

Татьков И.Г., Татьков Г.И., Бадерин А.М. (ГИН СО РАН),
Ковбасов К.В. (ИНГГ СО РАН)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПРИ ПОИСКАХ РУДНОГО ЗОЛОТА В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОГЕНЕЗА И АЛЬПИНОТИПНОГО РЕЛЬЕФА СЕВЕРНОГО ПРИБАЙ- КАЛЬЯ

На основе геоэлектрических моделей, разработанных с учетом условий криолитогенеза, выполнено тестирование алгоритма инверсии Res2DInv в модификации много-разносных зондирований установкой поль-диполь. Оценено влияние различного рода помех, подобраны оптимальные параметры обработки, снижающие неоднозначность геологической интерпретации данных электротомографии. Подтверждена зависимость эффективности инверсии от шага наблюдений, качества исходных данных, величины перекрытия геоэлектрического разреза прямой и обратной установками. По результатам изучения рудовмещающих структур Келяно-Ирокиндинской структурно-формационной зоны показано, что в условиях криолитогенеза и альпинотипного рельефа учет мешающих факторов позволяет повысить детальность и эффективность геологической интерпретации электротомографии методом МКП-ВП. **Ключевые слова:** геофизика, электроразведка, инверсия, электротомография, рудное золото.

Tatkov I.G., Tatkov G.I., Baderin A.M. (Geological Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences), Kovbasov K.V. (Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences)

THE RESULTS OF ERT TO PROSPECTING OF GOLD ORE
IN PERMAFROST AND ALPINE TERRAIN OF NORTHERN
BAIKAL REGION

The testing algorithm of Res2DInv inversion was carrying out by pole-dipole multichannel sounding installation. The influence of various noise was estimated, had chosen an

optimal processing parameters, that reduce ambiguity of geological interpretation data of electroresistivity tomography method. The dependence of inversion effectiveness from station interval, quality of initial data, overlap of geoelectrical section of direct and reversal installations was confirmed. Studying of ore — hosting structures of Kelyano-Irokindinskoy structural-formation zone were shown that in permafrost and Alpine terrain conditions it is important to count a confounding factor. It could allow increasing effectiveness and detail of geological interpretation data by electroresistivity tomography method. **Key words:** geophysics, electrical prospecting, inversion, electroresistivity tomography (ERT), ore gold.

Необходимость прироста запасов для обеспечения действующих горнодобывающих предприятий выдвигает в число важнейших приоритетов оценку перспектив глубоких горизонтов и флангов известных месторождений рудного золота, вовлечение в переработку новых, не традиционных для Северного Прибайкалья типов золотого оруденения [6]. Анализ геологической эффективности наземных геофизических работ показывает, что в условиях альпинотипного рельефа и криолитогенеза наиболее достоверно структуры рудных полей (вещественный состав пород и разломная тектоника) картируются методами магниторазведки. Применение электроразведочных методов осложняется плохими условиями гальванического заземления на курумниках, а также наличием мощного слоя многолетнемерзлых пород с включениями таликов. Определенные надежды при планировании поисково-разведочных работ связываются с технологиями электротомографии (сплошных зондирований), основанными на современной цифровой аппаратуре, методиках 2D-, 3D-моделирования и инверсии [1, 3, 9, 11, 12]. В статье обсуждаются результаты электротомографического исследования участка Келяно-Ирокиндинской структурно-формационной зоны (КИЗ) методом многоразносного ком-

бинированного профилирования (МКП-ВП) или точечного зондирования способом центрального электрода [2].

Тестирование алгоритма инверсии Res2DInv на моделях рудных залежей КИЗ. Для оценки информативности технологии МКП-ВП и тестирования алгоритмов автоматической инверсии Res2DInv на основе априорной информации составлены схематические геоэлектрические модели двух типов, отражающие характерные для КИЗ рудовмещающие структуры (рис. 1, 2). От моделей обоих типов с шагом 50 м вычислялось теоретическое поле кажущихся сопротивлений для прямой (AMN) и встречной установок (MNA); для инверсии — получения геоэлектрического разреза удельных сопротивлений — использовался суммарный псевдоразрез кажущегося сопротивления (AMN+MNA).

