



УДК 550.837

## СОВМЕСТНАЯ ДВУМЕРНАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ И АУДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ РУДНЫХ ЗАДАЧ

В.А.КУЛИКОВ<sup>1</sup>, А.Е.КАМИНСКИЙ<sup>2</sup>, А.Г.ЯКОВЛЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО «КГЭ "Астра"», Санкт-Петербург, Россия

При проведении поисковых и оценочных работ на рудные полезные ископаемые широко применяются электроразведочные методы. Не всегда геоэлектрические модели, полученные в результате интерпретации разных видов электрического и электромагнитного зондирования, согласуются между собой. Это приводит к сложностям при геологическом истолковании результатов электроразведки. В отдельных случаях можно построить геоэлектрическую модель, которая с высокой степенью точности будет удовлетворять разным электроразведочным данным, например результатам геометрических зондирований и индукционных электромагнитных зондирований. Для этих целей был разработан алгоритм совместной инверсии данных электротомографии и магнитотеллурического зондирования, реализованный А.Е.Каминским в программе ZondRes2D. Показано преимущество совместной инверсии для изучения разреза до глубин 400-500 м на синтетических моделях и на реальных полевых данных.

**Ключевые слова:** электротомография, магнитотеллурическое зондирование, двумерная инверсия, рудная электроразведка

**Как цитировать эту статью:** Куликов В.А. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и аудиоманнитотеллурических зондирований при решении рудных задач / В.А.Куликов, А.Е.Каминский, А.Г.Яковлев // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 9-19. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.9

**Введение.** При поисках и оценке месторождений твердых полезных ископаемых широко применяются электроразведочные методы. В последние годы геометрические зондирования, как правило, выполняются по методике электротомографии (ЭТ), а ведущими методами индукционных зондирований являются методы аудиоманнитотеллурического зондирования (АМТЗ) или зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Согласование между собой результатов, полученных разными методами, – одна из актуальных задач современной рудной электроразведки.

Для методов постоянного тока (ВЭЗ, ЭТ) устойчиво определяемыми геоэлектрическими параметрами являются продольная проводимость проводящих слоев  $S = h/\rho$  и поперечное сопротивление высокоомных слоев  $T = h\rho$ . По результатам инверсии определяется среднее геометрическое сопротивление пласта  $\rho_m = \sqrt{\rho_l \rho_n}$ , где  $\rho_l$  и  $\rho_n$  – сопротивление слоев вдоль и вкост напластования.

Для индукционных низкочастотных зондирований (АМТЗ, ЗСБ) надежно определяемыми параметрами являются суммарные продольные проводимости  $S$  низкоомных слоев и глубины  $H$  до их верхних кромок. Основное влияние на результаты в таких методах оказывает продольное сопротивление пород  $\rho_l$ .

Таким образом, геометрические зондирования на постоянном токе позволяют получить информацию о поперечном сопротивлении высокоомных слоев, но ненадежны при определении глубин. Индукционные зондирования позволяют устойчиво определить глубины до кровли проводящих горизонтов, но не содержат информации о сопротивлении высокоомных слоев. Комплексирование двух разных типов зондирований позволяет решать широкий круг геологических задач, от прямого поиска рудных тел до выявления косвенных рудных признаков [2, 6].

**Алгоритм совместной инверсии данных ЭТ и АМТЗ в программе ZondRes2D.** Возможность совместной инверсии данных электротомографии и аудиоманнитотеллурических зондирований реализована в программе ZondRes2D А.Е.Каминского. Функционал программы позволяет комбинировать различные компоненты магнитотеллурического (МТ) поля с данными наземной электротомографии (ЭТ) при подборе модели удельных электрических сопротивлений (УЭС).

Основной проблемой при совместной интерпретации разных электроразведочных данных является несоответствие в масштабности комплекслируемых методов. Это проявляется в различии эффективных объемов среды, захватываемых полем, а также в разном влиянии электропроводности в макроскопическом смысле на компоненты электрического и электромагнитного поля. Кро-

ме того, усложнить интерпретацию полевых данных могут гальванические искажения и неравноценное влияние трехмерных объектов на результаты измерений обоими методами.

Для борьбы с гальваническими эффектами в магнитотеллурическом методе используется методика подбора статических сдвигов совместно с сопротивлением при инверсии. За подавление «трехмерности» отвечает дополнительный весовой параметр, выбираемый в соответствии с заранее рассчитанным значением параметра асимметрии *skew*. В самом простом варианте данный параметр обратно пропорционален *skew*, что позволяет уменьшать значимость МТ-данных, характеризующихся большими показателями «трехмерности». Введение «штрафов за трехмерность» с использованием параметров типа *skew* при 2D-инверсии 3D-искаженных данных широко применяется на практике [1].

При решении обратной задачи используется итерационный метод наименьших квадратов Ньютона с регуляризацией. Каждое измерение при инверсии обладает как индивидуальным весом, получаемым в ходе обработки, так и общим, регулирующим значимость этого типа данных (или компоненты) в общую невязку. Таким образом, появляется возможность усилить влияние того или иного типа данных на итоговую модель УЭС.

Функционал невязки состоит из четырех основных частей: невязки данных электротомографии, невязки магнитотеллурических данных, гладкости модели, гальванического Р-эффекта МТ-данных. На последнюю его компоненту накладываются жесткие ограничения двух типов: минимизация суммы всех сдвигов и максимизация сдвига (выбирается на основании анализа графиков кажущегося сопротивления вдоль профиля).

