

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ВП ДЛЯ ПОИСКОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В. А. Тарасов, Л. И. Бытенский, В. В. Пищик

ООО НПК «Элгео», г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 24 марта 2015 г.

Аннотация: представлена автоматизированная система электротомографии импульсным методом вызванной поляризации (АСЭТ-ВП), которая обеспечивает проведение достаточно глубокого, по меркам метода ВП, зондирования геологического разреза на глубину до нескольких сотен метров. Такая система может применяться при поиске различных сульфидсодержащих рудных месторождений в районах со сложным геологическим строением и мощными перекрывающимися отложениями. Основу АСЭТ-ВП составляет комплекс аппаратуры импульсной электроразведки АИЭ-2, дополненный активной косой питающих электродов С дистанционным пультом управления, цифровым коммутатором пассивной косы приёмных электродов и новым программным обеспечением. Показаны результаты применения системы АСЭТ-ВП при поисковых работах на золото на флангах Тырныаузского рудного узла (Кабардино-Балкарии).

Ключевые слова: метод ВП, электротомография, электроразведочная аппаратура, поиски рудных месторождений.

AUTOMATED IP ELECTRICAL TOMOGRAPHY SYSTEM FOR ORE EXPLORATION

ABSTRACT: THE AUTOMATED SYSTEM FOR IP ELECTRICAL TOMOGRAPHY IS PRESENTED, THAT PROVIDES WITH PRETTY DEEP (UP TO A FEW HUNDRED METERS) SOUNDING. THE IP TOMOGRAPHY SOUNDING SYSTEM CAN BE APPLIED FOR EXPLORATION OF A VARIETY OF SULPHIDE-BEARING ORE DEPOSITS IN AREAS WITH COMPLEX GEOLOGICAL STRUCTURES AND OVERBURDEN. THE ASET-IP TOMOGRAPHY SYSTEM IS BASED ON THE AIE-2 ELECTROMAGNETIC EQUIPMENT SUPPLEMENTED WITH AN ACTIVE CURRENT CABLE ASSEMBLY AND A REMOTE CONTROL SWITCHBOARD, AS WELL AS A MULTIELECTRODE CABLE ASSEMBLY WITH ITS DIGITAL CONTROL SWITCHBOARD AND A SPECIAL MEASURING SOFTWARE. SOME RESULTS OF APPLICATION OF ASET-IP TOMOGRAPHY SYSTEM FOR EXPLORATION OF GOLD-BEARING MINERALIZATION WITHIN THE FLANKS OF THE TYRNYAUZ ORE CLUSTER (KABARDINO-BALKAR REP.) ARE PRESENTED AS AN EXAMPLE.

KEY WORDS: METHOD, ELECTRICAL TOMOGRAPHY, ELECTRICAL PROSPECTING INSTRUMENTATION, ORE EXPLORATION

Введение

В последнее время широкое распространение получило новое направление электроразведки – электротомография методами сопротивления и вызванной поляризации (ВП), которое позволяет получить гораздо более адекватное отображение геоэлектрических разрезов, чем классические вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП), рассчитанные на исследования горизонтально-слоистых сред. Строго говоря, электротомография – это целый комплекс, состоящий из специализированной аппаратуры, методики работ и программного обеспечения интерпретации данных [1]. Основная идея электротомографии состоит в многократном перекрытии изучаемого интервала профиля измерениями при разных комбинациях приёмных и питающих электродов, расположенных на профиле с линейным шагом. Таким образом, достигается более высокая плотность наблюдений, по сравнению с ВЭЗ, и появляется возможность применить алгоритмы и программы инверсии для построения двух- или трёхмерных моделей, учитывающих не

только вертикальную, но и латеральную неоднородность разреза. Эта возможность весьма актуальна при решении многих рудных задач, так как обеспечивает более адекватное отображение структуры рудных разрезов и позволяет точнее оценивать глубину залегания, размеры и направление падения рудо-перспективных зон. Поскольку данная методика требует значительно большего объема измерений, по сравнению с классическими подходами, то обычная электроразведочная аппаратура плохо подходит для ее реализации из-за низкой производительности работ.