Модель первого типа (рис. 1) представляет набор одиночных и сближенных геологических объектов — вертикальных пластин мощностью 15–30 м и сопротивлением 200–600 Ом·м, расположенных в однородной высокоомной вмещающей среде с сопротивлением 1500 Ом·м. Выбранная идеализированная геоэлектрическая модель аппроксимирует строение целевых рудоуправляющих структур (крутопадающие кварцевые

жилы с зонами окolorудных изменений, тектонитов, окварцевания), выходящих на поверхность или перекрытых маломощным слоем дезинтегрированных многолетнемерзлых пород.

При инверсии вычисленных от модели первого типа псевдоразрезов (прямого — AMN, встречного — MNA и суммарного) кажущегося сопротивления были сделаны следующие выводы. Из-за влияния С-эффекта, наблюдаемого при прохождении питающего (токового) электрода над проводящей неоднородностью, близповерхностное, ограниченное по глубине тело малой мощности и высокой проводимости проявляется на псевдоразрезах в виде локальной аномалии кажущегося сопротивления (для прямой установки AMN) или вертикального тела малой мощности (для обратной — MNA). На суммарном псевдоразрезе это же тело представляется композицией разнесенных по глубине проводящих тел ограниченной мощности.

Верхняя часть разреза (до глубин, сопоставимых с шагом измерений) тестируемым робастным алгоритмом инверсии подбирается наименее достоверно. В результате инверсии суммарного разреза вместо близповерхностного, ограниченного по глубине проводящего тела малой мощности получено «зеленое» проводящее