Был использован вариант функционала невязки совместной инверсии для эффективного МТ-импеданса:

$$\Psi(m) = \|W_{\text{skew}} W_{\rho\text{MT}} (\rho^{\text{MT}} - \rho^{\text{MT}}(m) - \text{Sh}_{\text{st}})\|^2 + \|W_{\text{skew}} W_{\varphi\text{MT}} (\varphi^{\text{MT}} - \varphi^{\text{MT}}(m))\|^2 + \\ + \|W_{\rho\text{ERT}} (\rho^{\text{ERT}} - \rho^{\text{ERT}}(m))\|^2 + \lambda \|W_m m\|^2,$$

где  $W_{\text{skew}}$  – веса измерений, рассчитанные в соответствии с параметром *skew*;  $W_{\rho\text{MT}}$  – веса измерений эффективных кажущихся сопротивлений МТ;  $\rho^{\text{MT}}$  и  $\rho^{\text{MT}}(m)$  – логарифмы наблюдаемых и рассчитанных значений эффективных кажущихся сопротивлений МТ;  $\text{Sh}_{\text{st}}$  – подбираемое в ходе инверсии значение гальванического Р-эффекта каждой точки (в логарифмах);  $W_{\varphi\text{MT}}$  – веса измерений фаз эффективного импеданса МТ;  $\varphi^{\text{MT}}$  и  $\varphi^{\text{MT}}(m)$  – наблюдаемые и рассчитанные значения фазы эффективного импеданса МТ;  $W_{\rho\text{ERT}}$  – веса измерений кажущихся сопротивлений ЭТ;  $\rho^{\text{ERT}}$  и  $\rho^{\text{ERT}}(m)$  – логарифмы наблюдаемых и рассчитанных значений кажущихся сопротивлений ЭТ;  $\lambda$  – параметр регуляризации;  $W_m$  – оператор, обеспечивающий гладкость модели при инверсии;  $m$  – вектор логарифмов удельных сопротивлений разреза.

Общие веса компонент инверсии обычно выбирают опытным путем на основании двух-трех пробных инверсий. Вследствие разности метрик различных компонент данных выбор значения параметра регуляризации  $\lambda$  может играть ключевую роль для сходимости решения. В алгоритме используется линейный поиск оптимального значения параметра регуляризации в широком диапазоне на каждой итерации.

При совместной инверсии данных можно применять как эффективные импедансы, так и ТМ/ТЕ-моды. Целесообразность использования эффективного импеданса при двумерной МТ-инверсии 3D-искаженных данных неоднократно рассматривалась в отечественных и зарубежных работах [7], в том числе и в приложении к решению рудных задач [1, 3]. Возможности совместной инверсии данных электротомографии и радиомагнитотеллурических зондирования в программе ZondRes2D ранее рассматривались для решения задач инженерной геофизики [2]. В данной работе мы оценили возможности новой инверсии для решения рудных задач, где глубина исследования составляет сотни метров и используются нестандартные установки электротомографии.

**Тестирование алгоритма совместной инверсии на синтетических моделях.** Тестирование совместной инверсии было выполнено на ряде синтетических моделей, имитирующих рудные объекты разного размера и конфигурации. В работе представлены выборочные результаты тестирования, показывающие, что совместная инверсия данных АМТЗ и ЭТ может привести к существенному повышению разрешающей способности комплекса электроразведочных методов.



При проведении моделирования для метода ЭТ мы использовали несимметричную осевую установку с большой длиной питающей линии  $AB$  [5]. Такую установку применяют для измерений по методике электротомографии на большие глубины (300-500 м). Длина питающей линии  $AB = 500$  м, длина приемных линий увеличиваются от 20 м на малых разносах до 200 м на больших разносах. Разносы  $AO$  изменяются от 50 до 1200 м. Расстояние между точками зондирования 40 м. Данная установка позволяет исследовать как малые, так и большие глубины при одной длине питающего диполя. На малых разносах, поскольку влияние дальнего питающего электрода незначительно, она соответствует трехэлектродной установке Шлюмберже, на больших разносах получается обычная дипольная осевая установка, на средних разносах – несимметричная четырехэлектродная установка. Разносы, длины приемных линий и расстояние между точками зондирования подобраны таким образом, что при перемещении установки по профилю электроды приемной и питающей линии используются многократно на разных разносах.

Расчет магнитотеллурических параметров при решении прямой задачи проводился на 20 частотах в диапазоне от 1 до 10000 Гц, что отвечает стандартному рабочему диапазону аудио-магнитотеллурического зондирования [4].

На первом этапе проводился расчет прямых двумерных задач с использованием программ ZONDMT2D и ZondRes2D. Нами рассматривались вертикальные, горизонтальные и наклонные проводящие тела простой формы, а также более сложные модели, имитирующие реальные рудные месторождения разного типа. Некоторые модели усложнялись добавлением в верхней части разреза геоэлектрических неоднородностей. На втором этапе выполнялась инверсия отдельно по МТ-параметрам и по данным ЭТ. На последнем этапе проводилась совместная инверсия электроразведочных данных. Инверсии на всех этапах выполнялись от стартовой модели полупространства с  $УЭС = 1000$  Ом·м. Для метода ЭТ качество подбора характеризуется невязкой между кривыми кажущегося сопротивления ( $\rho_k$ ). Для инверсии МТ-данных качество подбора определяется невязками между кривыми кажущегося сопротивления и фазы импеданса для ТМ-моды ( $\rho^H, \varphi^H$ ), ТЕ-моды ( $\rho^E, \varphi^E$ ) или для эффективных кривых ( $\rho^{eff}, \varphi^{eff}$ ). Невязки подбора приведены на соответствующих рисунках.

Глубина залегания рудных тел в расчетных моделях не превышала 600 м при мощности от 50 до 200 м. Вмещающая среда – однородное полупространство с сопротивлением 1000 Ом·м. Сопротивление рудных тел 100 Ом·м. Незначительный контраст между рудными объектами и вмещающими породами по сопротивлению отражает реальные незначительные понижения УЭС, характерные для пород с вкрапленным или прожилково-вкрапленным оруденением.

**Модель горизонтального проводящего тела.** Когда проводник мощностью 100 м и длиной 500 м находится в однородном полупространстве на глубинах 100-400 м, его границы и сопротивление хорошо восстанавливаются по данным как ЭТ, так и АМТЗ.

При добавлении в модель приповерхностного проводящего слоя мощностью 50 м с сопротивлением 50 Ом·м, имитирующего осадочные четвертичные отложения, чувствительность МТ-параметров к глубинным проводникам снижается. Аномалиеобразующие тела обнаруживаются по инверсии, но их форма и электрические свойства восстанавливаются неправильно, особенно горизонтальные размеры. В модели рис.1.1 горизонтальные проводящие тела размером  $500 \times 100$  м находятся на различных глубинах от поверхности (глубина верхней кромки изменяется от 150 до 250 м). В отличие от магнитотеллурической инверсии (рис.1.2), выполненной по шести компонентам (ТМ-, ТЕ-мода и типпер) и по инверсии ЭТ (рис.1.3), по результатам совместной инверсии более точно восстанавливаются границы всех тел, особенно в случае их неглубокого залегания (рис.1.4). Ухудшение результата при погружении объектов связано с ограничением глубинности используемой установки электротомографии.