Электротомография начала активно применяться только с середины 90-х гг. и в последние годы получила достаточно широкое распространение благодаря появлению специальных многоэлектродных измерительных систем, которые позволяют автоматизировать процесс измерений и существенно повысить их производительность [1, 2]. В типичных многоэлектродных системах используется большой набор одинаковых металлических электродов, соединенных в виде электроразведочной "косы", причем каждый

электрод может использоваться не только как приемный, но и как питающий. Таким образом, один раз установив и подключив электроды, можно провести комплекс профильных измерений в автоматическом режиме (обеспечивается автоматическое переключение электродов по заданному алгоритму). Появились также более сложные системы – многоканальные многоэлектродные станции, которые позволяют одновременно производить измерения на нескольких приемных диполях, что еще больше увеличивает производительность работ (например, Syscal-Pro, Iris Instruments). Как правило, подобные системы имеют маломощные генераторы электрического тока (не более 200 Вт) и обычно используются при малоглубинных инженерно-геофизических исследованиях методом сопротивлений.

Особенности электротомографии ВП при решении рудных задач

Хотя во многих многоэлектродных системах и заявлена возможность измерений ВП, реальное ее использование для решения рудных задач проблематично по следующим причинам. Во-первых, серьезной проблемой является искажение измеряемого сигнала ВП из-за поляризации металлических электродов при пропускании через них электрического тока, поскольку одни и те же электроды используются и как токовые, и как приемные. Учитывая относительную малость сигналов ВП, эти искажения могут быть очень существенными. Кроме того, для качественных измерений ВП (особенно в импульсном варианте) в качестве приемных желательнее использовать не металлические, а неполяризующиеся электроды, что невозможно в стандартных многоэлектродных системах.

Во-вторых, для решения многих современных рудных задач необходимо выполнить относительно глубокие, по меркам метода ВП, зондирования, когда требуется построение геоэлектрических разрезов до глубин 200–300 м и более. Такая задача возникает, например, при проведении работ в районах с мощными перекрывающимися отложениями, при поисках скрытых глубоко залегающих рудных тел, крупнообъемных медно-порфировых месторождений и т.п. По этой причине для электротомографии ВП необходимо использовать достаточно мощные (обычно не менее 1 кВт) генераторы тока, позволяющие добиться увеличения вторичного сигнала ВП. Как отмечалось выше, существующие многоэлектродные системы для электротомографии включают в себя маломощные генераторы тока и рассчитаны на малоглубинные зондирования.

Для глубокой электротомографии ВП можно использовать некоторые электроразведочные системы метода ВП, обладающие мощными генераторами импульсного тока. Речь идет, в частности, об аппаратуре, выпускаемой фирмами IRIS Instruments (измеритель ELREC PRO и генераторы серии VIP), Zonge International (измеритель GDP-32 и генераторы серии GGT), GF Instruments (система GEPS-2000). Наличие в данных системах многоканального измерителя ВП

позволяет достаточно эффективно использовать их для электротомографии, при наличии измерительной косы. При этом, каждый питающий электрод в таких системах соединяется с генератором отдельным токовым проводом, что делает генераторные косы достаточно громоздкими, а производство измерений трудозатратным. Снижает производительность измерений и то, что коммутация питающих электродов в генераторной косе производится вручную. Кроме того, недостатком этих зарубежных систем является их высокая стоимость.

В качестве более дешевого варианта, можно использовать обычную электроразведочную систему с одноканальным измерителем и с коммутатором, который позволяет переключать приемные электроды, соединенные косой. Подобные коммутаторы в последнее время предлагаются на отечественном рынке. Однако, необходимость ручной перестановки питающих электродов во всех этих вариантах заметно снижает производительность работ при электротомографии.

