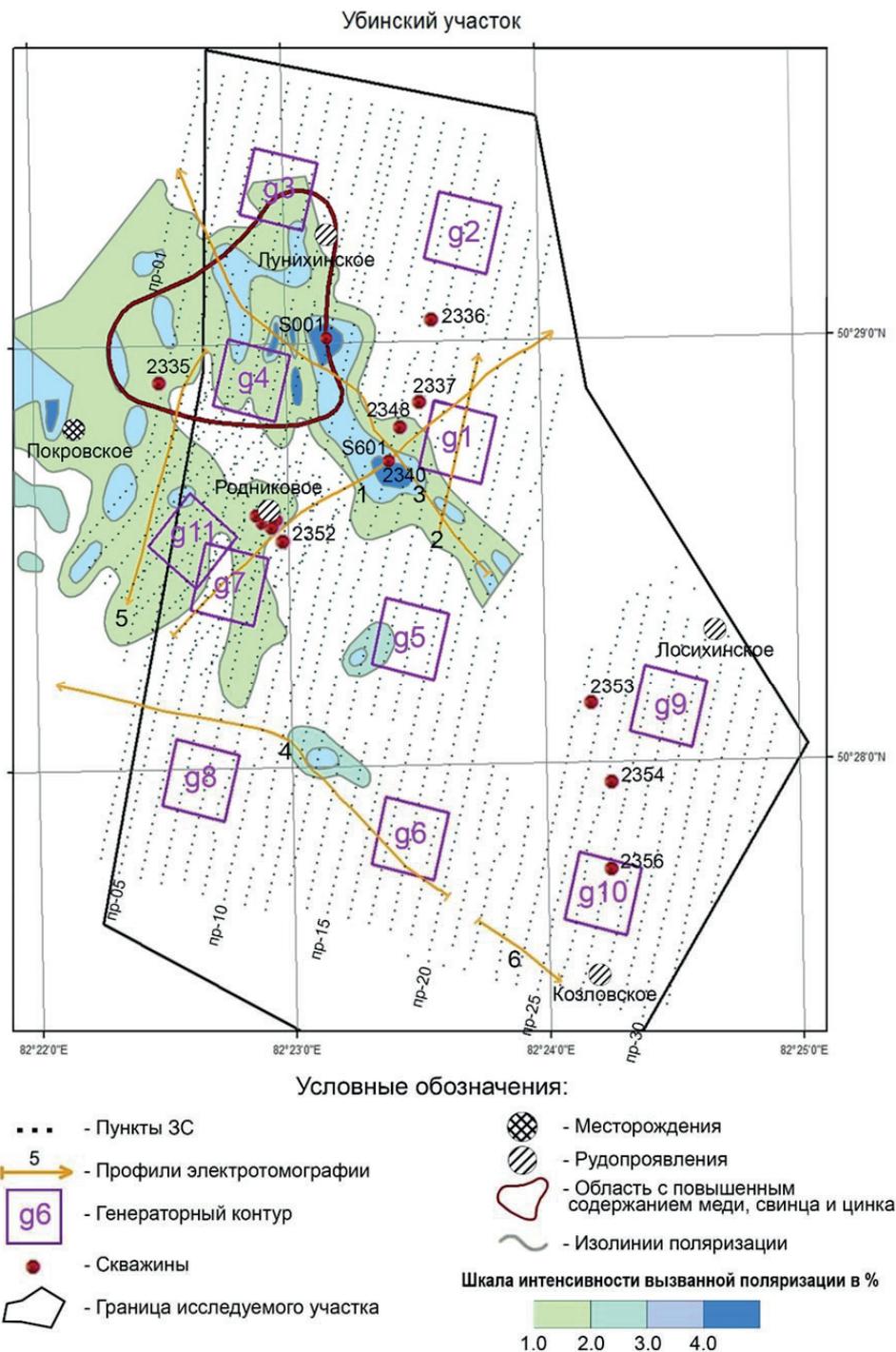


Рис. 1. Размещение профилей и пунктов ЗС, профилей электротомографии на участке Убинский

Fig. 1. Placement of profiles and points of sounding and electrical resistivity tomography profiles in Ubinsk area

определена траектория профилей, координаты генераторных контуров и приемных пикетов. На основании этих данных были запрограммированы GPS-приемники Garmin, которые используются оператором *in situ* при постановке наблюдений. Непосредственно перед началом работ была установлена базовая станция с контроллерами ProMark 3, с помощью которых с шагом 50 м фиксируется истинная конфигурация генераторного контура для расчета его площади и устанавливается положение приемных пунктов. Методика проведения топографических работ обеспечивает точность определения координат пунктов в среднем 1 м в плане и 2 м по высотной привязке.

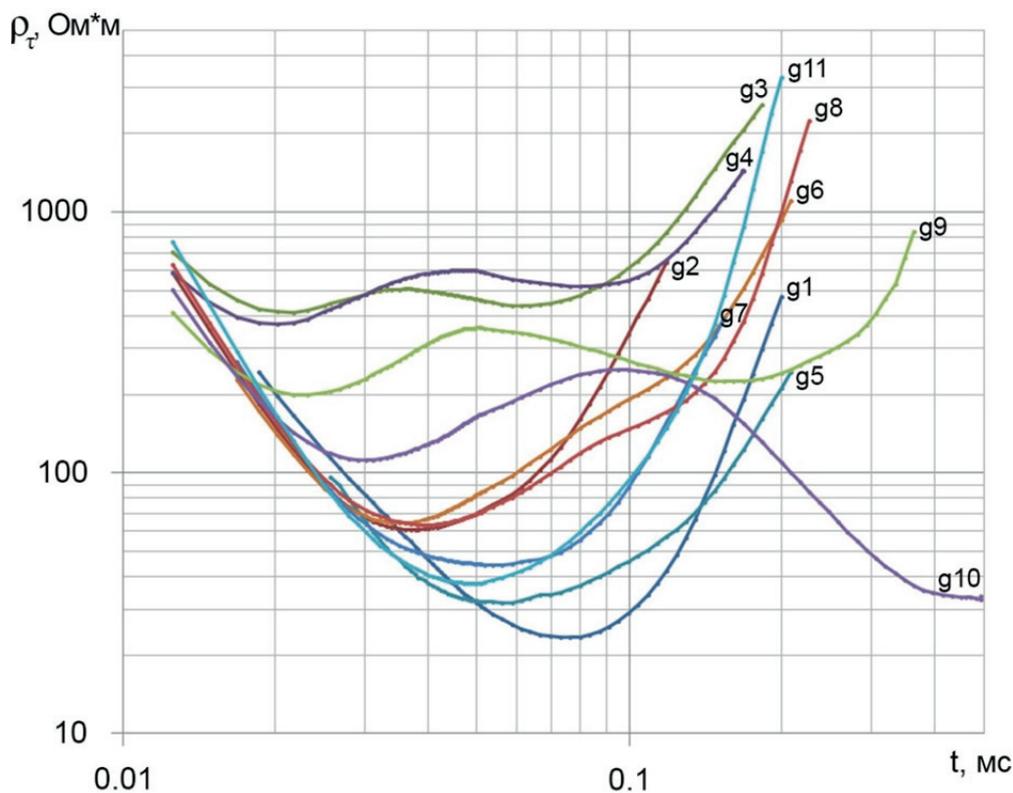
В перспективных по предшествующим геолого-геофизическим данным зонах Убинского участка для детализации геоэлектрических параметров верхней части разреза были выполнены дополнительные измерения методом электротомографии с использованием электроразведочной станции «Скала-48». В аппаратуре реализован развитый пользовательский интерфейс, позволяющий полностью контролировать процесс измерений. В рабочем состоянии на дисплее отображается соответствующая режиму таблица, по которой можно определять расположение и геометрию измери-