Горизонтальный проводящий пласт является базовой моделью для рудных месторождений такого типа, как магматические ликвационные месторождения. Сульфидные медно-никелевые руды в месторождениях данного типа формируются в придонной части дифференцированных интрузий. Руды представлены как сплошными сульфидными телами, так и прожилково-вкрапленной минерализацией. В общей сложности мощность минерализованных зон может достигать нескольких десятков метров. Удельные электрические сопротивления сплошных руд составляют несколько ом-метров, а областей вкрапленного оруденения – десятки ом-метров.



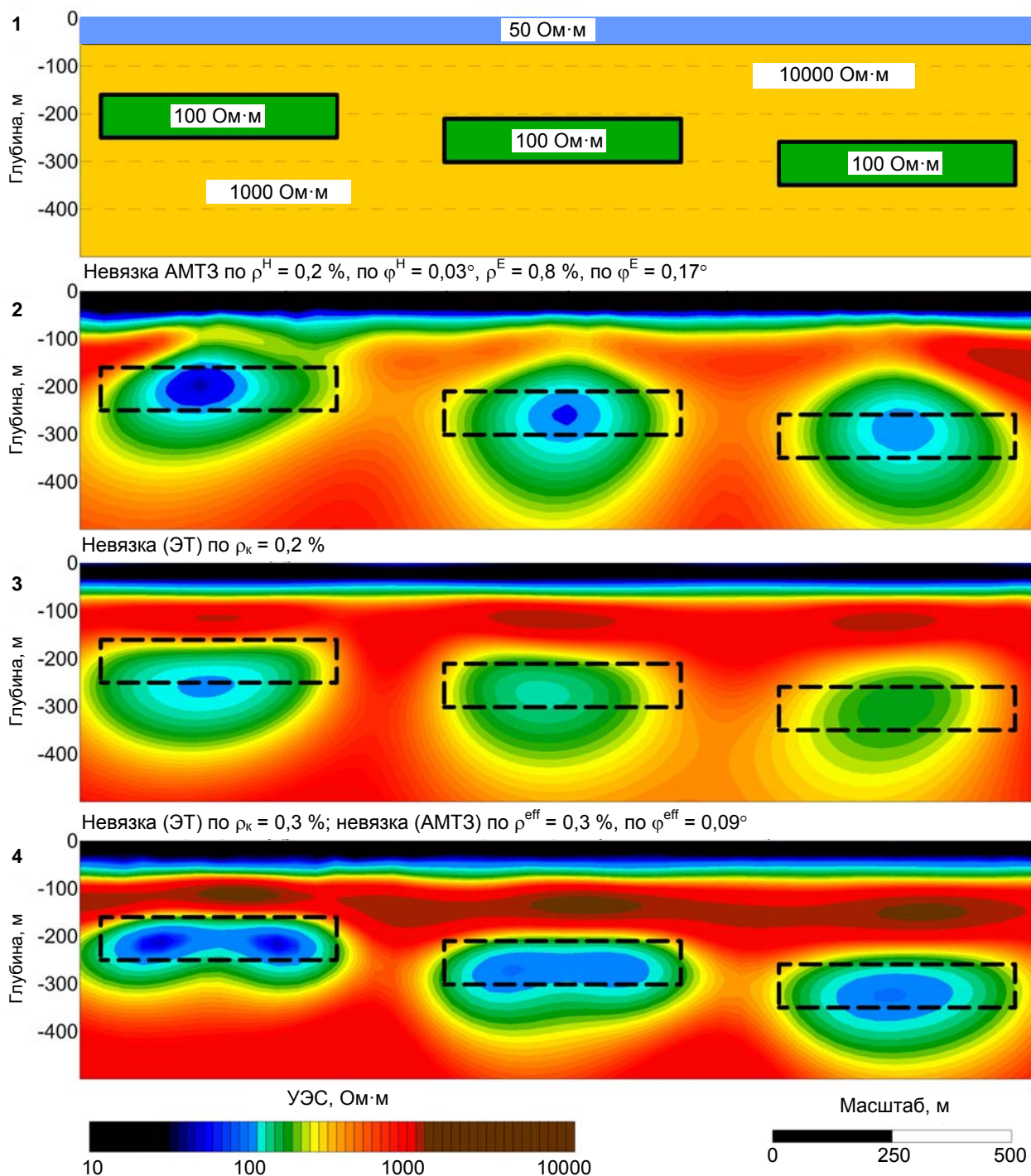


Рис.1. Синтетическая модель 1 горизонтального проводящего слоя

1 – исходная модель; 2 – результат инверсии данных АМТЗ (бимодального импеданса и типпера); 3 – результат инверсии данных ЭТ; 4 – результат совместной инверсии данных ЭТ и АМТЗ

Модель рис.2.1 имитирует подобное месторождение. Рудоносная интрузия располагается на глубине 50 м и имеет форму трапеции. Максимальная мощность интрузии 150 м, ширина 1 км. Удельные электрические сопротивления вмещающих пород – 1000 Ом·м, УЭС пород интрузии выше, чем у вмещающих пород, и составляет 5000 Ом·м. В основании интрузии находится горизонтальный проводящий пласт мощностью 30 м и длиной 700 м – горизонт сульфидного оруденения. Интрузия перекрыта с поверхности проводящим слоем мощностью 50 м и сопротивлением 70 Ом·м. Верхний проводник имитирует проводящие четвертичные отложения.