Таким образом, актуальной задачей является создание электроразведочной аппаратуры для решения рудных задач методом электротомографии ВП, которая должна обеспечивать глубинность исследований до нескольких сотен метров, при достаточно большой производительности работ за счет автоматизации измерений, и иметь отдельные массивы токовых и приемных электродов.

Автоматизированная система электротомографии ВП

Основываясь на опыте работ методом ВП по поиску разных видов рудного сырья в различных регионах России, в НПК «Элгео» была разработана автоматизированная система электрической томографии импульсным вариантом метода ВП (АСЭТ-ВП), которая обеспечивает большую глубинность (несколько сотен метров), оставаясь при этом достаточно портативной и пригодной для пешей транспортировки и работы в труднодоступных районах. Основу АСЭТ-ВП составляет аппаратный комплекс АИЭ-2 [3], дополненный рядом специально разработанных устройств, позволяющих обеспечить дистанционное управление всеми блоками аппаратуры одним оператором и автоматизировать процесс измерений.

Аппаратура АСЭТ-ВП включает следующие основные компоненты (рис. 1): электроразведочный генератор ВП-1000М (1), измеритель МПП-ВП (2) с управляющим карманным персональным компьютером КПК (3), коммутатор измерительной косы КОМИК (4), активную генераторную косу из отрезков трёхжильного кабеля (7), соединённых с модулями-переключателями (5), пульт генераторной косы ПГК (6). Генератор ВП-1000М обладает выходной мощностью 1 кВт и может обеспечить прохождение импульсного тока в заземленной линии с амплитудой до 4 А. Для питания генератора ВП-1000М и пульта ПГК используется бензоэлектростанция (220 В, 50 Гц).

Компоненты системы соединяются между собой линиями связи (рис. 2). Связь управляющего КПК с



Рис. 1. Аппаратура системы электротомографии АСЭТ-ВП: 1 – генератор ВП-1000М, 2 – измеритель МПП-ВП, 3 – управляющий КПК, 4 – коммутатор измерительной косы КОМИК, 5 – модули-переключатели генераторной косы, 6 – пульт генераторной косы ПГК, 7 – трёхжильный кабель генераторной косы на катушке.