тельной установки и просматривать результаты наблюдений [6]. Профили ЭТ показаны на рис. 1.

#### Интерпретация полевых данных ЗС.

##### Обсуждение результатов

Обработка и интерпретация полевых данных ЗС осуществлялась в два этапа. Вначале была выполнена предварительная обработка с помощью специализированных программных средств, результатом которой являются сами измеренные сигналы (ЭДС), очищенные от помех, и их трансформанты – кривые кажущегося удельного электрического сопротивления ( $\rho_r$ ), проводимость. Характерные кривые  $\rho_r$  от разных генераторных контуров указывают на значительную дифференциацию по удельному электрическому сопротивлению площади участка, так как тип и уровень кривых изменяется практически для каждого контура (рис. 2). Анализ показал, что значения минимума кривых  $\rho_r$  и временной интервал измерений в пунктах регистрации, расположенных на разных частях площади исследования, варьируют более чем на порядок. По поведению кривых уже можно сделать вывод, что на юго-востоке площади низкоомные объекты находятся на больших глубинах по сравнению с северо-западной частью.



Условные обозначения:  
g1-g11 - номер генераторного контура

Рис. 2. Характерные кривые кажущегося удельного электрического сопротивления по данным ЗС на участке Убинский

Fig. 2. Representative curves of the apparent resistivity according to the data of sounding in Ubinsk area

Количественная интерпретация выполнена на следующем этапе с использованием интерактивных программных комплексов моделирования и инверсии: Эра, EMS, разработанных в ИНГГ СО РАН [18], и ZondTEM1D [19]. Все эти комплексы позволяют осуществлять интерпретацию полевых данных ЗС в классе горизонтально-слоистой модели. Кроме инверсии в системах предусмотрена возможность численного моделирования. Каждый комплекс содержит несколько функциональных пакетов, с помощью которых можно оценить результаты интерпретации. Для полученных геоэлектрических параметров вычисляются погрешности их определения, оценивается степень влияния на электромагнитное поле, области локальной эквивалентности, кроме того, выполняется оценка глубинности зондирования. Для успешной инверсии полевых данных важное значение имеет выбор начального приближения. Для нестационарного электромагнитного зондирования это неформальная процедура, которая по большому счету зависит от опыта специалиста-геофизика. По участку исследования собран большой объем геолого-геофизических данных. По ряду скважин известны литологические характеристики и мощности породных комплексов, имеются результаты геофизиче-

ских методов. Адекватная стартовая модель построена на основе всех имеющихся априорных материалов.

Для Убинского участка была использована концепция профильной интерпретации. Эффективность процесса интерпретации повышается последовательной работой с данными по профилю, как правило, для каждого следующего зондирования вначале используется модель, полученная для предыдущего пикета, что ускоряет процесс подбора. Имеется возможность увязки и коррекции моделей соседних зондирований. При этом удовлетворяются два критерия: достижение минимума невязки полевой и теоретической кривых, а также близость модели априорным данным. Для успешной инверсии выбирается оптимальный алгоритм минимизации и возможные ограничения на варьирования любого геоэлектрического параметра, заданием границ внутри которых параметр может изменяться. Возможность интерпретации в классе горизонтально-слоистой модели обусловлена высокой локальностью использованных установок. В результате практически для каждого зондирования получены геоэлектрические модели в рамках заданной погрешности, которые содержат от 5 до 8 слоев. Примеры интерпретации приведены на рис. 3, а, б.