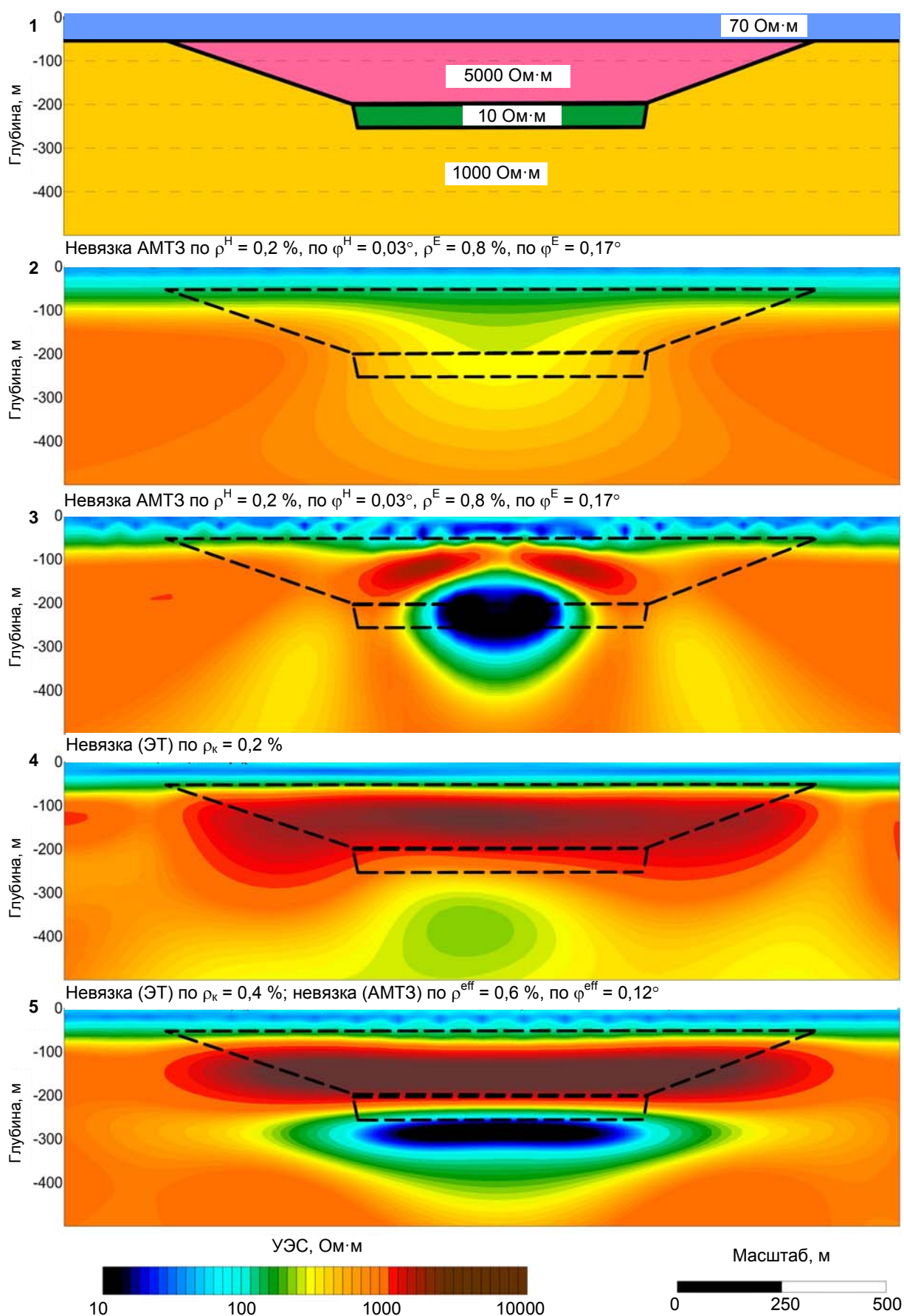


Рис.2. Синтетическая модель 2 высокоомной интрузии с проводником в основании

1 – исходная модель; 2 – результат инверсии данных АМТЗ (бимодальная инверсия); 3 – результат инверсии данных АМТЗ (бимодального импеданса и типпера); 4 – результат инверсии данных ЭТ; 5 – результат совместной инверсии данных ЭТ и АМТЗ

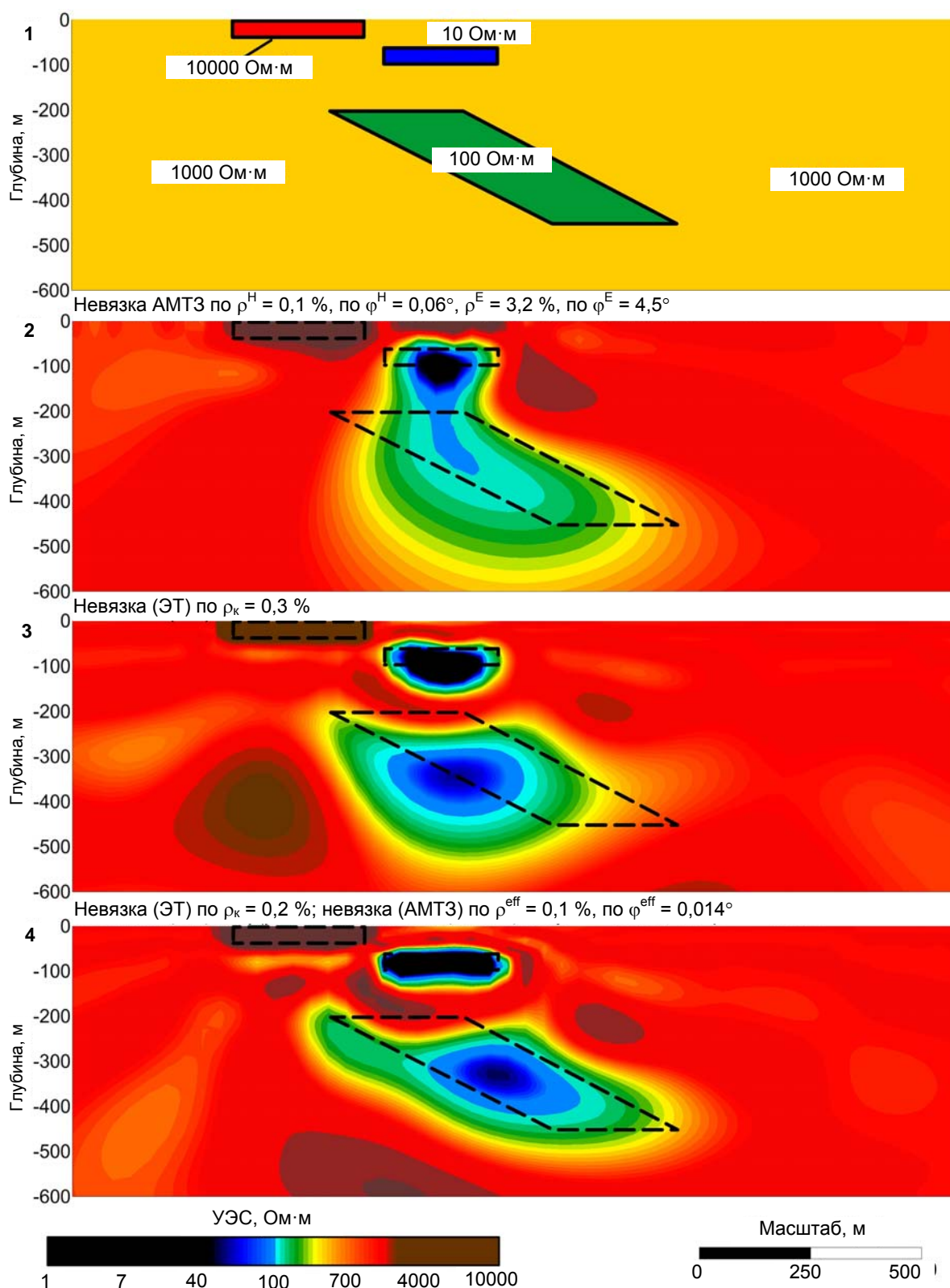


Рис.3. Синтетическая модель 3 наклонного проводника с приповерхностными неоднородностями

