

УДК 550.837

СОВМЕСТНАЯ ИНВЕРСИЯ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ И МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ РУДНЫХ ЗАДАЧ

© 2017 г. В.А. Куликов¹, А.Е. Каминский², А.Г. Яковлев¹

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

² *ООО “КГЭ АСТРА”, г. Санкт-Петербург, Россия*

Представлены результаты совместной инверсии данных электротомографии и магнитотеллурических зондирований для решения задач рудной геофизики. На синтетических моделях и с использованием реальных полевых данных показано преимущество совместной инверсии для изучения разреза до глубин 400–500 м.

Электротомография как метод постоянного тока отличается повышенной чувствительностью к объектам с высоким сопротивлением и позволяет благодаря этому более корректно определять границы интрузий, областей окварцевания, даек и других высокоомных тел, имея при этом серьезный недостаток – ограничение глубинности исследований.

В отличие от электротомографии глубинность магнитотеллурических методов ограничена только временем записи на точке измерений. Длительность записи в режиме аудиоманнитотеллурических зондирований (АМТЗ) не превышает 1 ч. Магнитотеллурические параметры более чувствительны к проводящим объектам и не экранируются высокоомными горизонтами. В магнитотеллурических методах при инверсии можно использовать различные, дополняющие друг друга независимые параметры, благодаря чему и сужается область эквивалентных решений обратной задачи.

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

Введение

Настоящая статья посвящена одной из наиболее актуальных задач рудной электроразведки – согласованию результатов электротомографии (геометрических зондирований на постоянном токе) и электромагнитных зондирований.

Для методов постоянного тока устойчиво определяемыми геоэлектрическими параметрами являются продольная проводимость проводящих слоев $S=h/\rho$ и поперечное сопротивление высокоомных $T=h\rho$. Физически такая ситуация обусловлена тем, что в низкоомных (проводящих) слоях ток стремится течь вдоль слоистости, а в высокоомных – поперек, чтобы быстрее пересечь препятствие. При объединении тонких слоев в один по результатам инверсии будет определяться среднее геометрическое сопротивление пласта $\rho_m = \sqrt{\rho_l \rho_n}$, где ρ_l – сопротивление вдоль напластования, а ρ_n – вкрест ему.

Для низкочастотных методов, использующих индукционную составляющую электромагнитного поля, надежно определяемыми параметрами являются суммарные продольные проводимости низкоомных слоев (S) и глубины до их верхних кромок (H). Это связано с тем, что переменные токи индуцируются в проводящих слоях и преодолевают высокоомные за счет электромагнитной индукции, а не протекая сквозь них. Основное влияние на результаты в низкочастотных методах оказывает продольное сопротивление пород ρ_l .

Таким образом, методы постоянного тока позволяют получать информацию о поперечном сопротивлении высокоомных слоев, но ненадежны при определении глубин. В то же время методы переменного тока позволяют устойчиво определять некоторые глубины, но не содержат информации о сопротивлении высокоомных слоев. Комплексирование двух разных типов зондирований позволяет решать более широкий круг геологических задач от прямого поиска рудных тел до выявления косвенных рудных признаков [Хмелевской, Модин, Яковлев, 2005].

Совместная инверсия данных электротомографии и магнитотеллурических зондирований в программе ZOND

Возможность совместной инверсии результатов геометрических и электромагнитных зондирований реализована в программе ZONDRES2D [<http://zond-geo.com>]. Функционал программы позволяет комбинировать различные компоненты магнитотеллурического поля с данными наземной электротомографии при подборе модели удельных электрических сопротивлений.

Основная проблема при совместной интерпретации данных электроразведки – несовпадение масштабов комплекслируемых методов. Это проявляется в различии эффективных объемов среды, захватываемых полем, и в разном влиянии электропроводности (в макроскопическом смысле) на компоненты электрического и электромагнитного полей. Также существенно усложнить двумерную интерпретацию полевых данных могут гальванические искажения и различное влияние трехмерных объектов на результаты измерений обоих методов.