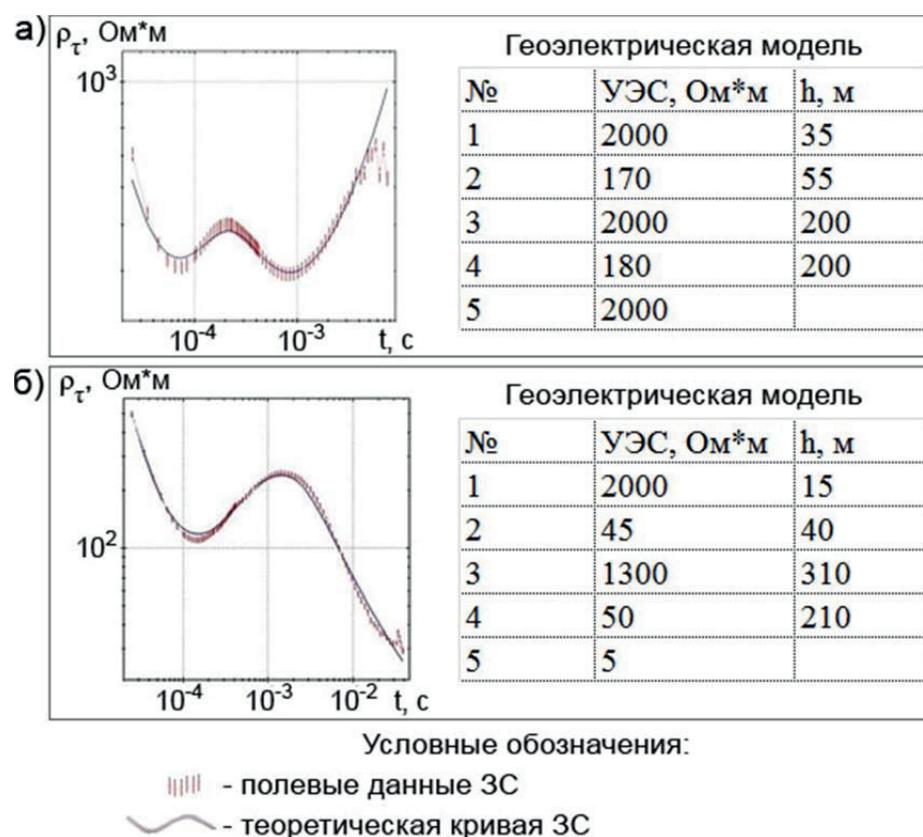
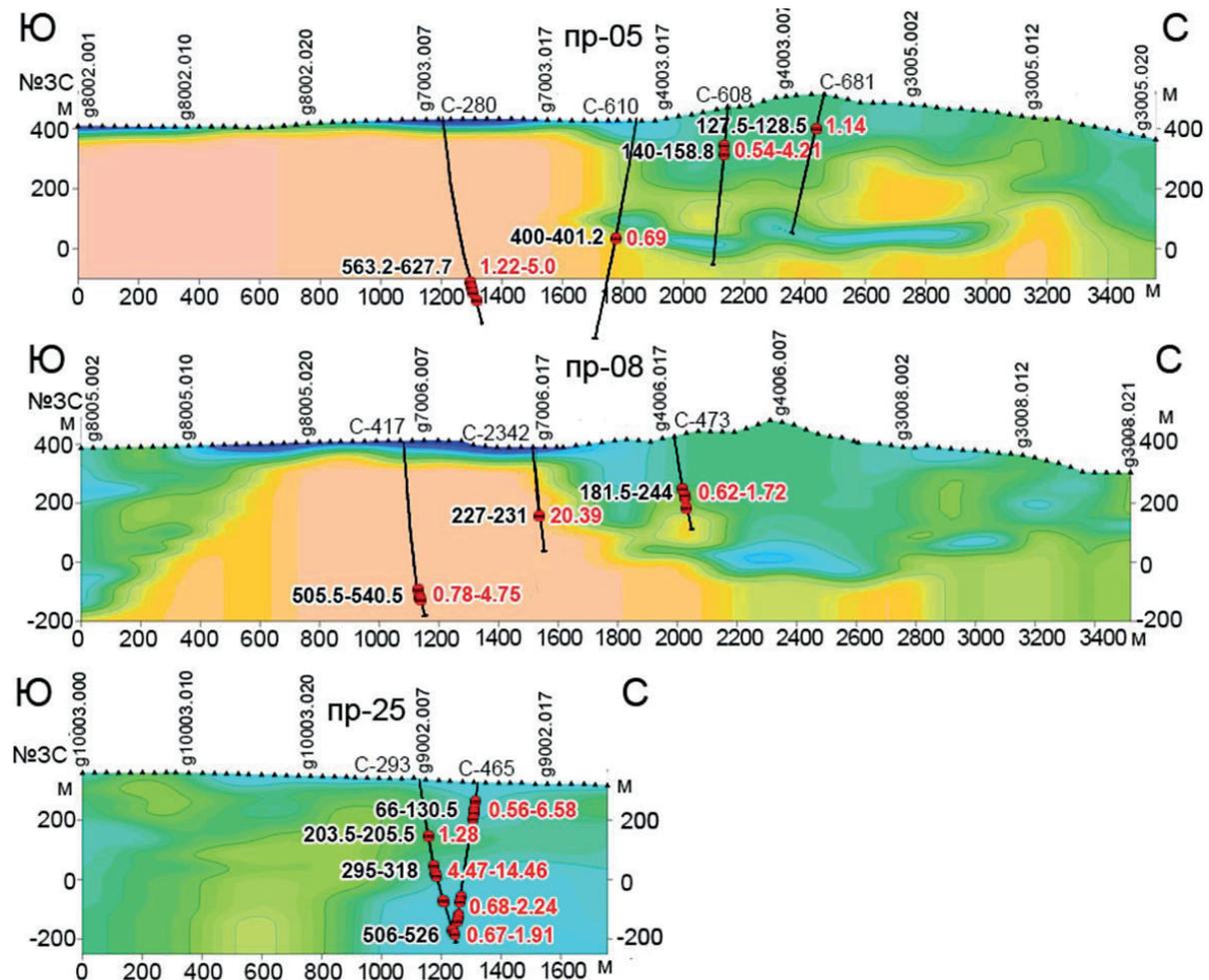


Рис. 3. Примеры интерпретации данных в программном комплексе EMS; а) ЗС № 10 профиля 6 от генераторного контура g3; б) ЗС № 10 профиля 25 от генераторного контура g10

Fig. 3. Examples of sounding data interpretation in EMS software; а) sounding point no. 10 of the profile 6 from the generator circuit g3; б) sounding point no. 10 of the profile 25 of the generator circuit g10

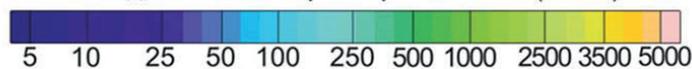
Оба зондирования выполнены в разных частях площади. Полученные геоэлектрические модели одного типа и характеризуются чередованием проводящих и высокоомных горизонтов, но значения удельного электрического сопротивления существенно отличаются. Данные ЗС № 10 профиля 6 (генераторный контур g3) получены в северо-западной части площади в районе Лунихинского рудопоявления. В геоэлектрической модели содержатся два проводящих горизонта с УЭС – 170 и 180 Ом·м. Для геоэлектрической модели ЗС № 10 профиля 25, полученного в юго-восточной части в

зоне Козловского рудопоявления (генераторный контур g10), наблюдаются значительно более низкие значения УЭС проводящих горизонтов – в 45, 50 Ом·м, и большая суммарная мощность. В целом результаты количественной интерпретации подтверждают различие в строении северо-западного и юго-восточного участков, первый из них имеет явно выраженный высокоомный опорный горизонт (фундамент) со значениями УЭС в 2000 Ом·м. Для юго-восточного блока в основании геоэлектрического разреза находятся низкоомные породы со средними значениями УЭС в 300–500 Ом·м.