1 – исходная модель; 2 – результат инверсии данных АМТЗ (бимодальная инверсия); 3 – результат инверсии данных ЭТ;  
4 – результат совместной инверсии данных ЭТ и АМТЗ

По результатам бимодальной инверсии магнитотеллурического импеданса мы получаем в центре модели область, характеризующуюся незначительным понижением УЭС, которую можно ложно проинтерпретировать, как увеличение мощности верхнего проводника (рис.2.2). Высокоомное тело интрузии по результатам инверсии ТМ-данных не проявляется на итоговой модели. Глубинный проводник лучше выявляется при проведении инверсии по бимодальному импедансу





и типперу, хотя границы его не соответствуют стартовой модели (рис.2.3). По инверсии данных ЭТ хорошо определяются границы высокоомной интрузии (рис.2.4), которая полностью экранирует глубинный проводник. Совместная инверсия данных ЭТ и АМТЗ дает результат, лучше всего согласующийся с исходной моделью: точно определяются границы высокоомной интрузии, но несколько завышенной получается глубина залегания проводника в ее основании и его мощность (рис.2.5).

**Модель наклонного проводящего тела.** Наклонное расположение зон повышенной проводимости характерно для многих рудных месторождений. Это могут быть скарновые тела, прилегающие к экзоконтактам гранитоидных интрузий, области сульфидного оруденения на медно-порфировых месторождениях и т.д.

Наклонные проводящие тела простой формы в однородном полупространстве хорошо определяются отдельными методами электрических и электромагнитных зондирований. При наличии в модели проводящего приповерхностного слоя или локальных приповерхностных неоднородностей (особенно низкого сопротивления) качество инверсии по МТ-параметрам снижается (рис.3.1). Приповерхностные локальные тела на итоговых моделях сливаются с глубинными объектами (рис.3.2), а по результатам электротомографии представляются в виде изометричных тел круглой формы (рис.3.3). В этих случаях совместная инверсия значительно улучшает итоговый результат (рис.3.4).

Модель 4 имеет черты, характерные для месторождений медно-порфирового типа с областью повышенных значений УЭС в центральной части за счет вторичного окварцевания пород и с узкими проводящими зонами, окаймляющими центральный штокверк и имитирующими области сульфидной минерализации (рис.4.1).

В общих чертах модель хорошо восстанавливается по результатам инверсии МТ-импеданса и типпера (рис.4.2). В центре выделяется область повышенных сопротивлений, связанная с высокоомным телом, проявляются боковые области пониженного сопротивления. Однако ширина этих областей намного превышает модельную и составляет несколько сотен метров вместо 50 м, а УЭС значительно превышает сопротивление проводящих пластов в стартовой модели.

По результатам инверсии данных ЭТ границы и сопротивление высокоомной зоны получаются близкими к исходной модели (рис.4.3). Границы проводящих слоев восстанавливаются плохо, сливаются с верхним горизонтом и с трудом читаются на результатах инверсии.

Совместная инверсия дает нам наиболее сбалансированную модель (рис.4.4), которая лучше всего отвечает исходной. Завышенными остаются сопротивления боковых проводников и не совсем точно определяются границы центрального высокоомного тела.

**Увеличение глубинности метода ВП на основе совместной инверсии АМТЗ и ЭТ.** Приведенные выше примеры касались определения одного физического параметра горных пород – удельного электрического сопротивления. Однако используя результат совместной инверсии геометрических и индукционных зондирований, можно повысить глубинность и чувствительность еще одного электроразведочного метода – метода вызванной поляризации (ВП), который дает нам дополнительный параметр среды – электрическую поляризуемость.

При работах методом ВП используются те же установки, что и в методе сопротивлений. Для изучения горизонтально-неоднородных сред используются стандартные методы и подходы электротомографии. Как уже было сказано, одним из недостатков метода ЭТ является ограничение глубинности, зависящее от максимального разноса установки. Увеличение размеров установки приводит к существенному увеличению затрат и стоимости работ.

Когда аномальная проводимость и поляризуемость горных пород имеет одну и ту же природу, для инверсии данных ВП в качестве стартовой используется модель УЭС. Этот подход вполне правомерен и при изучении рудных объектов, так как присутствие сульфидных минералов в горных породах приводит к понижению сопротивления и повышению поляризуемости. Совместная инверсия ЭТ и АМТЗ, по сравнению с одиночной инверсией данных электротомографии, позволяет построить модель УЭС до больших глубин. Используя эту модель в качестве стартовой при инверсии данных ВП, мы можем увеличить и глубину поляризационной модели.

Пример применения такого подхода на модельных данных продемонстрирован на модели рис.5. В однородном неполяризуемом полупространстве с сопротивлением 1000 Ом·м на глубине 400 м расположено проводящее и поляризующееся тело мощностью 100 м и шириной 500 м с сопротивлением 10 Ом·м и поляризуемостью 10 % (рис.5.1). В приповерхностной части добавлен 50-метровый слой высокого сопротивления – 5000 Ом·м.