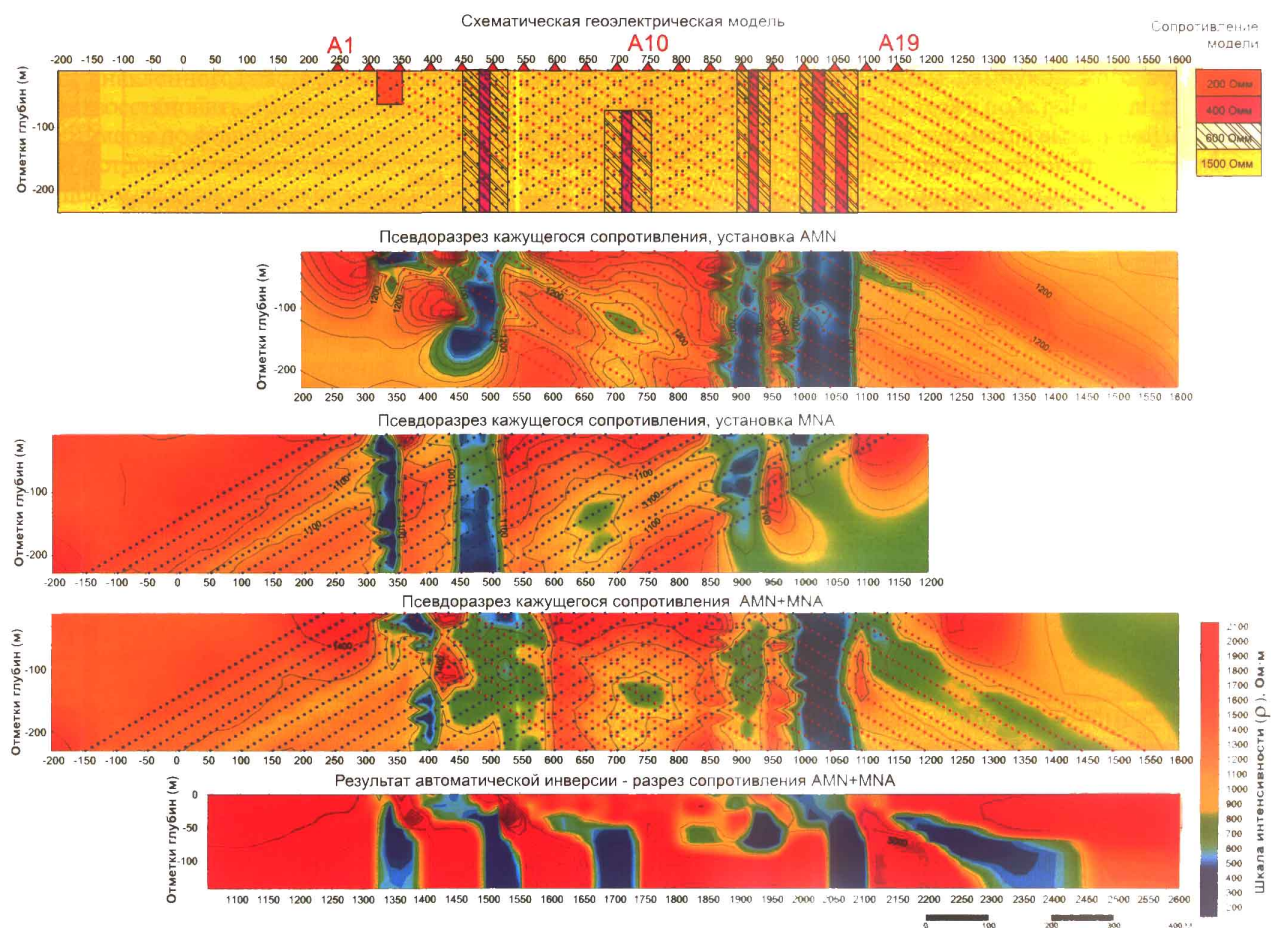


Рис. 1. Результаты моделирования и инверсии однородного полупространства с включением группы вертикальных геологических тел

тело с верхней кромкой на глубине 50 м. Перебор различных вариантов моделей показал, что при автоматической инверсии с повышением сопротивления вмещающей среды (контрастности модельного разреза) сильнее проявляется эффект обтекания током высокоомных вставок [5]. Наиболее близко к тестовой модели выделяются «слепые» геологические тела с верхней кромкой на глубине 50–100 м, расположенные в центральной части суммарного разреза. Сближенные вертикальные проводящие тела, фиксируемые в краевой части в интервале 900–1100 м прямого и обратного псевдоразрезов, при инверсии представляются набором сближенных низкоомных объектов с различающимся положением нижней кромки.

Моделированием установлена пониженная надежность подбора геологических тел в краевых частях относительно центра изучаемого разреза. Эту особенность следует учитывать при инверсии разрезов небольшой протяженности, но она вполне устранима при увеличении длины профиля наблюдений — площади перекрытия прямой и обратной установками. Качественная интерпретация — определение и учет в первом приближении горизонтальных размеров возмущающих тел по прямому и встречному геоэлектрическим разре-

зам — в условиях модели первого типа позволяет получить более точные контуры проводящих объектов, искажаемых при автоматической инверсии тестируемым робастным алгоритмом.

Модель второго типа (рис. 2) также представляет комбинацию горизонтальной слоистой вмещающей среды и вертикальных/наклонных тел. Верхний высокоомный ($\rho_k = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) слой мощностью до 50 м с проводящими включениями аппроксимирует толщу курумников, многолетнемерзлых дезинтегрированных горных пород с локальными близповерхностными таликами. Вертикальными и наклонными проводящими телами мощностью порядка 30 м моделируются рудовмещающие структуры (тела метасоматитов, зоны сульфидизации и окорудных изменений). Одно из возмущающих тел — наклонный пласт (мощность 30 м, глубина до верхней кромки 50 м, угол падения 60°) — имеет конечные размеры. Использование такого набора возмущающих объектов позволяет протестировать алгоритм инверсии в условиях криолитогенеза и сложного геоэлектрического разреза.

По результатам инверсии модельных разрезов второго типа сделаны следующие выводы. Как и для модели первого типа, верхняя часть разреза (до глубин, сопо-