Для борьбы с гальваническими эффектами в магнитотеллурическом методе используется методика подбора статических сдвигов совместно с сопротивлением при инверсии; за подавление эффектов трехмерности отвечает дополнительный весовой параметр, выбираемый в соответствии с заранее рассчитанным значением *skew*¹ [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. В самом простом варианте весовой параметр обратно пропорционален *skew*, что позволяет уменьшать значимость магнитотеллурических данных с большим показателем трехмерности. Технология введения “штрафов за трехмерность” с использованием параметров типа *skew* при двумерной инверсии 3D-искаженных данных уже неоднократно и успешно применялась на практике (см., например, [Варенцов и др., 2012, 2013; Varentsov, 2015b]).

Обратная задача решается итерационным методом наименьших квадратов Ньютона с регуляризацией. Каждое измерение при инверсии обладает как индивидуальным весом, получаемым в ходе обработки, так и общим весом, определяющим значимость этого типа данных (или компоненты) в общей невязке. Таким образом, появляется возможность усиливать влияние того или иного типа данных на результирующую модель.

Функционал невязки состоит из четырех основных частей: невязки данных электротомографии, невязки магнитотеллурических данных, гладкости модели, гальванического *S*-эффекта магнитотеллурических данных. На последнюю часть накладываются два жестких ограничения – минимизация суммы всех сдвигов и ограничение максимальной величины сдвига, которая выбирается на основании анализа графиков кажущегося сопротивления вдоль профиля.

Ниже приводится вариант функционала невязки совместной инверсии для эффективных импедансов:

¹ *skew* – локальный параметр асимметрии Свифта.

$$\psi(m) = \left\| W_{skew} \cdot W_{\rho_{MT}} \cdot (\rho_{MT} - \rho_{MT}(m) - Sh_{st}) \right\|^2 + \left\| W_{skew} \cdot W_{\varphi_{MT}} \cdot (\varphi_{MT} - \varphi_{MT}(m)) \right\|^2 + \left\| W_{\rho_{ERT}} \cdot (\rho_{ERT} - \rho_{ERT}(m)) \right\|^2 + \lambda \left\| W_m \cdot m \right\|^2,$$

где W_{skew} – веса измерений, рассчитанные в соответствии с параметром $skew$; $W_{\rho_{MT}}$ – веса измерений эффективных кажущихся сопротивлений по данным магнитотеллурических зондирований (МТЗ); ρ_{MT} и $\rho_{MT}(m)$ – логарифмы наблюдаемых и рассчитанных значений эффективных кажущихся сопротивлений МТЗ; Sh_{st} – подбираемое в ходе инверсии значение гальванического S-эффекта каждой станции; $W_{\varphi_{MT}}$ – веса измерений фаз эффективного импеданса МТЗ; φ_{MT} и $\varphi_{MT}(m)$ – наблюдаемые и рассчитанные значения фазы эффективного импеданса МТЗ; $W_{\rho_{ERT}}$ – веса измерений эффективных кажущихся сопротивлений по данным электротомографии (ЭТ); ρ_{ERT} и $\rho_{ERT}(m)$ – логарифмы наблюдаемых и рассчитанных значений кажущихся сопротивлений ЭТ; λ – параметр регуляризации; W_m – оператор, обеспечивающий гладкость модели при инверсии; m – вектор логарифмов удельных сопротивлений разреза; m_0 – вектор логарифмов удельных сопротивлений опорной модели, который в простейшем случае представляет модель предыдущей итерации. Общие веса компонент инверсии обычно выбираются опытным путем на основании двух–трех пробных инверсий.

Вследствие различия метрик разных компонент данных выбор значения параметра регуляризации λ может играть ключевую роль для сходимости решения. В алгоритме используется линейный поиск оптимального значения λ в широком диапазоне на каждой итерации.