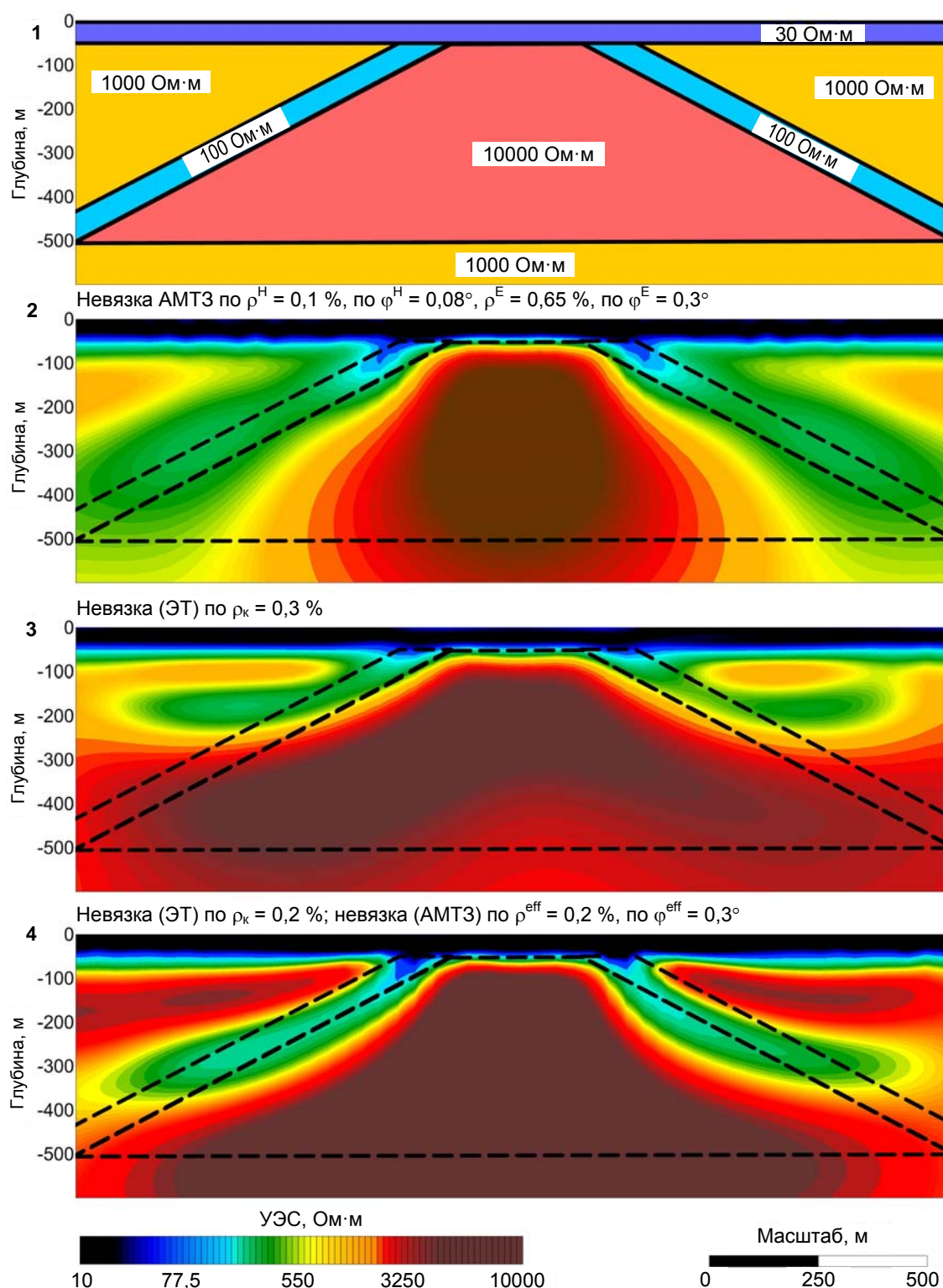


Рис.4. Синтетическая модель 4 медно-порфирового месторождения

1 – исходная модель; 2 – результат инверсии данных АМТЗ (бимодального импеданса и типпера); 3 – результат инверсии данных ЭТ; 4 – результат совместной инверсии данных ЭТ и АМТЗ

Большая глубина залегания проводника и наличие приповерхностного изолятора существенно снижают возможности электротомографии по определению его положения и электрических свойств. Область пониженных сопротивлений по результатам инверсии данных ЭТ дает только общее представление о положении центра и о глубине проводника (рис.5.2). На поляризационной модели наблюдаются небольшие отклонения от фоновых значений, укладывающиеся в реальную погрешность измерений (рис.5.3).