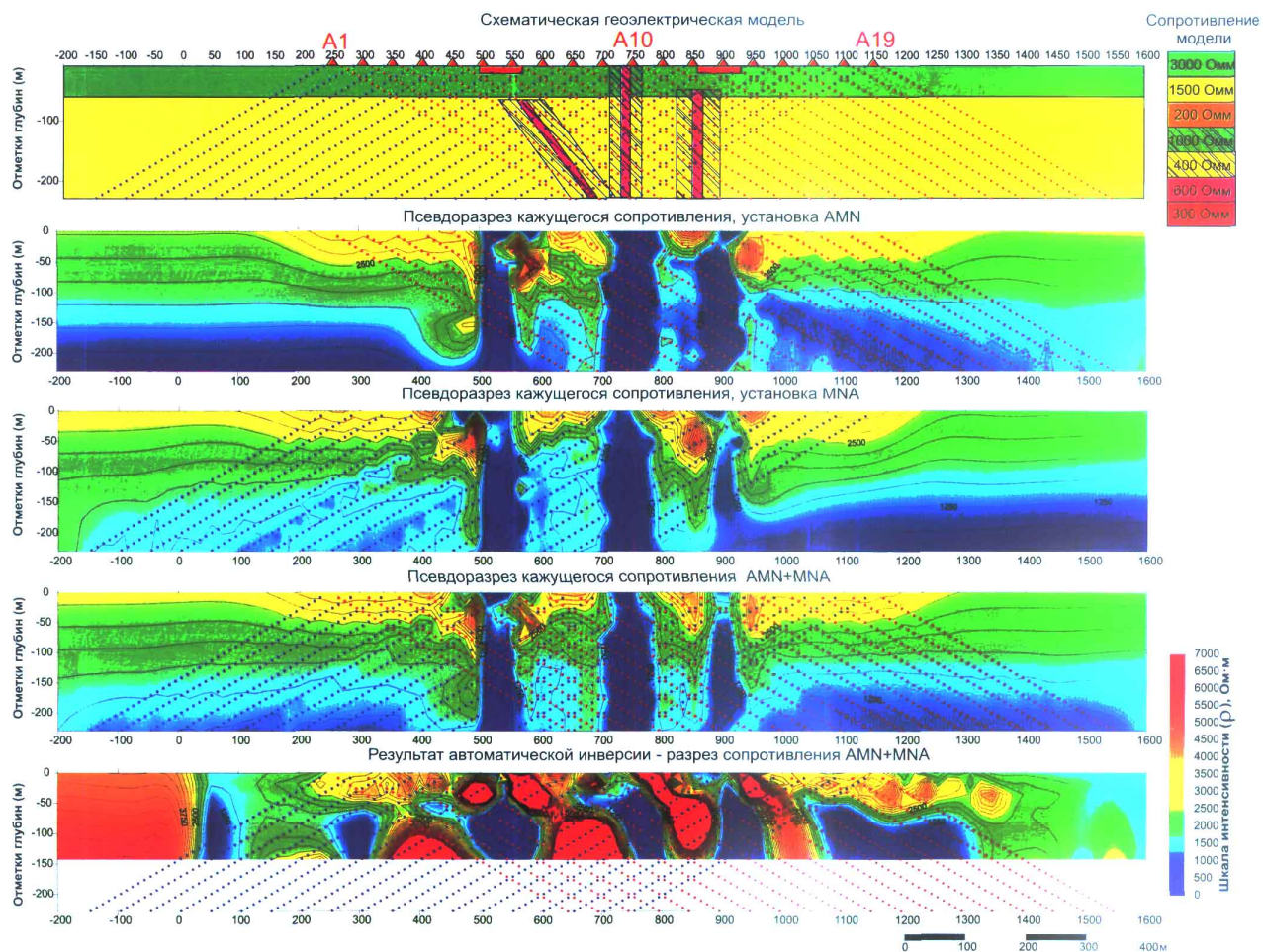


Рис. 2. Результаты моделирования и инверсии двухслойной геоэлектрической среды с включением группы сложных геологических тел

ставимых с шагом измерений) инвертируется с наименьшей достоверностью. Присутствие близповерхностного высокоомного слоя дезинтегрированных мерзлых пород (криолитозоны) мощностью 50 м (равной расстоянию между точками зондирования) приводит при инверсии к общему значительному завышению удельного сопротивления в верхней части разреза. Приповерхностные проводящие включения малой мощности (талики) в значительной степени искажают реальную форму и меняют углы падения возмущающих тел [11,12].

На отметках ниже 50 м инвертированный разрез представлен набором сближенных тел повышенного (до 7000 Ом·м) и пониженного (менее 500 Ом·м) сопротивления из-за так называемого эффекта сопряженных аномалий [5], когда по краям контрастных, ограниченных по глубине возмущающих объектов возникают сравнительно слабые аномалии с противоположным знаком. При малой области перекрытия разреза прямой и встречной установками из-за С-эффекта снижается достоверность инверсии в краевых частях моделируемых разрезов, вплоть до появления ложных аномалий удельного сопротивления, не имеющих геологической природы. В центральной части профиля ограничение по простиранию возмущающих тел в меньшей степени сказывается на результатах инверсии. Наклонный пласт конечных размеров по простиранию при инверсии выделяется как возмущающий объект искаженной формы. Примерные границы верхней кромки наклонного пласта повышенной проводимости можно восстановить, только учитывая его горизонтальные размеры по форме сопряженных аномалий на прямой и встречном псевдоразрезах.