При совместной инверсии данных могут быть использованы как эффективные импедансы, так и TM/TE моды. Положительным результатом считается модель, которая не противоречит обоим методам, т.е. модель, дающая минимальные невязки для МТЗ и электротомографии. Целесообразность использования эффективного импеданса при двумерной магнитотеллурической инверсии 3D-искаженных данных не нова, она неоднократно рассматривалась в отечественных и зарубежных работах [Pedersen, Engels, 2005], в том числе и в приложении к решению рудных задач [Андреева и др., 2006; Варенцов и др., 2013]. Возможности совместной инверсии в программе ZONDRES2D ранее рассматривались при решении задач инженерной геофизики [Каминский, Ерохин, Шлыков, 2015]. В настоящей работе оцениваются возможности новой инверсии при решении рудных задач, в которых глубины исследования составляют сотни метров и используются нестандартные установки электротомографии.

Тестирование совместной инверсии на синтетических моделях

Тестирование совместной инверсии было выполнено на ряде синтетических моделей, имитирующих рудные тела разного размера и конфигурации. Данный подход применяется многими исследователями для оценки чувствительности и разрешающей способности электроразведочных методов при решении рудных задач. В частности, в работах Ив.М. Варенцова неоднократно рассматривалась возможность инверсии различных ансамблей магнитотеллурических данных для серий аномально проводящих тел [Варенцов, 2002, 2006; Варенцов и др., 2013; Varentsov, 2015a].

Авторами отобраны наиболее интересные результаты тестирования, позволяющие понять, в каких случаях совместная инверсия данных МТЗ и электротомографии может привести к повышению разрешающей способности электроразведочных методов при решении сложных задач изучения рудных тел.

Для электротомографии применялась несимметричная осевая установка “поль–диполь” + “диполь–диполь” с большой длиной питающей линии AB [Куликов, Бобачев, Яковлев, 2014]. Такая установка часто используется при проведении электротомографических измерений на большие глубины (300–500 м). Длина питающей линии AB составляла 520 м; длина приемных увеличивалась от 20 м на малых разносах до 200 м на больших. Разносы AO изменялись от 50 до 1200 м. Шаг по профилю составлял 40 м. Такая установка позволяет исследовать как малые, так и большие глубины при одной длине питающего диполя. На малых разносах установка соответствует трехэлектродной установке Шлюмберже, поскольку влияние дальнего питающего электрода незначительно. На больших разносах получается обычная дипольная осевая установка; на средних – несимметричная четырехэлектродная. Разносы, длина приемных линий MN и расстояние между точками зондирования подобраны таким образом, чтобы при перемещении установки по профилю электроды приемной линии могли использоваться многократно на разных разносах.

Расчет магнитотеллурических параметров при решении прямой задачи проводился на 20 частотах в диапазоне от 1 до 10000 Гц, который является стандартным рабочим диапазоном [Куликов, Яковлев, 2011] в режиме АМТЗ.

На первом этапе проводился расчет прямых двумерных задач с использованием программ *ZONDMT2D* и *ZONDRES2D*; на следующем выполнялась отдельная инверсия по магнитотеллурическим параметрам и по данным электротомографии. На последнем этапе осуществлялась совместная инверсия данных двух электроразведочных методов.

Глубина залегания изучаемых объектов не превышала 500–600 м. Рассматривались объекты простой формы – вертикальные, горизонтальные и наклонные прямоугольные проводящие тела мощностью от 50 до 200 м. Некоторые модели усложнялись добавлением в верхней части разреза геоэлектрических неоднородностей разных размеров, формы и удельного электрического сопротивления (ρ).

В качестве вмещающей среды принималось однородное полупространство с $\rho=1000$ Ом·м; для рудных тел практически во всех моделях $\rho=100$ Ом·м. Незначительный контраст между объектом поиска и вмещающими породами был выбран специально. С одной стороны, такое соотношение отражает реальное незначительное понижение ρ , характерное для пород с вкрапленным или прожилково-вкрапленным оруденением. С другой стороны, перед исследованиями стояла задача определения возможностей совместной инверсии на сложных слабоконтрастных моделях.

На последнем этапе совместная инверсия тестировалась на более сложных моделях, имитирующих реальные разнотипные рудные месторождения с разным залеганием объектов – объекты, выходящие на поверхность, погруженные, перекрытые осадками разного сопротивления.