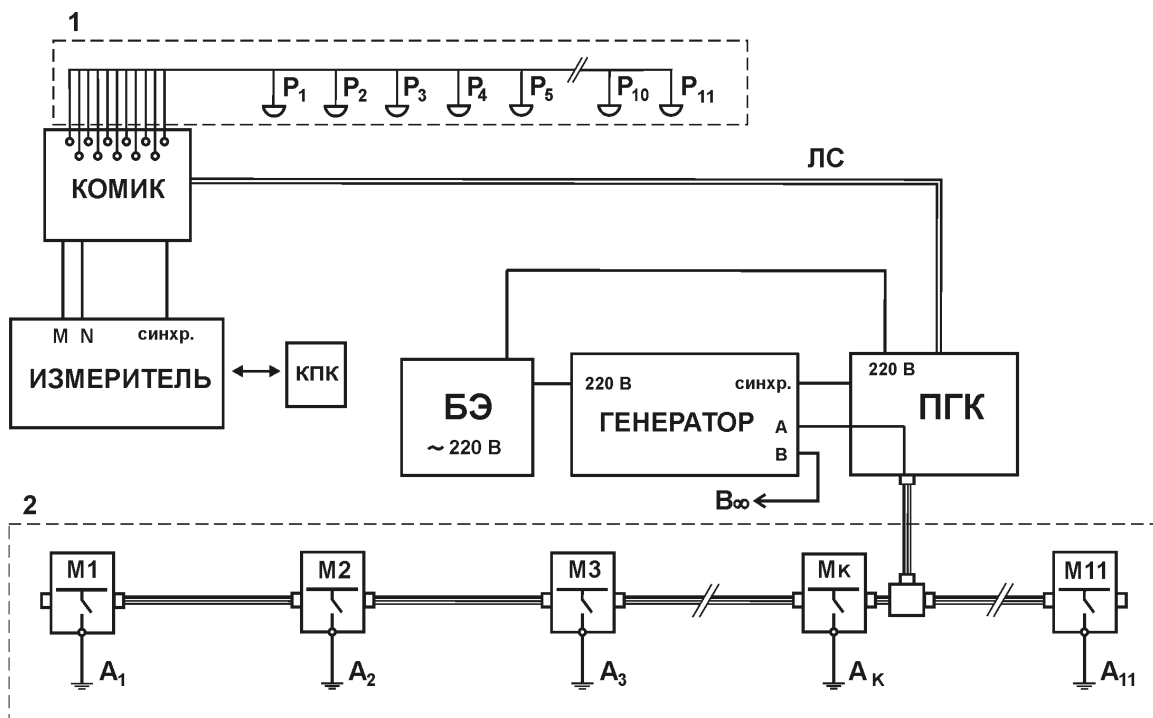


Рис. 2. Схема автоматизированной системы электротомографии АСЭТ-ВП: 1 – измерительная коса, 2 – генераторная коса, ПГК – пульт генераторной косы, КОМИК – коммутатор измерительной косы, ИЗМЕРИТЕЛЬ – измеритель аппаратуры АИЭ-2, ГЕНЕРАТОР – генератор ВП-1000М, БЭ – бензоэлектростанция, КПК – карманный персональный компьютер, ЛС – двухпроводная линия связи, $P_1 \dots P_{11}$ – измерительные электроды, $M_1 \dots M_{11}$ – модули-переключатели генераторной косы, $A_1 \dots A_{11}$ – токовые заземления, V_∞ – удалённое токовое заземление.

измерителем осуществляется по беспроводному каналу Bluetooth. КОМИК обеспечивает подключение выбранной пары электродов пассивной измерительной косы ко входу измерителя и имеет 11 входных каналов. Измеритель и КОМИК соединяются кабелем синхронизации, по которому передаются как команды управления всеми компонентами системы, так и обычные синхроимпульсы, которые далее, через двухпроводную линию связи длиной до 1000 м, поступают на ПГК и генератор ВП-1000М.

ПГК передает команды управления от измерителя на генератор ВП-1000М и обеспечивает подключение одного из заземлений генераторной косы к выходной клемме "А" генератора (клемма "В" генератора постоянно подключена к удаленному электроду). Генераторная коса является активной и состоит из 11 одинаковых модулей-переключателей (M1 ... M11), отрезков трёхжильного кабеля с герметичными разъемами, которые последовательно соединяют между собой модули-переключатели, и металлических заземлений. В трёхжильном кабеле одна жила – силовая, рассчитанная на ток 4 А и напряжение 800 В, а две другие жилы предназначены для передачи сигналов управления. Максимальная длина отрезков трёхжильного кабеля составляет 100 м, так что максимальная длина генераторной косы равна 1000 м (ограничение связано с прохождением сигналов управления). Каждый модуль-переключатель имеет свой уникальный номер и содержит электромагнитное реле с микроконтроллером, которые обеспечивают подключение силовой линии к заземлению по команде из ПГК, содержащей номер нужного модуля.

Автоматизация работы системы обеспечивается управляющей программой на ПК, которая с помощью специальных команд реализует все необходимые операции. Перед началом измерений оператор задает в программе параметры используемой установки – координаты электродов, количество и последовательность используемых пар электродов в измерительной косе, количество заземлений в генераторной косе, значения амплитуды электрического тока для каждого заземления. Значения тока можно задать как вручную,

так и с помощью автоматической процедуры установки максимально возможной стабилизированной амплитуды.