В целом, геоэлектрическое моделирование показало, что использование методики зондирования в модификации МКП-ВП, алгоритма инверсии Res2DInv позволяет уверенно выделять в центральной части изучаемых разрезов контрастные по проводимости крутопадающие тела с горизонтальной мощностью, сопоставимой или превышающей шаг измерений. Некоторые искажения геометрии и геоэлектрических свойств возмущающих тел происходят при наличии локальных близповерхностных проводящих неоднородностей (таликов). Неоднозначность решения в рамках эквивалентных моделей снижается посредством уточнения границы возмущающих объектов по прямым и встречным разрезам кажущегося сопротивления или использования данных горно-буровых и площадных геофизических работ.

Методика и результаты полевых геофизических исследований. В геолого-структурном отношении КИЗ представляет собой тектоническое сочленение высокометаморфизованных раннедокембрийских образований Южно-Муйской глыбы с вулканогенно-осадочными и плутоническими породами рифейского островодужного комплекса [8]. Исходя из благоприятной геологической обстановки, поиски оруденения в пределах КИЗ ориентировались на новый для данного района золото-сульфидный тип, предположительно представленный минерализованными зонами, приуроченными к приконтактовым частям ирокин-

динской динамосланцевой и потенциально-рудонесущей аматканской метаморфизованной терригенно-осадочной толщ. В геофизических полях подобные объекты золото-сульфидной формации выделяются цепочками положительных магнитных максимумов, интенсивными аномалиями проводимости и вызванной поляризации ВП, естественного поля ЕП. Отмечается вторичная радиогеохимическая зональность кварц-карбонат-альбит-серицитовых метасоматитов: ThU-U(Th)-UK(ThK) [2].

В комплексе геофизических методов для картирования залежей типа минерализованных зон на площади КИЗ вместе с традиционными площадными методами магнито-, электроразведки в модификации срединного градиента (СГ) и естественного поля (ЕП) включены электрические зондирования на постоянном токе (МКП-ВП).

По характеру магнитного и геоэлектрических полей на изучаемом участке КИЗ хорошо идентифицируются гнейсово-кристаллосланцевые породы киндиканской свиты (AR₁? kn), слагающие Южно-Муйскую глыбу. Стратифицированные образования, представляющие известняками позднерифейской буромской свиты (R₂br), закартированы в центральной, юго-западной и северо-западной частях участка. Интенсивными линейными магнитными аномалиями выделяются, предположительно, небольшие тела габброидов кедровского комплекса. Знакопеременными магнитными полями и сильноизменчивой поляризуемостью характеризуются гранитоиды бамбукойского комплекса, слагающие отдельные тела в поле пород киндиканской свиты. Использование параметра вызванной поляризации для разбраковки природы аномалий основывалось на меньшей поляризации рудовмещающих толщ с убогосульфидной минерализацией относительно графитизированных толщ ($\eta_k = 0,4-0,5 \%$, $\rho_k = 1200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и обводненных зон тектонических нарушений ($\eta_k = 0,2-0,3 \%$, $\rho_k = 3000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) [5].

Геоэлектрические разрезы в пределах выделенных по ВП-СГ аномалий проводимости и поляризуемости детализировались с шагом 50 м между питающими электродами по технологии многоразносных зондирований. Изучаемые геоэлектрические разрезы были охвачены двойным (встречным и прямым) перекрытием наблюдений, что обеспечило глубину исследований до 100–150 м при протяженности профиля зондирования от 1 до 3 км. Измерения выполнялись с многоканальной станцией ЭИН-2000.

В результате применения профильной (2D) электро-томографии для доизучения выявленных комплексных аномалий (пониженного сопротивления, повышенной поляризуемости, повышенных концентраций калия) удалось детализировать их внутреннее строение. В частности, фрагменты комплексных аномалий — предполагаемых минерализованных зон — выделены и детально изучены на водоразделе вдоль западной границы КИЗ, где ранее отдельными канавами вскрыты участки (мощностью до 30 м) гидротермальной проработки и окварцевания тонких «углисто-глинистых»(?) сланцев. В отдельных пробах, отобранных из зон гидротермальной проработки и окварцевания тонких «углисто-гли-

нистых» сланцев, пробирным анализом установлены содержания золота 0,2–0,6 г/т.

На другом перспективном участке в толще зеленых сланцев пониженными сопротивлениями, повышенной поляризуемостью, обширными вторичными ореолами рассеяния Cu, Pb, Zn, Ag отмечается полоса ин-

тенсивной пиритизации (колчеданной минерализации) шириной до 400 м, которая прослеживается в северо-западном направлении по свалам и отдельным коренным выходам на 2,5 км.