Условные обозначения:

Удельное электросопротивление (Ом\*м)



C-681 - Скважина

Интервалы глубин, в м - 227 - 0.73 - Содержание металла, в %

Рис. 4. Геоэлектрические разрезы через Убинский участок; разрезы по профилям 5 и 8 через Лунихинское рудопоявление; разрез по профилю 25 (Козловское, Лосихинское рудопоявления)

Fig. 4. Geoelectric sections through the Ubinsk area; sections along profiles 5 and 8 through Lunikhin ore formation; section along profile 25 (Kozlovskoe, Losikhinsky ore occurrences)

В частности, кривая  $\rho_{\tau}$  ЗС № 10 не имеет выхода на правую асимптоту, так как на глубине 365 м находится объект с очень низким удельным электрическим сопротивлением, токи в нем концентрируются и не проходят глубже.

По результатам интерпретации выполнены визуализации в виде разрезов по всем профилям наблюдений, площадные распределения УЭС на нескольких интервалах глубин, а также объемные трехмерные модели перспективных на руду зон. Визуализация геоэлектрических разрезов по профилям выполнена с помощью программы ZondTEM1D (zond-geo.ru). Разработки этой программы направлены на удобство работы интерпретатора и предоставляют широкий выбор средств визуализации, имеется режим работы с площадными данными произвольной системы измерений. В качестве примера приведены полученные разрезы по субмеридиональным профилям 5, 8 и 25, которые отражают разные геоэлектрические ситуации (рис. 4). Профили 5 и 8, выполненные по западному краю площади исследования, на юге пересекают интрузивный высокоомный блок, перекрытый маломощными, но очень проводящими четвертичными осадками, поэтому полученная здесь глубинность (не более 100 м) недостаточна для анализа перспектив, хотя в пробуренных скважинах С-280 и С-417 наблюдается высокое содержание металлов в интервалах 563–627 и 505–540 м, соответственно. В этой зоне необходимы дополнительные измерения с более мощным источником. В северо-западной части обоих профилей в зоне развития пород девона глубинность зондирований достигает примерно 400 м, и на этой глубине в разрезах выделяется хорошо проводящий протяженный аномальный объект небольшой мощности, а также проводящие зоны в верхней части разрезов до глубин 200–250 м, соответствующие по координатной привязке Лунихинскому рудопроявлению. По данным нескольких скважин, на профилях 5 и 8 (С-610, С-608, С-681), пробуренных на границах между проводящими и высокоомными блоками, получены промышленные содержания металлов. Скорее всего границы блоков, к которым приурочены рудопроявления, являются разломными.

Профиль 25 выполнен на юго-востоке площади и пересекает Козловское рудопроявление на юге и Лосихинское рудопроявление на севере. На разрезе по этому профилю выделяются хорошо проводящие зоны, более протяженные и мощные, чем на северо-западе площади. По глубине эти зоны распространены более чем на 400 м. По ряду скважин (С-293 и С-465), пробуренных вблизи профиля, получены промышленные содержания металлов. Судя по полученным данным геоэлектрики, на этом участке перспективные зоны могут быть обнаружены и глубже 400 м.

В целом на разрезах по профилям 1–19 проводящие объекты со значениями УЭС в 25–50 Ом·м на северо-западе участка и до 100–200 Ом·м на юго-востоке представлены в виде горизонтальных и наклонных образований, которые прослежива-

ются в интервале глубин, начиная с абсолютных отметок 300–200 до 0–(–200) м.

Наиболее мощные и протяженные низкоомные аномальные зоны со значениями УЭС от 25 до 200 Ом·м выделены на разрезах профилей 20–33 (юго-восток площади) в интервалах глубин от дневной поверхности вплоть до абсолютных отметок –200, –400 м. На всех построенных разрезах имеются низкоомные приповерхностные отложения со значениями УЭС от 5–10 до 20–25 Ом·м, мощность которых изменяется в широких пределах от 10 до 100 м. Приповерхностные очень проводящие осадки близки по значениям сопротивлений структурам рудного происхождения.

Карты распределения УЭС по площади на разных абсолютных отметках в глубину (срезы) построены через 50 м и отражают геоэлектрическое строение исследуемой площади в целом. По представленным на рис. 5 нескольким срезам можно сделать вывод, что у аномальных зон разная протяженность в вертикальном и горизонтальном направлениях. По анализу этих распределений были выделены участки с тремя типами аномальных зон: северо-западный, промежуточный и юго-восточный (рис. 5).

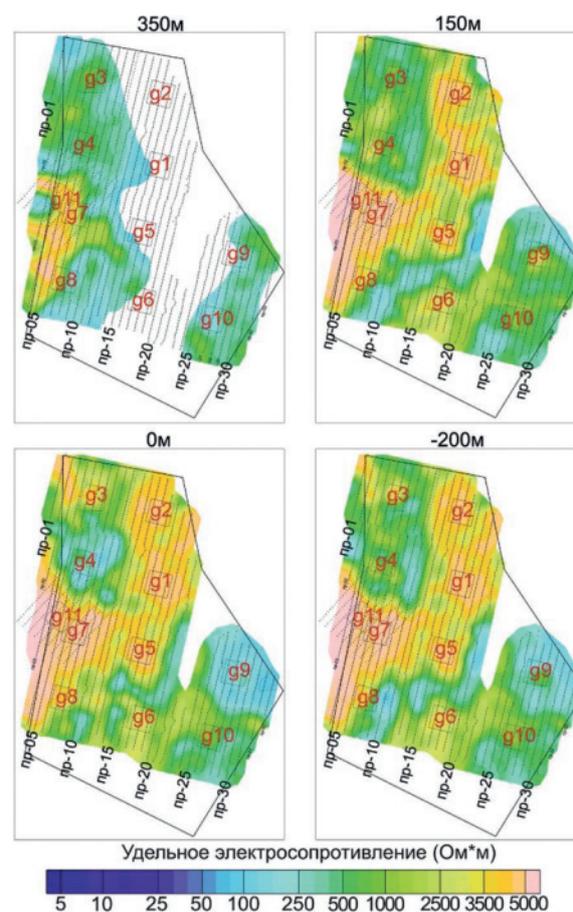


Рис. 5. Распределение УЭС на разных абсолютных отметках в интервале глубин +350, –350 м

Fig. 5. UES distribution at different absolute elevations in the depth range of +350, –350 m