Выполнение электротомографии с системой АСЭТ-ВП происходит следующим образом. Перед началом измерений генераторная коса, состоящая из необходимого количества модулей, раскладывается вдоль профиля измерений. Выбирается удобное место для установки генератора ВП-1000М, и одна из его выходных клемм подключается к генераторной косе через ПГК. Кроме того, ПГК соединяется с генератором кабелем синхронизации, по которому проходят команды управления и синхроимпульсы. Измерительная коса раскладывается в начале профиля и подключается к измерителю через КОМИК. В процессе измерений она перемещается вдоль профиля зондирования с заданным шагом. КОМИК соединяется с ПГК двухпроводной линией связи, которая для удобства обычно наматывается на катушку. Для каждого положения измерительной косы проводится цикл измерений на заданных оператором приёмных диполях при последовательном подключении к генератору всех заземлений генераторной косы. В процессе измерений на дисплей ПК выводится все необходимая текущая информация о подключенном питающем заземлении и паре приёмных электродов. Каждое одиночное измерение заканчивается при достижении заданного оператором порога погрешности измерений, которая оценивается для среднего значения поляризуемости в паузе между импульсами тока, или после заданного максимального количества накоплений.

Как показывает опыт, расстояние между точками питающих заземлений (т.е. шаг между точками зондирования) может составлять до пяти минимальных расстояний a между приёмными электродами MN ($1a \div 5a$). В этом случае не происходит существенного снижения детальности зондирования разреза. Так, например, если по профилю длиной 1 км с шагом 100 м распределены 11 питающих заземлений, то измерения можно производить с приёмным диполем MN и шагом по профилю 20 м (рис. 3). На больших расстояниях АО, с целью увеличения сигнала и качества изме-

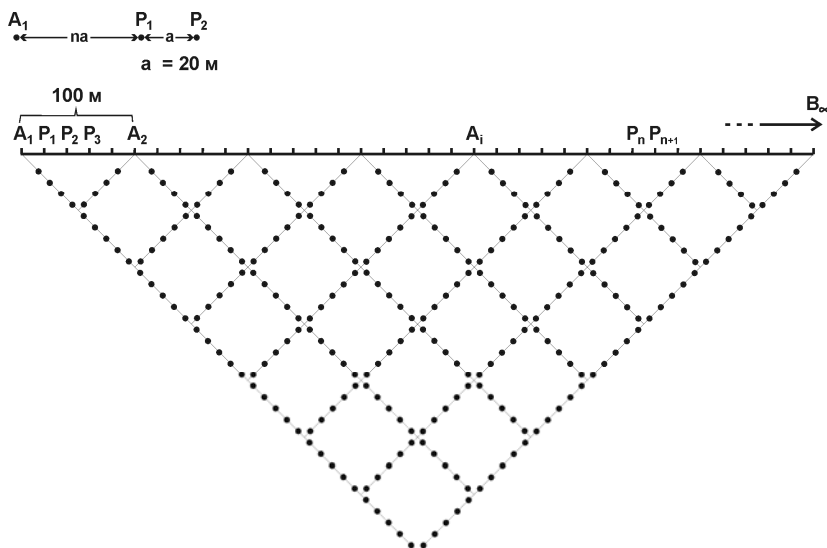


Рис. 3. Схема построения кажущегося геоэлектрического разреза при электротомографии с дипольной установкой: $A_1, A_2 \dots A_i$ – токовые заземления, $P_1, P_2 \dots P_n$ – приёмные заземления, B_∞ – удалённый токовый электрод.

рений ВП, целесообразно также проводить измерения с кратно увеличенными размерами приёмных диполей измерительной косы: 40, 60 и более метров (в измерительной программе АСЭТ-ВП предусмотрена такая возможность). В этом случае максимальное значение разности установок АО при крайних положениях питающих заземлений А и приёмных пар MN может достигать 1000 м.