На рис. 3 и 4 представлены результаты электротомографии МКП-ВП по двум профилям, пересекающим

рудные залежи, выделенные в пределах КИЗ. Перекрытие центральной части геоэлектрических разрезов, как правило, превышало 50 % их протяженности. Результаты инверсии показаны в виде геоэлектрического разреза удельного сопротивления, геологическая интерпретация дана на структурном геолого-геофизическом разрезе. Данные проходки близрасположенных канав и скважин спроецированы на геологический разрез.

Для обоих построенных с помощью Res2DInv удельных геоэлектрических разрезов в приповерхностной части отмечается высокоомный горизонтальный слой мощностью до 50 м. Согласно проведенному тестированию, этот слой может быть как фиктивным — вследствие низкой детальности инверсии на глубинах, сопоставимых с шагом измерений, так и иметь геологическую природу — слой

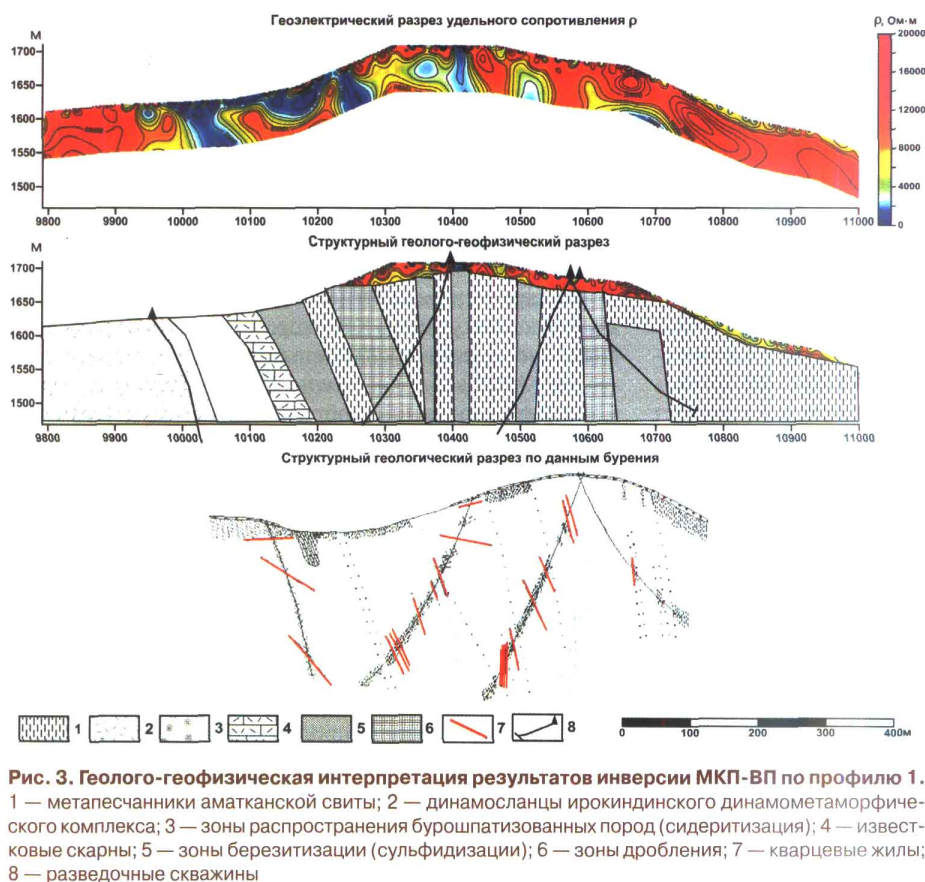


Рис. 3. Геолого-геофизическая интерпретация результатов инверсии МКП-ВП по профилю 1. 1 — метапесчанники аматканской свиты; 2 — динамосланцы ирокиндинского динамометаморфического комплекса; 3 — зоны распространения бурошпатизованных пород (сидеритизация); 4 — известковые скарны; 5 — зоны березитизации (сульфидизации); 6 — зоны дробления; 7 — кварцевые жилы; 8 — разведочные скважины