Модель горизонтального проводящего тела

В случае, когда горизонтально расположенный проводник мощностью 100 м и длиной 500 м находится в однородном полупространстве на глубинах 100–400 м (рис. 1, а), его границы и удельное электрическое сопротивление хорошо восстанавливаются при отдельной инверсии данных каждого из рассматриваемых методов. Совместная инверсия их данных (рис. 1, в) существенно улучшает определение границ проводника при добавлении в модель локальных приповерхностных неоднородностей с разными электрическими свойствами.

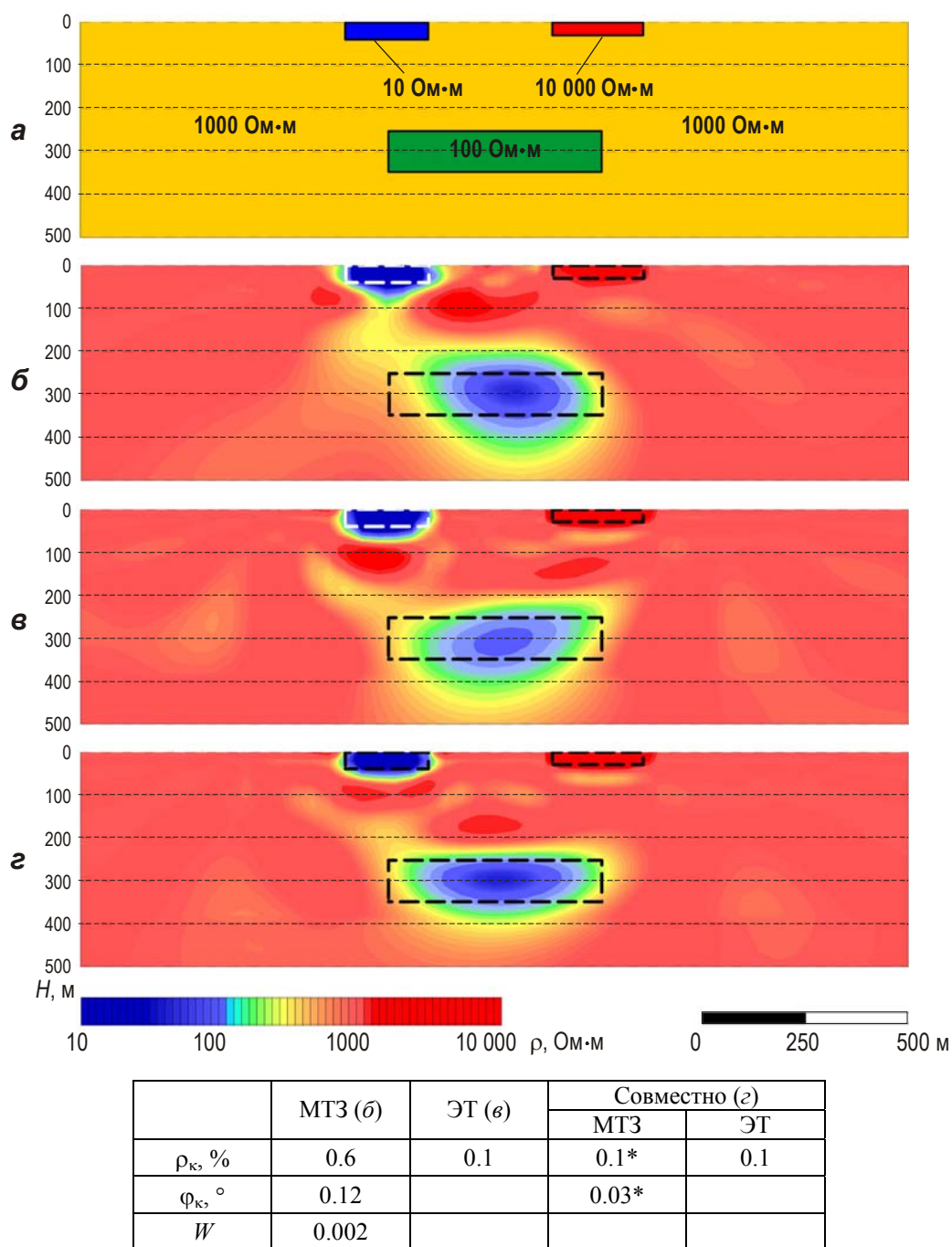


Рис. 1. Исходная модель № 1 (а) и модели, полученные по результатам двумерной автоматической инверсии данных МТЗ (б, совместная инверсия бимодального импеданса и типпера), электротомографии (в) и данных двух методов совместно (г). Под рис. 1–8 приведены цветовая шкала ρ , Ом·м, графические масштаб и таблица невязок для анализируемых параметров; в таблице звездочкой отмечены значения эффективных параметров ρ_{eff} и φ_{eff}

При добавлении в модель приповерхностного проводящего слоя мощностью 50 м с $\rho=50$ Ом·м, который имитирует осадочные четвертичные отложения, чувствительность магнитотеллурических параметров к глубинным проводникам снижается. Инверсия обнаруживает аномалиеобразующие тела, но их форма восстанавливается некорректно (особенно горизонтальные размеры).

В модели № 2 (рис. 2, а) горизонтальные проводящие тела размером 500×100 м находятся на разных глубинах (положение верхней кромки от 150 до 250 м). В отличие от инверсии данных МТЗ (рис. 2, б), выполненной по шести компонентам (ТМ/ТЕ мода и типпер), совместная инверсия (рис. 2, в) более точно восстанавливает границы всех тел, особенно в случае их неглубокого залегания. Ухудшение результата при погружении объектов связано с ограниченной глубиной используемой установки электро-томографии.