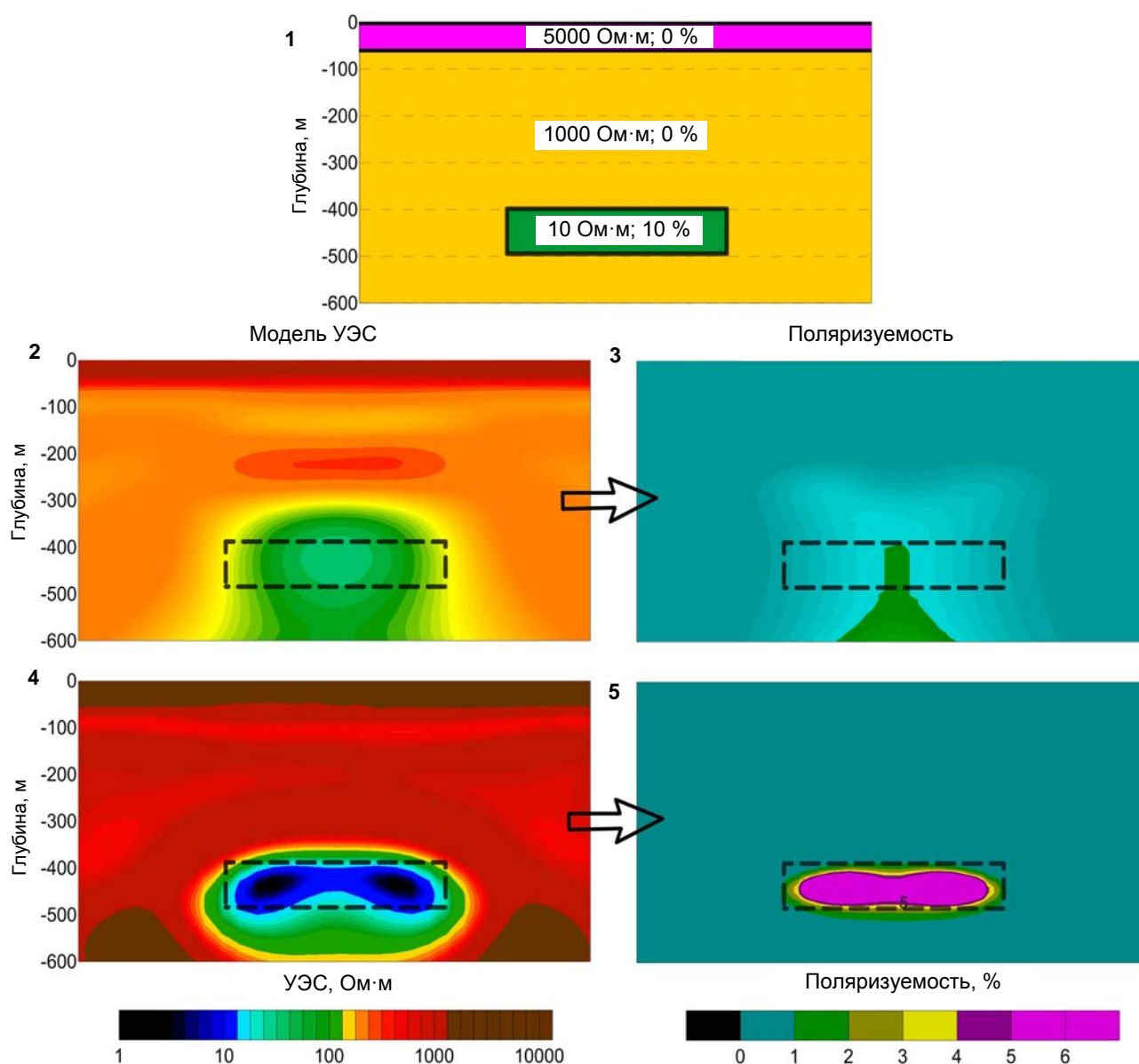


Рис.5. Синтетическая модель 5 горизонтального проводящего и поляризующегося слоя

1 – исходная модель; 2, 3 – результат инверсии данных ЭТ (2 – модель УЭС, 3 – модель поляризуемости); 4, 5 – результат совместной инверсии данных ЭТ и АМТЗ (4 – модель УЭС, 5 – модель поляризуемости)

Совместная инверсия ЭТ и АМТЗ дает возможность точно восстановить границы и сопротивление глубинного проводника, а на основе полученной модели УЭС (рис.5.4) и его поляризационные свойства (рис.5.5).

**Пример совместной инверсии ЭТ и АМТЗ на полевых данных.** Колчеданно-полиметаллическое месторождение Сигнальное расположено в Лениногорском рудном районе Рудно-Алтайской минерагенической зоны.

Месторождение локализовано в аллохтоне крупного взбросо-сдвига, по которому среднедевонские вулканогенно-осадочные отложения надвинуты на песчано-алевролитовую толщу терригенной формации. Простираение пород СЗ 300-320°, падение крутое, в целом моноклиальное, на юго-запад под углом 65-85°.

Рудная зона приурочена к разлому северо-западного простирания, сопровождающегося зоной повышенного расслаивания и гидротермально-метасоматического изменения пород, в пределах которой повсеместно развита интенсивная пиритизация и гнездово-прожилково-вкрапленная минерализация халькопирита, сфалерита и галенита. Ширина зоны интенсивно измененных пород составляет 200-250 м, протяженность – свыше 1 км. Зона повышенного расслаивания и умеренной серицитизации распространена гораздо шире и имеет размеры 350 × 1500 м.

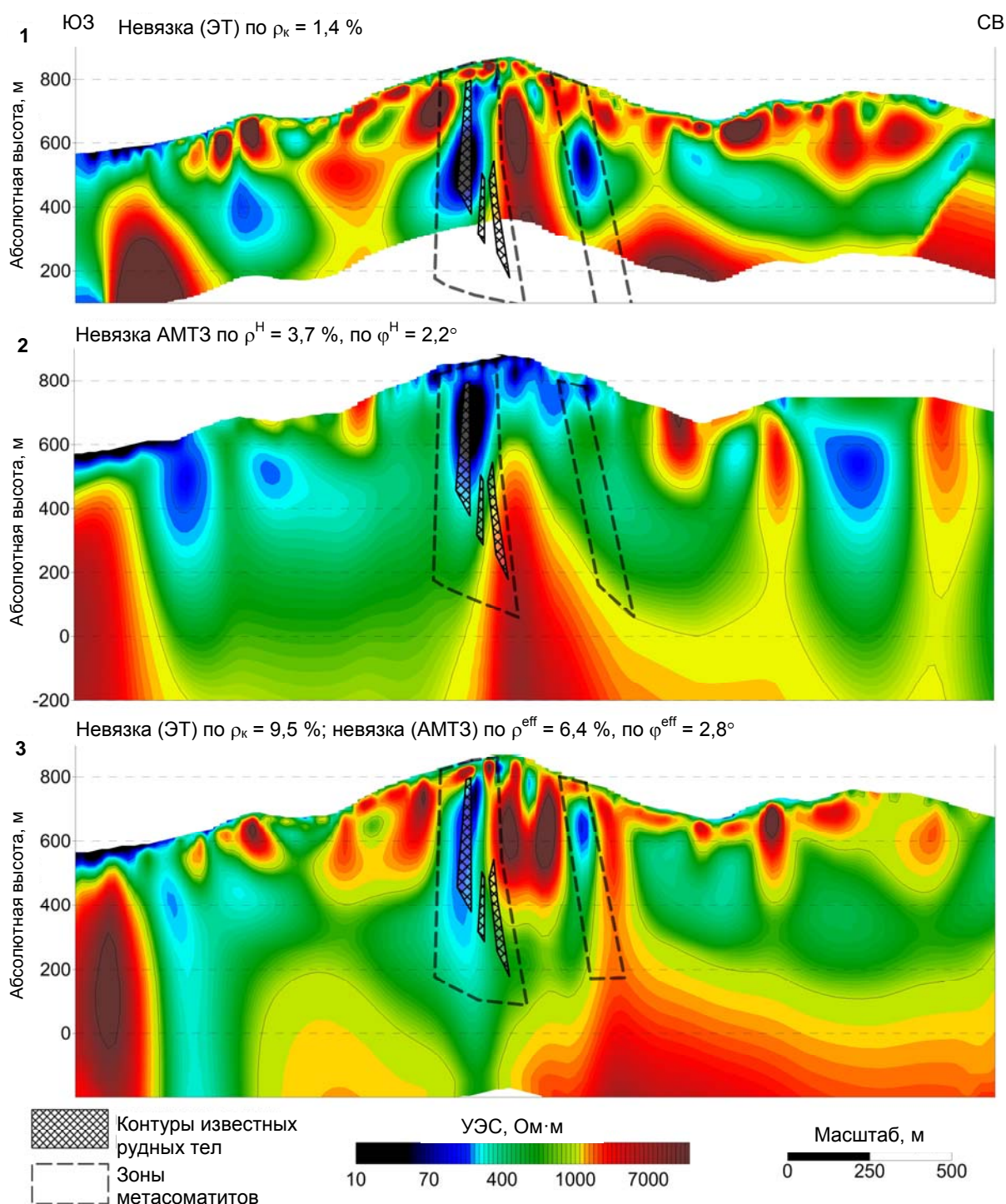


Рис.6. Месторождение Сигнальное

1 – результат инверсии данных ЭТ; 2 – результат инверсии данных АМТЗ (бимодальная инверсия); 3 – результат совместной инверсии данных ЭТ и АМТЗ