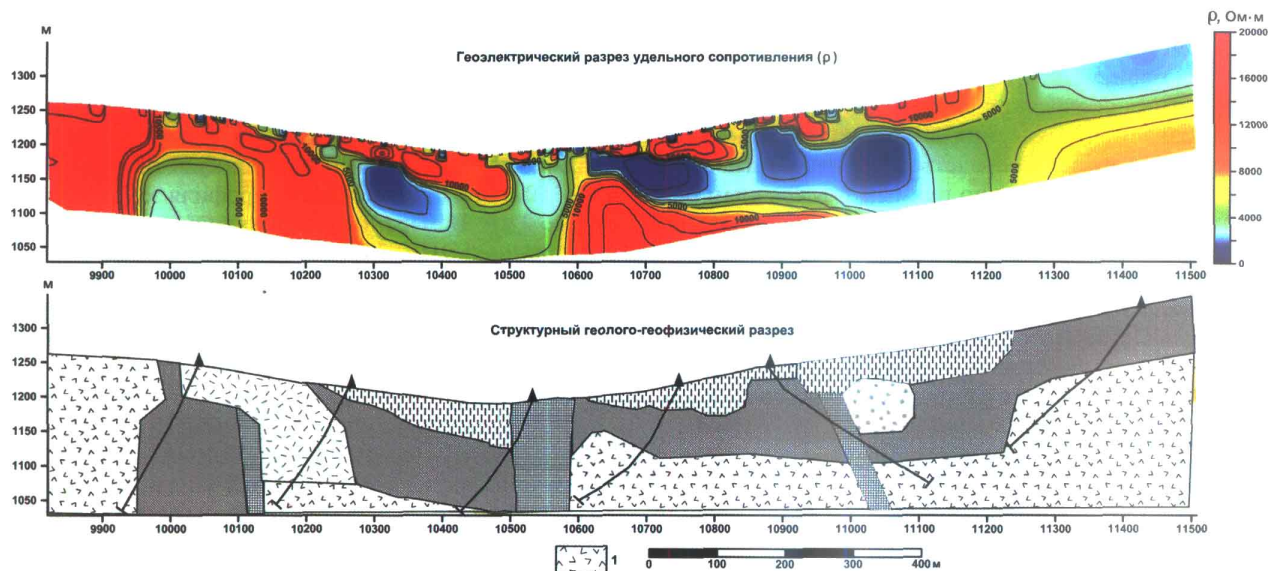


Рис. 4. Геолого-геофизическая интерпретация результатов инверсии МКП-ВП по профилю 2. 1 — гранодиориты и лейкократовые граниты бамбукойского вулcano-плутонического комплекса; остальные усл. обозначения см. на рис. 3

дезинтегрированных промороженных пород, курумников. Ниже дезинтегрированной промороженной толщи пород (фиктивного слоя?) выделяются крутопадающие локальные проводящие и поляризующиеся объекты, имеющие, по данным тестирования, реальную геологическую природу.

На геоэлектрическом разрезе по профилю 1 ниже высокоомного слоя по результатам инверсии выделено семь субвертикальных проводящих объектов, предположительно рудных тел, в том числе два «слепых». Крутопадающие рудные тела пространственно совпадают в плане с локальными поляризуемыми объектами (рис. 3).

Магистральной канавой вблизи этого электротомографического профиля с поверхности вскрыта часть рудной залежи типа минерализованной зоны. Результаты опробования показали, что содержания золота варьируют по вскрытой части залежи от 0,2 до 4,25 г/т (среднее 0,5 г/т). Разведочными скважинами в центральной части профиля подсечено два рудных тела. Первое имеет средние содержания золота 0,47 г/т (по рудному интервалу мощностью более 150 м), второе — 0,65 г/т.

В целом результаты буровых и горных работ подтверждают рудоносность вскрытых с поверхности тел, но по данным электротомографии возмущающее крутопадающее проводящее тело на восточном фланге профиля имеет восточное падение, а не западное, как задокументировано по керну скважины на соседнем профиле. Эти отличия нуждаются в заверке бурением, так как могут быть объяснены как ошибками документирования, так и возможными искажениями параметров падения проводящих объектов в краевых частях инвертируемых разрезов. Не вскрыт и не оценен разведочными скважинами и другой перспективный возмущающий объект — мощная (100 м) слепая зона березитизации, предполагаемая на восточном фланге профиля (ПК 10650÷10750).