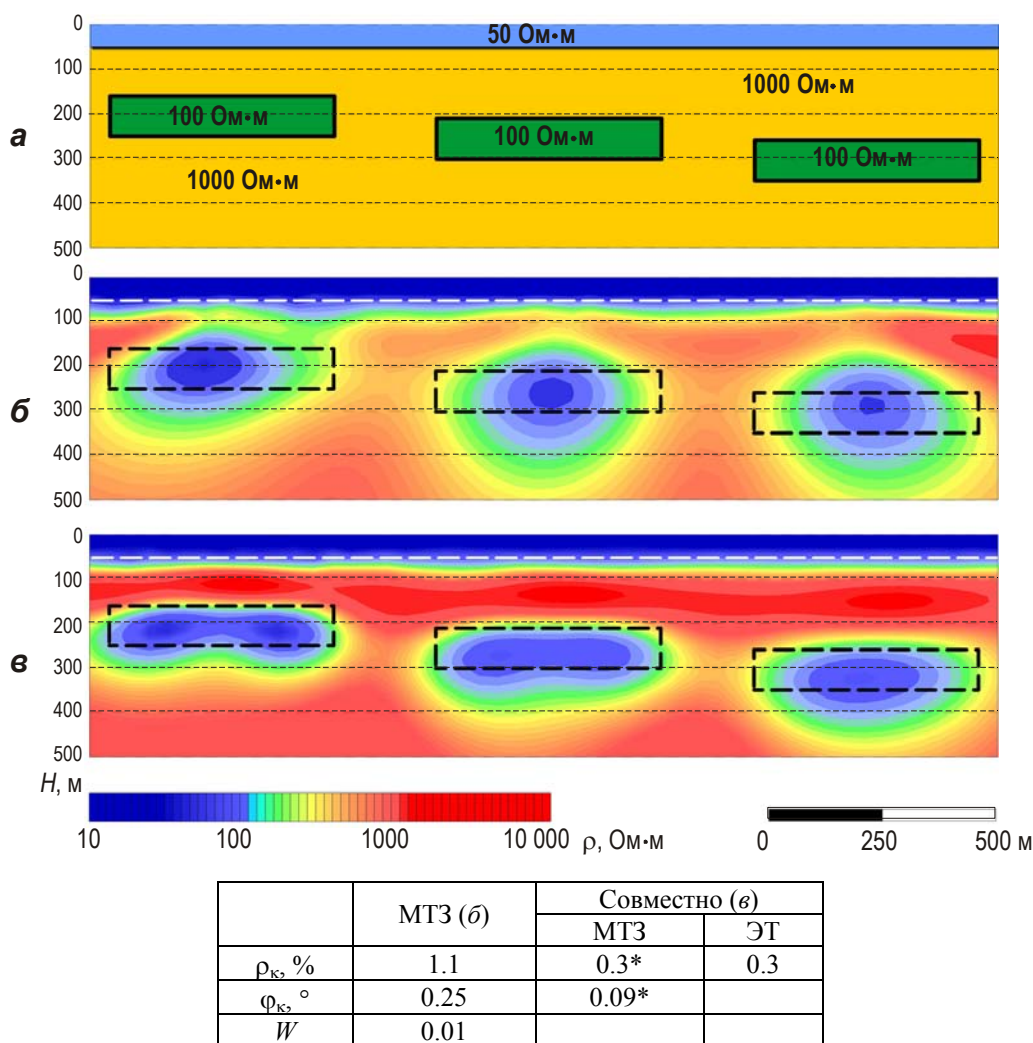