Северо-западный участок приурочен к области работ с генераторными контурами  $g_3, g_2, g_{11}$ . Аномалии этого участка отражают локальные проводящие объекты в основном небольшого объема, расположенные на разной глубине. Они начинают проявляться с абсолютных отметок в 350 м и прослеживаются до глубины в 0 м. Выход на опорный высокоомный горизонт наблюдается на срезах с абсолютными отметками –50 и –100 м, т. е. максимальная глубина нижней кромки аномалий достигает 200 м. Самые низкие значения УЭС в 25–50 Ом·м отмечаются на абсолютных отметках от 100 до 0 м. Второй участок с аномалиями линейного типа выделен в зоне работ с контурами  $g_1, g_5, g_6, g_8$ . На этом участке также наблюдаются отдельные проводящие объекты различного размера. Цепочка низкоомных аномалий фактически пересекает площадь работ с юго-востока на северо-запад на срезах в 250, 150, 50, 0 м. Значения УЭС в 25–50 Ом·м получены в интервале абсолютных отметок 250–200 и 0–(–100) м. С ростом глубины площади аномалий уменьшается и начиная с абсолютной отметки в –50 м видны только отдельные небольшие объекты в самой южной части. На третьем юго-восточном участке, расположенном в зоне работы с контурами  $g_6, g_9, g_{10}$ , наблюдается самый крупный низкоомный объект, который начинает проявляться локальными аномалиями начиная от дневной поверхности. Глубже на абсолютных отметках в 50–200 м площадь аномальной зоны увеличивается и достигает максимума на срезах с отметками 0–(–300) м.

Объемная геоэлектрическая модель участка построена от дневной поверхности до абсолютной отметки в –400 м. С целью наглядного представления аномальных объектов, для оценки их конфигурации и размеров, был выполнен расчет изоповерхностей по значению УЭС в 180 Ом·м (рис. 6). Построение отражает сложную геометрию аномалеобразующих тел.

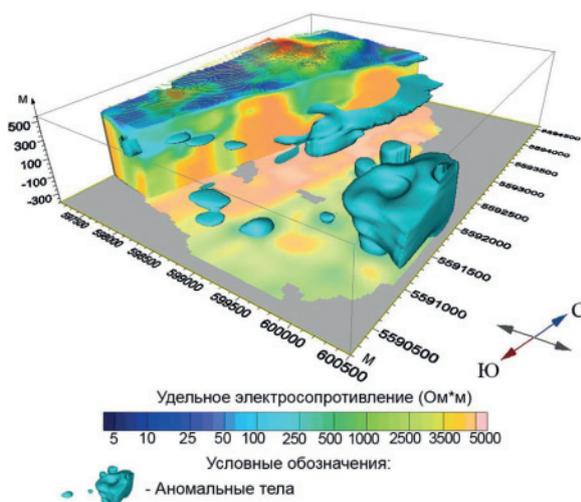


Рис. 6. Трехмерные модели аномалеобразующих объектов участка Убинский

Fig. 6. Three-dimensional models of anomalous objects of the Ubinsk area

На рис. 6 хорошо видно, что низкоомные тела выделяются по площади участка на нескольких интервалах глубин и имеют разные размеры. Наиболее массивный аномальный объект обнаружен на юго-восточном участке и имеет сложное строение, так как до глубин примерно в 200 м представлен локальными вертикальными телами, которые далее объединяются в одну аномалию, достигающую в диаметре 1000 м. На центральном участке видны как локальные аномалии небольших размеров, так и вытянутая по горизонтали практически линейная аномальная зона. Более детальное расчленение аномальных зон на собственно рудные тела, уточнение их конкретных размеров возможно только при постановке специальных детальных работ по методике 3D на каждой выделенной аномалии, отнесенной к перспективным.

*Результаты опытных работ методом электротомографии.* Дополнительно к нестационарным электромагнитным зондированиям были выполнены экспериментальные работы методом электротомографии по пяти профилям, четыре из которых сосредоточены в северо-западном перспективном участке, где обнаружены в основном небольшие аномальные объекты, приуроченные, скорее всего, к разломным границам блоков. По предшествующему опыту работ в районе Горного Алтая разломные структуры хорошо прослеживаются методом электротомографии в приповерхностных осадках.

На Убинской площади измерения были выполнены с использованием симметричной установки Шлюмберже. Для создания профиля необходимой длины применялась нагоняющая расстановка (roll along). 48 электродов объединены в косу общей длиной в 240 м, разделенную на два сегмента по 24 электрода с шагом 5 м между ними. После начального измерения на двух сегментах происходит перенос первого сегмента для продолжения непрерывного профиля и так несколько раз до достижения нужной длины [20, 21]. Интерпретация выполнена с помощью программных комплексов RES2Dinv [5], ERTlab [22]. Разрезы электротомографии по профилям 3 и 5 длиной соответственно 1000 и 700 м отражают верхнюю часть разреза до глубин в среднем в 100 м (рис. 7).

Разломы на разрезах показаны по геологическим данным. Видно, что эти известные разломы проходят в основном на границах высокоомных и низкоомных блоков, разделяя их. Разлом в средней части профиля 3 с пологим углом падения проходит по нижней границе цепочки низкоомных аномалий. Таким образом, метод электротомографии позволяет построить детальную геоэлектрическую модель верхней части разреза.

#### Заключение

Площадные системы наблюдений и представление результатов в виде объемных моделей является современной тенденцией развития нестационарных электромагнитных методов с контролируе-