На томографическом профиле 2 ниже образований ирокиндинского динамометаморфического комплекса, метапесчаников и зеленых сланцев аматканской свиты на глубине 100–159 м по данным бурения подсечена кровля массива гранодиоритов бамбукойского вулканоплутонического комплекса. Апикальная часть массива контрастно проявляется на инвертированном геоэлектрическом разрезе (рис. 4). Пониженные (до 500–800 Ом·м) удельные сопротивления динамосланцев в западной части профиля (ПК 10600÷11500) свидетельствуют о значительной гидротермальной проработке кровли интрузии. Повышенные значения вызванной поляризации и проводимости в этой части профиля связаны с рассеянной сульфидной минерализацией в тектонизированных и графитизированных сланцах, проявлениями березитизации (сидеритизации). В центральной части инвертированного геоэлектрического разреза выделяется низкоомный поляризующийся объект, приуроченный непосредственно к зоне разлома (ПК 10500÷10580). Природа этого объекта интерпретируется как пачка графитизированных тектонических сланцев. Высокими значениями вызванной поляризации в восточной

части профиля (ПК 9950÷10150) также отмечаются графитизированные динамосланцы и породы с интенсивной гидротермальной проработкой (зоны березитизации и бурошпатизации).

Заключение. Тестирование алгоритма автоматической инверсии Res2DInv на моделях горизонтально-неоднородных сред показало, что применение ортогональной несимметричной установки (прямой и встречной) поль-диполь позволяет уточнять горизонтальные размеры крутопадающих возмущающих тел. В условиях мощной криолитозоны и курумников алгоритмом инверсии Res2DInv наиболее близко к тестовым моделям определяются геометрические параметры и удельные сопротивления тел в центральной части суммарных геоэлектрических разрезов. Верхняя часть сложного геоэлектрического разреза (до глубин, сопоставимых с шагом измерений) подбирается наименее достоверно. Проводящие тела малой мощности — тапки в верхней части модельного разреза — могут в значительной степени исказить реальную форму и менять углы падения и удельную проводимость возмущающих тел.

При профильном применении многоэлектродных зондирований МКП-ВП в пределах локальных участков КИЗ выявлены и прослежены близповерхностные и «слепые» крутопадающие возмущающие тела на глубинах до 100 м. Полученные на основе инверсии алгоритмом Res2DInv интерпретационные геоэлектрические разрезы хорошо подтверждаются результатами проведенных горно-буровых работ.

В целом, расширенный методами электротомографии в сочетании с площадной электроразведкой ВП-СГ, наземной гамма-спектрометрией поисковый комплекс позволил в условиях альпинотипного рельефа и криолитогенеза не только решать задачи геофизического картирования вмещающих толщ и разноранговых тектонических нарушений, но и детализировать внутреннее строение комплексных аномалий (пониженного сопротивления, повышенной поляризуемости, повышенных концентраций калия) — предположительно рудных тел типа минерализованных зон.

Несмотря на дефицит набора петрофизических характеристик руд и вмещающих пород, полученные площадные данные наземной магнито-, электроразведки, гамма-спектрометрии в сочетании с 2D-электротомографией надежно картируют известные стратиграфические и интрузивные структурно-вещественные комплексы, отдельные петрографические разности или группы пород, что в итоге существенно дополняет представления о геологии, структуре, тектонике участка, снижает неоднозначность результатов работ.

Статья подготовлена при финансовой поддержке партнерского проекта СО РАН № 31.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобачев А.А., Модин И.Н. Электротомография со стандартными электроразведочными комплексами // Разведка и охрана недр. — 2008. — № 1. — С. 43–47.
2. Вешев А.В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. — Л.: Недра. 1980.

3. Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. — М.: Научный мир, 2007.
4. Комаров В.А. Электроразведка методом вызванной поляризации. — Л.: Недра, 1980.
5. Модин И.Н. Электроразведка в технической и археологической геофизике. Автореф. дис. д-ра техн. наук. — М.: Изд-во МГУ, 2010.
6. Рощектаев П.А., Орлов И.Б. и др. Золото Бурятии. Кн. 1. — Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2004.
7. Чебаков Г.И., Рощектаев П.А. Комплекс геофизических методов при поисках коренных месторождений золота в Восточном Саяне. — Томск: Изда-во ТПУ, 2001.
8. Цыганков А.А. Магматическая эволюция Байкало-Муйского вулканоплутонического пояса в позднем кембрии. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.
9. Dahlin T., Zhou B. Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying // Near Surface Geophysics. — 2003. — N 1. — P. 105–117.
10. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. — 1990. — N 44. — С. 131–132.
11. Loke M.H., Barker R.D., Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion // Geophysical Prospecting. — 1996. — N 44. — P. 499–523.
12. Loke M.H. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys //www.geoelectrical.com, 2011.

© Коллектив авторов, 2014

Татьков Иван Геннадьевич // tigr325@gmail.com
Татьков Геннадий Иванович
Бадерин Александр Михайлович
Ковбасов Константин Валерьевич // kovbasov@gmail.com