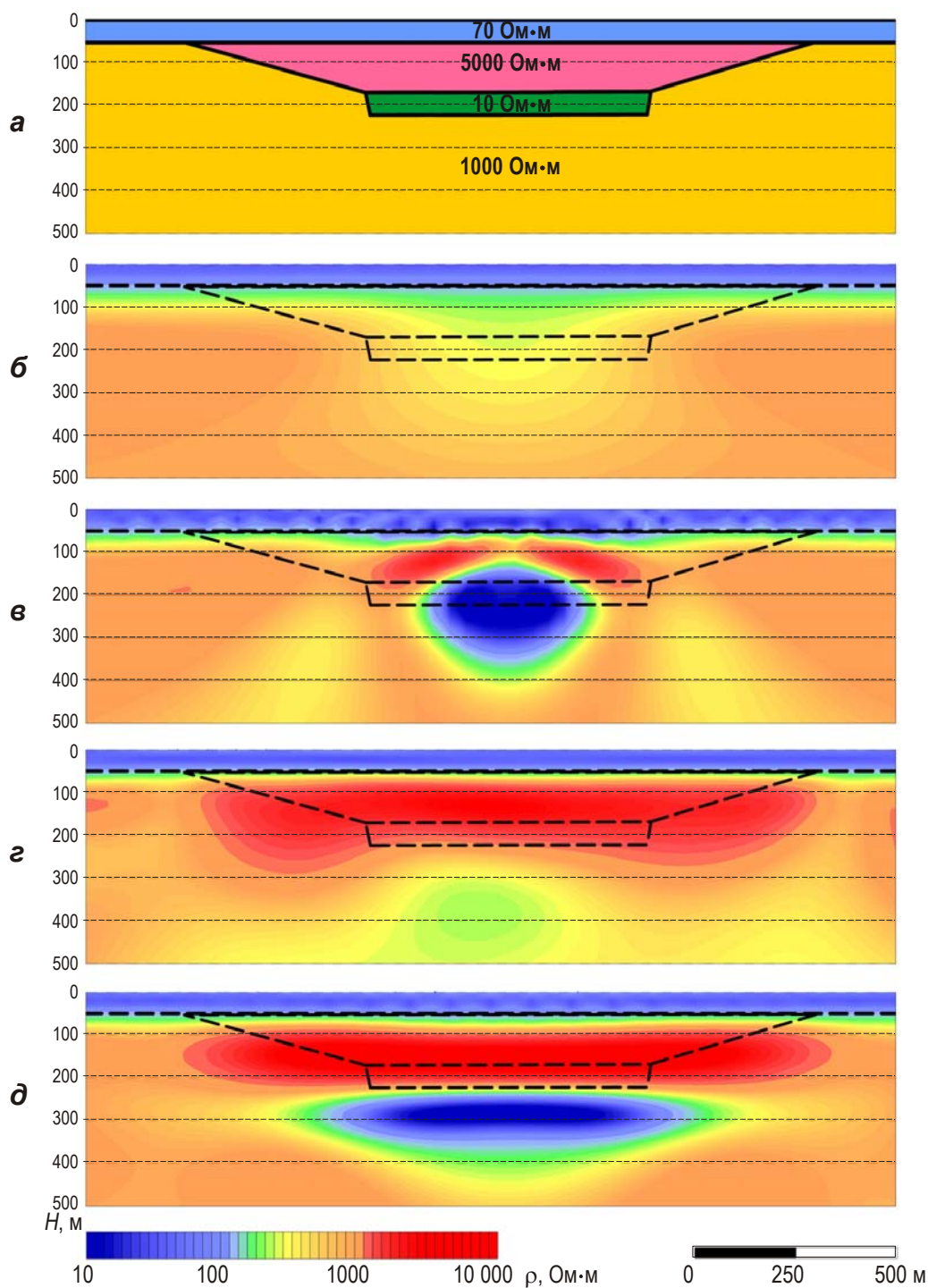