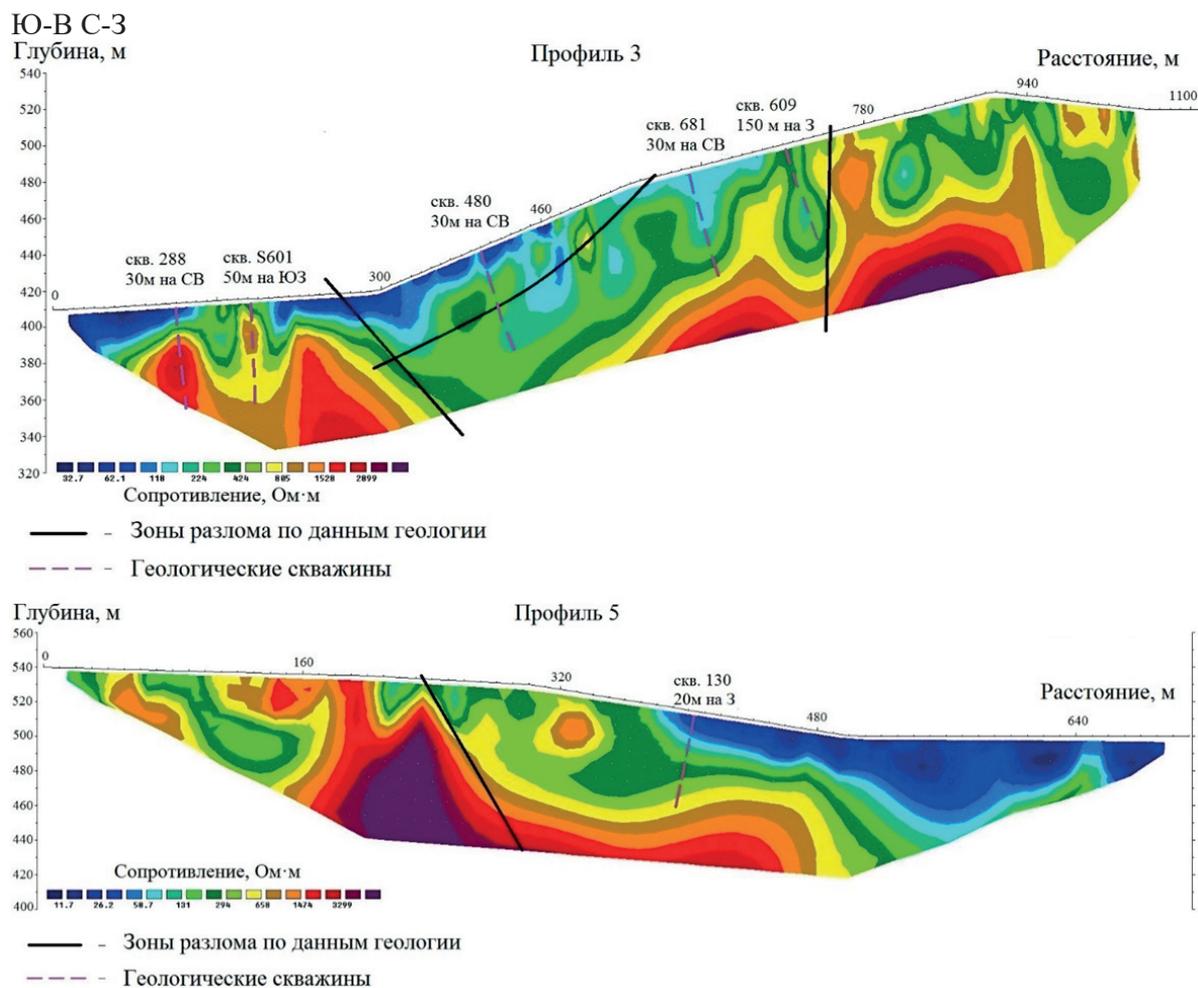


Рис. 7. Разрезы по профилям электротомографии

Fig. 7. Resistivity sections constructed by electrical resistivity tomography profiles

мым источником. 3D технологии электроразведки открывают новые перспективы в прогнозно-поисковых работах на минеральное сырье. В настоящее время разработан подход к проведению ЭМ исследований в сложной построенных средах, включающий этапы проектирования геофизического эксперимента, построения референтной модели среды, численного моделирования с использованием трехмерных программ для определения шага съемки, параметров генераторно-приемных установок. Развиваются программно-алгоритмические средства обработки и интерпретации полевых данных, визуализации результатов также с привлечением 3D программ. Таким образом, площадные зондирования с закрепленным источником поля в сочетании с трехмерной интерпретацией и визуализацией результатов обеспечивают необходимую разрешающую способность метода ЗС в условиях латеральной и вертикальной неоднородности среды и выходов коренных пород на дневную поверхность.

В результате выполненных электроразведочных работ получено трехмерное распределение геоэлектрических параметров в пределах Убинско-

го участка, по которому хорошо выделяются аномальные низкоомные зоны. Эти зоны расположены на разной глубине, и их размеры сильно варьируют. Учитывая данные скважин, пробуренных в последнее время, значительную часть выделенных аномалий после геологической интерпретации и разбраковки можно отнести к перспективным на полиметаллы,

Вместе с тем в выполненной работе присутствуют некоторые недостатки. В частности, по данным ЗС, полученным на юго-западе площади в районе высокоомного интрузивного блока, перекрытого очень проводящими четвертичными осадками с понижением значений УЭС до 5 Ом·м, получена недостаточная глубинность для определения поисковых критериев. Но следует отметить, что это небольшой по площади участок. На нем можно оперативно повторить съемку, увеличив мощность источника.

Опытно-методические работы на Убинской площади показали преимущества и недостатки использованной методики измерений электромагнитных зондирований. Сделан вывод, что вначале работ необходимо выбирать несколько тестовых

участков, отличающихся по геологическому строению, для верификации наиболее важных геоэлектрических параметров, таких как глубинность исследования, параметры установок. Но в целом, учитывая полученные результаты, применение метода ЗС эффективно для поиска полиметаллов в районе Рудного Алтая, по данным этого метода подтверждена перспективность юго-восточной части участка, по комплексу геологических и электроразведочных данных сделан вывод о приуроченности руды Родниковского рудопроявления к зоне субширотных разломов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгалъ А.С., Христенко Л.А. Результаты и перспективы геофизических исследований при поисках золота на восточном склоне Кузнецкого Алатау // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2008. – № 2. – Вып. 12. – С. 57–69.
2. Комплексирование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на объектах ГМК «Норильский Никель» / Е.В. Андреева, А.А. Бобачев, И.М. Варенцов, М.И. Верещагина, В.А. Куликов, А.Г. Яковлев, Д.В. Яковлев // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 8. – С. 71–79.
3. Шкабарня Н.Г., Стволов Б.Л. Интерпретация данных электрического зондирования при поисках ильменитовых руд в Приморье // Геология и геофизика. – 1996. – Т. 37. – № 4. – С. 111–114.
4. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. – 1996. – № 44 (1). – P. 131–152.
5. Loke M.H. resistivity and IP imaging // Geotomo Software Pty Ltd. – 2015. URL: <http://www.geotomosoft.com> (дата обращения 15.09.2017).
6. Новый подход к малоглубинным электромагнитным зондированиям / Е.В. Балков, Д.И. Фадеев, Ю.Г. Карин, А.К. Манштейн, Ю.А. Манштейн, Г.Л. Панин // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 5. – С. 783–791.
7. Куликов В.А., Бобачев А.А., Яковлев А.Г. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300–400 м // Геофизика. – 2014. – № 2. – С. 39–46.
8. Коротков Ю.В. Возможности индуктивной импульсной электроразведки в поиске и разведке россыпей золота и платиноидов // Геофизика. – 2016. – № 2. – С. 54–60.
9. Бабушкин С.М., Неведрова Н.Н. Аппаратурные и методические средства при поисках рудных месторождений методом нестационарного электромагнитного зондирования // Недропользование. Горное дело. Новые направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология: ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2015. XI междунар. науч. конгр. – Новосибирск, 17–21 апреля 2017. – Т. 2 – С. 271–275.
10. О комплексировании методов ВЭЗ и ЗС в ближней зоне / П.В. Иванов, Д.А. Алексеев, А.П. Бобачев, П.Ю. Пушкарев, А.Г. Яковлев // Инженерные изыскания. – 2011. – № 11. – С. 42–51.
11. Куликов В.А., Каминский А.Е., Яковлев А.Г. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и аудиомангито-