Второй питающий электрод (В) в «классическом» варианте поль-дипольной установки должен устанавливаться на достаточном удалении (3–5 максимальных значений разностей АО), перпендикулярно профилю зондирования, чтобы его положением можно было пренебречь при интерпретации данных [4]. Устойчивость линии «бесконечности» длиной в несколько км связано с большими трудозатратами, а также приводит к существенному увеличению электрического сопротивления питающей линии, поэтому в практике «глубокой» электротомографии ВП может применяться несимметричная установка, в которой электрод В устанавливается на продолжении профиля измерений на удалении в несколько сотен метров. В этом случае его положение учитывается при интерпретации данных, а сама установка зондирования совмещает в себе черты двух установок: при малых разностях АО – поль-дипольной, а при больших разностях – установки Шлюмберже или диполь-дипольной осевой [1].

При интерпретации данных электротомографии с системой АСЭТ-ВП могут применяться различные программы двумерной инверсии. В практике работ НПК «Элгео» для интерпретации используется программа ZONDRES2D5].

Пример применения системы АСЭТ-ВП

Электротомография с системой АСЭТ-ВП была опробована при поисках золоторудной минерализации на флангах Тырнаузского рудного узла в Кабардино-Балкарии. Работы выполнялись в условиях высокогорья, с развитыми делювиально-пролювиальными отложениями, мощность которых достигала нескольких десятков метров. Район работ отличался сложным геологическим строением, и, по условиям залегания рудных зон, геологи рассчитывали на выявление здесь скрытых золото-сульфидных рудных залежей на глубинах до 200–300 м. В таких условиях необходимо было выполнить достаточно глубокие зондирования методом ВП.

Портативность аппаратуры позволила применить её в условиях сильно пересечённой местности, при крайне ограниченной возможности использования автотранспорта. Коса из 11-ти токовых электродов общей длиной 1 км раскладывалась сразу по всей протяжённости профиля электротомографии, а измерения выполнялись при одном фиксированном положении генераторной группы на профиле, что позволило существенно повысить производительность работ.

Объектом поисков были золоторудные метасоматиты, наиболее продуктивными из которых здесь являются золотоносные скарны, наложенные на средне-

палеозойские терригенные, вулканогенно-осадочные и интрузивные породы [6]. Все известные золоторудные проявления приурочены к тектоническим структурам сбросо-сдвигового типа, северо-западного простирания: Зыгыркольской и Хромитовой (рис. 4-г)

В качестве примера представлены результаты электротомографии по одному из профилей, заданных вкрест простирания рудоконтролирующих тектонических структур (рис. 4). Участок скарнов Зыгыркольской зоны проявляется на разрезах небольшими локальными зонами с повышенными значениями поляризуемости η (5–7 %), которые локализованы на контактах с известняками, имеющими относительно высокие значения удельного электрического сопротивления ρ (несколько тысяч Ом·м). При этом зона скарна на разрезах электротомографии проявляется более контрастно, по сравнению с графиками срединного градиента (рис. 4-а).

В пределах соседней Хромитовой рудно-тектонической зоны фиксируются обширные и глубокозалегающие (до 200–250 м) аномалии повышенных значений η (до 15–18 %) и низких значений ρ (первые десятки Ом·м). Они соответствуют зонам метасоматической проработки, преимущественно кварц-хлорит-карбонатного типа, с прожилковой сульфидной минерализацией, которые приурочены к телам гипербазитовых интрузий и разломам. Результаты электротомографии дают основание полагать, что интенсивными метасоматическими процессами затронут значительный объём пород в пределах Хромитовой зоны.

Таким образом, по результатам электротомографии с системой АСЭТ-ВП в условиях Тырнаузского рудного узла удаётся выделить разнотипные рудные зоны (литолого-формационные комплексы) в диапазоне глубин от первых десятков до 250 м, оценить их размеры и характер залегания.