Комплексные электроразведочные работы методами ЭТ и АМТЗ были выполнены по профилю длиной 2500 м, вкрест пересекающему рудную зону.

При проведении работ методом ЭТ использовалась осевая установка «диполь – диполь». Параметры установки: питающая линия  $AB = 660$  м, разносы – от 15 до 1740 м, приемная линия  $MN = 10 \div 400$  м. Шаг по профилю в методе ЭТ составил 50 м. Аудиомагнитотеллурические зондирования проводились с аппаратурой «Phoenix Geophysics» в режиме пятикомпонентной съемки с базовой точкой через 100 м.

Глубинность установки ЭТ для данного геоэлектрического разреза составила около 500 м. На модели УЭС, полученной в результате инверсии данных ЭТ (рис.6.1), месторождение ярко



выделяется в центральной части профиля как субвертикальная область низких сопротивлений ( $< 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). Еще одна зона пониженных УЭС фиксируется в 300 м к северо-востоку от известных рудных тел и совпадает с зоной метасоматитов по данным бурения.

По результатам бимодальной инверсии данных АМТЗ с учетом типпера разрез УЭС в целом получается более проводящим (рис.6.2). Главное рудное тело однозначно выделяется на геоэлектрической модели, но его мощность несколько завышается.

Наиболее сбалансированная модель, полученная по результатам совместной инверсии данных АМТЗ и ЭТ, включает как высокоомные области, связанные с телами кварцитов и дайками габбро-диоритового состава, так и проводящие зоны, связанные с рудными телами месторождения и областями сульфидной минерализации (рис.6.3). Судя по результатам совместной инверсии, обе зоны гидротермально измененных пород сливаются на глубине около 600 м.

**Выводы.** Приведенные в работе результаты демонстрируют существенные преимущества, которые дает нам использование совместной инверсии геометрических зондирований на постоянном токе и электромагнитных индукционных зондирований Земли при решении рудных задач. Электротомография как метод постоянного тока имеет повышенную чувствительность к объектам высокого сопротивления и позволяет более корректно определять границы интрузий, областей окварцевания, даек и других высокоомных тел. Методика ЭТ направлена на изучение неоднородных геологических сред, к которым можно отнести большинство рудных провинций. Главный недостаток метода – ограничение глубинности исследований. Увеличение разносов приводит к появлению проблем разного рода. К ним можно отнести увеличение мощности источника тока и размеров приемных и питающих линий, переход на более низкие частоты и, как следствие, увеличение времени измерений для выполнения условий ближней зоны и другие.

Глубинность магнитотеллурических методов ограничена только временем записи на точке измерений. Для достижения глубинности в несколько сотен метров – первые километры, как правило, достаточно аудиомантотеллурического диапазона. Длительность записи в этом режиме не превышает 1 ч. МТ-параметры имеют повышенную чувствительность к проводящим объектам и не экранируются высокоомными горизонтами. В магнитотеллурических методах при инверсии можно использовать различные, независимые друг от друга параметры, которые дополняют друг друга и сужают область эквивалентных решений обратной задачи.

Когда аномальная проводимость и поляризуемость горных пород имеет одну и ту же природу, для инверсии данных вызванной поляризации используется в качестве стартовой модель УЭС. Этот подход вполне правомерен при изучении рудных объектов, так как присутствие сульфидных минералов в горных породах приводит к понижению сопротивления и повышению поляризуемости. Совместная инверсия ЭТ и АМТЗ, по сравнению с одиночной инверсией данных электротомографии, позволяет построить модель УЭС до больших глубин. Используя эту модель в качестве стартовой при инверсии данных ВП, мы можем увеличить и глубину поляризационной модели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Возможности методов магнитотеллурики в задачах рудной геофизики / Ив.М.Варенцов, В.А.Куликов, А.Г.Яковлев, Д.В.Яковлев // *Физика Земли*. 2013. № 3. С. 9-29.
2. Каминский А.Е. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и РМТ/АМТ / А.Е.Каминский, С.А.Ерохин, А.А.Шлыков // *Геофизика*. 2015. № 4. С. 32-39.
3. Комплексирование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на объектах ГМК «Норильский Никель» / Е.В.Андреева, А.А.Бобачев, Ив.М.Варенцов и др. // *Разведка и охрана недр*. 2006. № 8. С. 71-79.
4. Куликов В.А. Практическое применение магнитотеллурических методов в рудной геофизике / В.А.Куликов, А.Г.Яковлев // *Разведка и охрана недр*. 2011. № 3. С. 26-33.
5. Куликов В.А. Применение электротомографии при решении рудных задач до глубин 300-400 м / В.А.Куликов, А.А.Бобачев, А.Г.Яковлев // *Геофизика*. 2014. № 2. С. 39-46.
6. Электроразведка: Пособие по электроразведочной практике / Под ред. В.К.Хмелевского, И.Н.Модина, А.Г.Яковлева. ГЕРС Москва, 2005. 311 с.
7. Pedersen L.B. Routine 2D inversion of MT data using the determinant of the impedance tensor / L.B.Pedersen, M.Engels // *Geophysics*. 2005. Vol. 70(2). P. G33-G41.

**Авторы:** В.А.Куликов, д-р геол.-минерал. наук, доцент, vic@nw-geophysics.ru (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия), А.Е.Каминский, руководитель группы интерпретации, kaminae@yandex.ru (ООО «КГЭ "Астра"», Санкт-Петербург, Россия), А.Г.Яковлев, канд. физ.-мат. наук, доцент, mail@nw-geophysics.com (Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия).

Статья принята к публикации 22.11.2016.