Обоснованы перспективы дальнейших работ на Убинской площади: с целью уточнения глубинного строения центральной (Родниковского рудопроявление) и юго-восточной части площади рекомендуется выполнить электроразведочные измерения до глубин в 700–1200 м. При планировании заложения скважин рекомендованы предварительные детальные работы методами электроразведки (ЗС, электро-томография, ВП) в зонах перспективных аномалий на предмет уточнения их размеров и выявления возможных ореолов вкрапленного оруденения в верхней части разреза для лучшей локализации рудных тел.

- теллурических зондирований при решении рудных задач // Записки Горного института. – 2017. – Т. 223. – С. 9–19.
12. Тригубович Г.М., Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г. ЗД-электроразведка становлением поля. – Новосибирск: Сибирская издательская фирма «Наука» РАН, 2009. – 217 с.
13. Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. The geological medium induced polarization as an electromagnetic phenomenon // Extended Abstracts. 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop. – Weimar, Germany, August 24–30, 2014. – P. 4.
14. Displacement currents in geoelectromagnetic problems / V. Mogilatov, M. Goldman, M. Persova, Y. Soloveichik // Journal of Applied Geophysics. – 2014. – V. 105. – P. 133–137.
15. Отчет о результатах поисково-оценочных работ на полиметаллы на участке Убинский. ТОО ГРК «Топаз» / А.Н. Егоров, В.И. Маслов, А.В. Петрич, И.Л. Сериков, С.Л. Милованов, А.Г. Зоркина, Е.Ф. Дауытов. – Усть-Каменогорск, 2016. – 210 с.
16. Wait J.R. Transient electromagnetic field in the conducting medium // Geophysics. – 1951. – V. 2. – № 16. – P. 213–221.
17. Kaufman A.A., Oristaglio M., Alekseev D. Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics. – Amsterdam: Elsevier, 2014. – P. 313–464.
18. Система интерпретации данных зондирований методом переходных процессов EMS / О.Г. Хабинов, И.А. Чалов, А.А. Власов, Е.Ю. Антонов // ГЕО-Сибирь-2009: Сборник материалов V Международного научного конгресса. – Новосибирск, 2009. – С. 108–113.
19. Каминский А.Е. Программа ZondTEM1D. URL: <http://zond-geo.ru> (дата обращения 15.09.2017).
20. Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review // Earth-Science reviews. – 2014. – № 135. – P. 65–82.
21. Ability of high-resolution resistivity tomography to detect fault and fracture zones: application to the Tournemire experimental platform, France / C. Gelis, M. Noble, J. Cabrera, S. Penz, H. Chauris, E.M. Cushing // Pure and Applied Geophysics. – 2016. – № 173. – P. 573–589.
22. Morelli G., LaBrecque D.J. Advances in ERT inverse modelling // European Journal of Environmental and Engineering Geophysics. – 1996. – V. 1. – № 2. – P. 171–186.

Поступила 20.09.2017 г.

#### Информация об авторах

**Бабушкин С.М.**, заместитель директора филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук».

**Егоров А.Н.**, главный геолог ТОО «Геологоразведочная компания "Топаз"».

**Неведрова Н.Н.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, доцент Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент Новосибирского государственного университета.

**Шапаренко И.О.**, инженер Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

UDC 550.837.6

## RESULTS OF POLYMETALLS SEARCH-EXPLORATION INVESTIGATIONS USING ELECTRICAL SURVEYING METHODS WITH CONTROLLED SOURCES IN GORNY ALTAI

**Sergey M. Babushkin**<sup>1</sup>,

bab@gs.sbras.ru

**Alexey N. Egorov**<sup>2</sup>,

uk\_ch\_alex@mail.ru

**Nina N. Nevedrova**<sup>3,4</sup>,

NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru

**Ilya O. Shaparenko**<sup>3</sup>,

ShaparenkoI@ipgg.sbras.ru

<sup>1</sup> Seismological Branch of Federal Research Center «Russian Academy of Sciences Geophysical Survey»,  
3, Academician Koptyug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Geological Prospecting Company «Topaz»,  
1, Geologicheskaya street, 070001, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan.

<sup>3</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
3, Academician Koptyug Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>4</sup> Novosibirsk State University,  
2, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need to search for new industrial ore manifestations, due to the fact that most of the explored deposits have already been worked out.

**The aim** of the research is to identify ore promising objects in deep horizons and flanking parts of the Ubinsk ore field of the Rudny Altai using electromagnetic methods of direct and alternating current.

**Methods of research.** Transient electromagnetic method with inductive installations and DC electrical resistivity tomography were used to obtain field data. Interpretation was carried out using interactive simulation and inversion software complexes ERA, EMS, ZondTEM1D. The results were justified based on the analysis and comparison of geological and geophysical data.

**Results.** According to the transient electromagnetic method the authors have plotted the sections along the observation profiles, area distributions of the electrical resistivity at several depth intervals, as well as three-dimensional models of promising zones of ore. For the first time, three types of anomalous zones were identified, corresponding to ore objects, differing in size and depth of occurrence. According to the results of electrical resistivity tomography, the manifestation of fault structures in the upper part of the section is traced. The subsequent detailed work is grounded by methods of electrical prospecting within the allocated perspective zones.