Выводы

Опыт поисковых работ на различные виды рудного сырья, свидетельствует, что электротомография ВП является эффективным средством исследования рудных разрезов и может применяться для выявления скрытых потенциально рудоносных зон, прежде всего, сульфидсодержащих. При использовании электротомографии ВП в районах с мощными перекрывающимися отложениями, для поисков глубоко залегающих рудных тел и крупнообъёмных медно-порфировых месторождений необходимы зондирования в интервале глубин до 200–300 м и более. Это является довольно сложной задачей, которая требует применения специальных технических средств и методических приёмов, обеспечивающих приемлемое качество измерений при больших разностях установок.

Представленная в статье автоматизированная система электротомографии АСЭТ-ВП, созданная на базе аппаратного комплекса импульсной электроразведки АИЭ-2, позволяет с высокой производительностью выполнить поль-дипольные (точечные) зондирования ВП до глубины в несколько сотен метров. При этом,

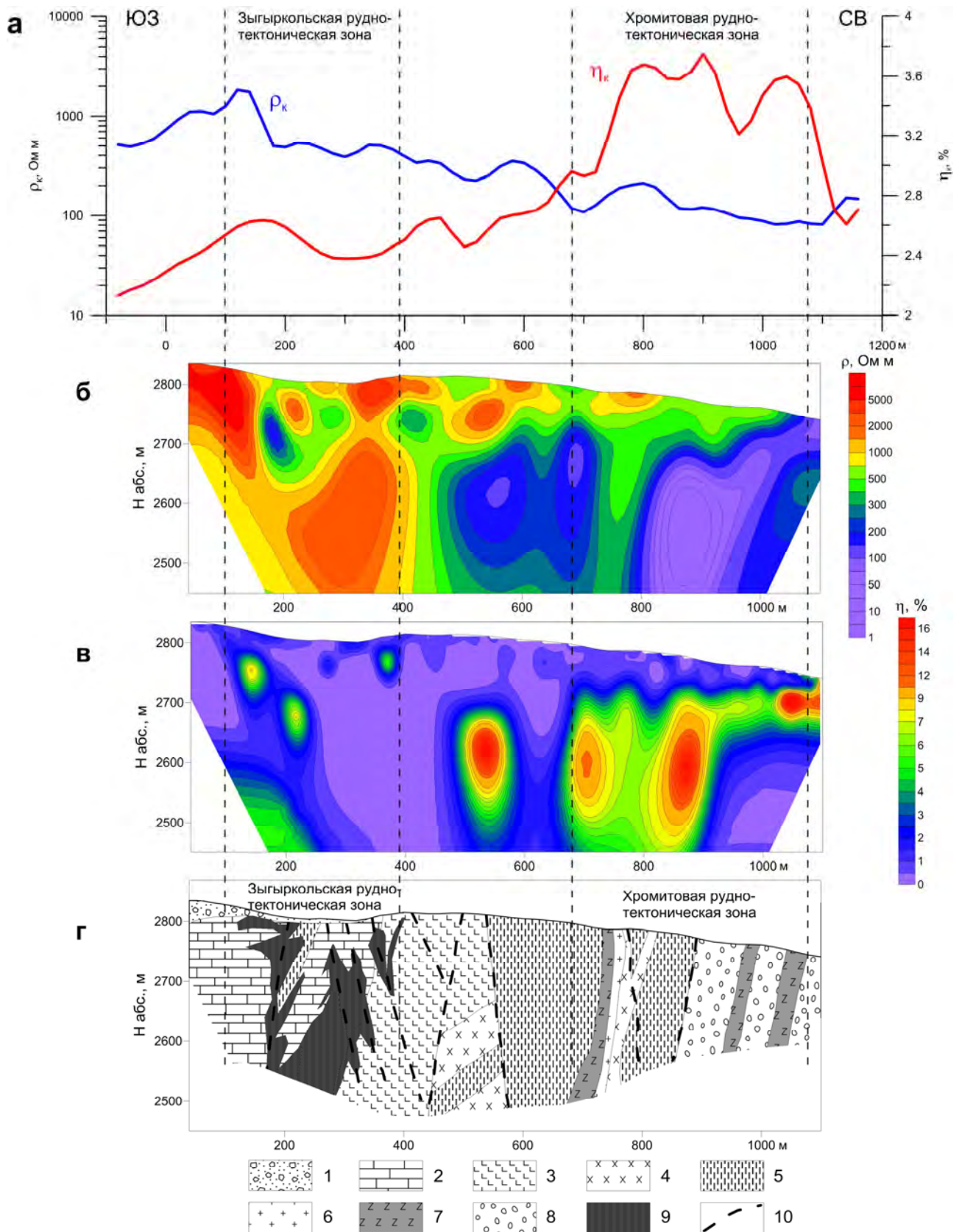


Рис. 4. Профиль электротомографии: а – графики ρ_k и η_k ВП-СГ, б – разрез удельного электрического сопротивления ρ , в – разрез поляризуемости η , г – геологический разрез (1 – делювиальные отложения, 2 – известняки и мраморы, 3 – туфы, 4 – кварцевые диорит-порфиры, 5 – филлиты, 6 – аплитовидные граниты, 7 – серпентиниты, 8 – конгломераты, песчаники, 9 – скарны и окоскарновые метасоматиты, 10 – разломы)

система АСЭТ-ВП остаётся достаточно портативной и пригодной для работы в условиях труднодоступной местности.

Результаты электротомографии с системой АСЭТ-ВП на ряде золоторудных объектов в Кабардино-Балкарии показали, что система может успешно применяться для определения глубины залегания рудных зон и тел, оценки их размеров и направления падения, а в комплексе с геологическими, геохимическими и другими геофизическими методами может помочь в их типизации и выделении различных рудных литолого-формационных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобачев, А. А. Электротомография методом сопротивления и вызванной поляризации / А. А. Бобачёв [и др.] // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 2. – С. 14–17.
2. GRIFFITS, D. H. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology / D. H. Griffiths, R. D. Barker // Journal of Applied Geophysics. – 1993. – Vol. 29. – P. 211–226.
3. Бытенский, Л. И. Аппаратурный комплекс импульсной электроразведки АИЭ-2 / Л. И. Бытенский [и др.] // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2006. – № 1. – С. 41–43.
4. Методические рекомендации по применению точечных зондирований для построения геоэлектрического разреза / НПО «Рудгеофизика»; сост.: В. А. Комаров [и др.]. – Л. – 1989. – 64 с.
5. Каминский, А. Е. Программа для электротомографии ZondRes2D [Электронный ресурс]. URL: <http://zond-geo.ru/software/resistivity-imaging-ves/zondres2d/>
6. Парада, С. Г. О связи золотого оруденения северного фланга Тырнаузского месторождения с интрузивными комплексами (Кабардино-Балкарская республика) / С. Г. Парада, В. В. Столяров // Доклады Академии наук. – 2012. – Т. 445. – № 4. – С. 437–440.

ООО НПК «Элгео», г. Санкт-Петербург

Тарасов В. А., главный геофизик
E-MAIL: VLADTAR@YANDEXRU
Тел.: 8(812) 230 97 41

Бытенский Л. И., генеральный директор
E-MAIL: MAIL@ELGEQRU
Тел.: 8(812) 230 97 4

Пищик В. В., главный конструктор
MAIL@ELGEQRU
Тел. 8(812) 230 97 41

NPC "ELGEO", SAINT-PETERSBURG

TARASOV V. A., CHIEFGEOPHYSICIST
E-MAIL: VLADTAR@YANDEXRU
TEL.: 8(812) 230 97 41

BYTENSKYL I., DIRECTOR GENERAL
TEL.: 8(812) 230 97 4
E-MAIL: MAIL@ELGEQRU

PISCHIK V. V., CHIEFDESIGNER
E-MAIL: MAIL@ELGEQRU
TEL.: 8(812) 230 97 41