**Conclusions.** The use of electroprospecting methods is effective for the search for polymetals in the area of Rudny Altai. According to the sounding, the authors confirmed the prospects for polymetallic rocks in the southeastern part of the Ubinsk area, where the greatest depths of ore occurrence objects have been obtained. Geological and electro-prospecting data were recommended for electric survey to of 700–1200 m depth.

### Key words:

Rudny Altai, Ubinsk ore field, transient electromagnetic method, electrical resistivity tomography, geoelectrical sections, three-dimensional geoelectrical models, anomalous zones promising for polymetals.

### REFERENCES

1. Dolgal A.S., Khristenko L.A. Results and development of geophysical researches for prospecting of ore gold into the eastern flank of Kuznetsk Ala-Tau. *Vestnik KRAUNC. Nauki o Zemle*, 2008, no. 2, Iss. 12, p. 57–69. In Rus.
2. Andreeva E.V., Bobachev A.A., Varentsov I.M., Vereshchagina M.I., Kulikov V.A., Yakovlev A.G., Yakovlev D.V. Kompleksirovanie geofizicheskikh metodov pri poiskakh medno-nikelevykh rud na obyektakh GMK «Norilsky Nikel» [Complexing of geophysical methods in searching for copper-nickel ores at the sites of MMC «Norilsk Nickel»]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2006, no. 8, pp. 71–79.
3. Shkabarnya N.G., Stvolov B.L. Interpretation of electrical sounding data in the search for ilmenite ores in Primorye. *Russian Geology and Geophysics*, 1996, vol. 37, no. 4, pp. 111–114. In Rus.
4. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, no. 44 (1), pp. 131–152.
5. Loke M.H. resistivity and IP imaging. Geotomo Software Pty Ltd. 2015. Available at: <http://www.geotomosoft.com> (accessed 15 September 2017).
6. Balkov E.V., Fadeev D.I., Karin Yu.G., Manshteyn A.K., Manshteyn Yu.A., Panin G.L. A new approach to shallow electromagnetic sounding. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 5, pp. 783–791. In Rus.
7. Kulikov V.A., Bobachev A.A., Yakovlev A.G. Application of electrical resistivity tomography in deep mining prospecting. *Geophysics*, 2014, no. 2, pp. 39–46. In Rus.
8. Korotkov Yu.V. Possibilities of inductive pulse geoelectricians in search and investigation of gold and platinoids placers. *Geophysics*, 2016, no. 2, pp. 54–60. In Rus.

9. Babushkin S.M., Nevedrova N.N. Apparaturnye i metodicheskie sredstva pri poiskakh rudnykh mestorozhdeniy metodom nestatsionarnogo elektromagnitnogo zondirovaniya [Instrumental and methodical means in the search for ore deposits by the method of non-stationary electromagnetic sensing]. *Nedropolzovanie. Gornoe delo. Novye napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh. Geojekologiya. Materialy XI mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Subsoil use. Mining. New directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Geocology. Materials of the 10<sup>th</sup> International Scientific Conference]. Novosibirsk, 2017. Vol. 2, pp. 271–275.
10. Ivanov P.V., Alekseev D.A., Bobachev A.P., Pushkarev P.Yu., Yakovlev A.G. On integrated application of the VES and TEM geophysical methods. *Inzhenernye izyskaniya*, 2011, no. 11, pp. 42–51. In Rus.
11. Kulikov V.A., Kaminsky A.E., Yakovlev A.G. Combined 2D inversion of electrotomographic and audio-magnetotelluric sounding data to solve mining problems. *Zapiski Gornogo instituta*, 2017, vol. 223, pp. 9–19. In Rus.
12. Trigubovich G.M., Persova M.G., Soloveychik Yu.G. *3D-elektrozazvedka stanovleniem polya* [3D electrical prospecting by sounding]. Novosibirsk, Nauka RAN Publ., 2009. 217 p.
13. Kamenetsky F.M., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V. The geological medium induced polarization as an electromagnetic phenomenon. *Extended Abstracts, 22<sup>nd</sup> EM Induction Workshop*. Weimar, Germany, August 24–30, 2014. pp. 4.
14. Mogilatov V., Goldman M., Persova M., Soloveichik Y. Displacement currents in geoelectromagnetic problems. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 105, pp. 133–137.
15. Egorov A.N., Maslov V.I., Petrich A.V., Serikov I.L., Milovanov S.L., Zorkina A.G., Dautov E.F. *Otchet o rezultatakh poiskovo-otsenochnykh rabot na polimetally na uchastke Ubinsky* [Report on results of polymetals prospecting in Ubinsk area]. Ust-Kamenogorsk, Topaz Publ., 2016. 210 p.
16. Wait J.R. Transient electromagnetic field in the conducting medium. *Geophysics*, 1951, vol. 2, no. 16, pp. 213–221.
17. Kaufman A.A., Oristaglio M., Alekseev D. *Principles of Electromagnetic Methods in Surface Geophysics*. Amsterdam, Elsevier, 2014. pp. 313–464.
18. Khabinov O.G., Chalov I.A., Vlasov A.A., Antonov E.Yu. Sistema interpretatsii dannykh zondirovaniya metodom perehodnykh protsessov EMS [System for interpretation of transient electromagnetic sounding data EMS]. *GEO-Sibir-2009: Sbornik materialov V Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa* [Geo-Sibir. Materials of V<sup>th</sup> International scientific congress]. Novosibirsk, 2009. pp. 108–113.
19. Kaminsky A.E. *Programma ZondTEM1D* [ZondTEM1D]. Available at: <http://zond-geo.ru> (accessed 15 September 2017).
20. Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review. *Earth-Science reviews*, 2014, no. 135, pp. 65–82.
21. Gelis C., Noble M., Cabrera J., Penz S., Chauris H., Cushing E.M. Ability of high-resolution resistivity tomography to detect fault and fracture zones: application to the Tournemire experimental platform, France. *Pure and Applied Geophysics*, 2016, no. 173, pp. 573–589.
22. Morelli G., LaBrecque D.J. Advances in ERT inverse modelling. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 1996, vol. 1, no. 2, pp. 171–186.

Received: 20 September 2017.

#### Information about the authors

**Sergey M. Babushkin**, Deputy Director, Seismological Branch of Federal Research Center «Russian Academy of Sciences Geophysical Survey».

**Alexey N. Egorov**, Chief geologist, Geological Prospecting Company «Topaz».

**Nina N. Nevedrova**, Dr. Sc., leading researcher, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Ilya O. Shaparenko**, engineer, Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.