Рис. 2. Исходная модель № 2 (а) и модели, полученные по результатам двумерной автоматической инверсии данных МТЗ (б – бимодальный импеданс и типпер) и двух методов совместно (в)

Горизонтальный проводящий пласт является базовой моделью для рудных месторождений типа магматических ликвационных. Сульфидные медно-никелевые руды в месторождениях этого типа формируются в придонной части основных–ультраосновных интрузий и представлены как сплошными телами, так и прожилково-вкрапленной минерализацией. Суммарная мощность минерализованных зон может достигать нескольких десятков метров. Удельное электрическое сопротивление сплошных руд составляет первые Ом·м, областей вкрапленного оруденения – десятки Ом·м.

Месторождение подобного типа имитирует модель № 3 (рис. 3, а).



	MTЗ (<i>б</i>)	MTЗ (<i>в</i>)	ЭТ (<i>з</i>)	Совместно (<i>д</i>)	
				MTЗ	ЭТ
$\rho_k, \%$	10.3	4.5	0.2	0.6*	0.4
$\varphi_k, ^\circ$	1.9	1.01		0.12*	
W		0.05			

Рис. 3. Исходная модель № 3 (*а*) и модели, полученные по результатам двумерной автоматической инверсии данных МТЗ (*б* – бимодальная инверсия; *в* – бимодальный импеданс и типпер), электротомографии (*з*) и двух методов совместно (*д*)

Имеющая форму лополита рудоносная интрузия мощностью 150 м и шириной 1 км располагается на глубине 50 м. Удельное сопротивление пород интрузии составляет 5000 Ом·м, вмещающих пород – 1000 Ом·м. В основании интрузии находится горизонт сульфидного оруденения – горизонтальный проводящий пласт мощностью 30 м, длиной 700 м и $\rho=10$ Ом·м. Интрузия перекрыта с поверхности проводящим слоем мощностью 50 м с $\rho=70$ Ом·м, который имитирует осадочные четвертичные отложения.

По результатам бимодальной инверсии данных МТЗ в пределах высокоомного блока обнаруживается область, в которой прослеживается незначительное понижение значения ρ и которую можно интерпретировать как увеличение мощности верхнего проводящего слоя (рис. 3, б). По результатам инверсии только данных МТЗ высокоомное тело интрузии на итоговой модели не обнаруживается. Проводник лучше проявляется при проведении инверсии по бимодальному импедансу и типперу (рис. 3, в), хотя и в этом случае его границы не вполне соответствуют стартовой модели.

По результатам инверсии только данных электротомографии хорошо определяются границы высокоомной интрузии (рис. 3, г). Проводник в основании практически полностью экранируется высокоомными породами. Совместная инверсия данных двух методов дает результат, лучше всего согласующийся с исходной моделью. При этом точно определяются границы высокоомной интрузии, но несколько завышенной оказывается глубина залегания проводника в основании интрузии и его мощность (рис. 3, д).

Модель наклонного тела

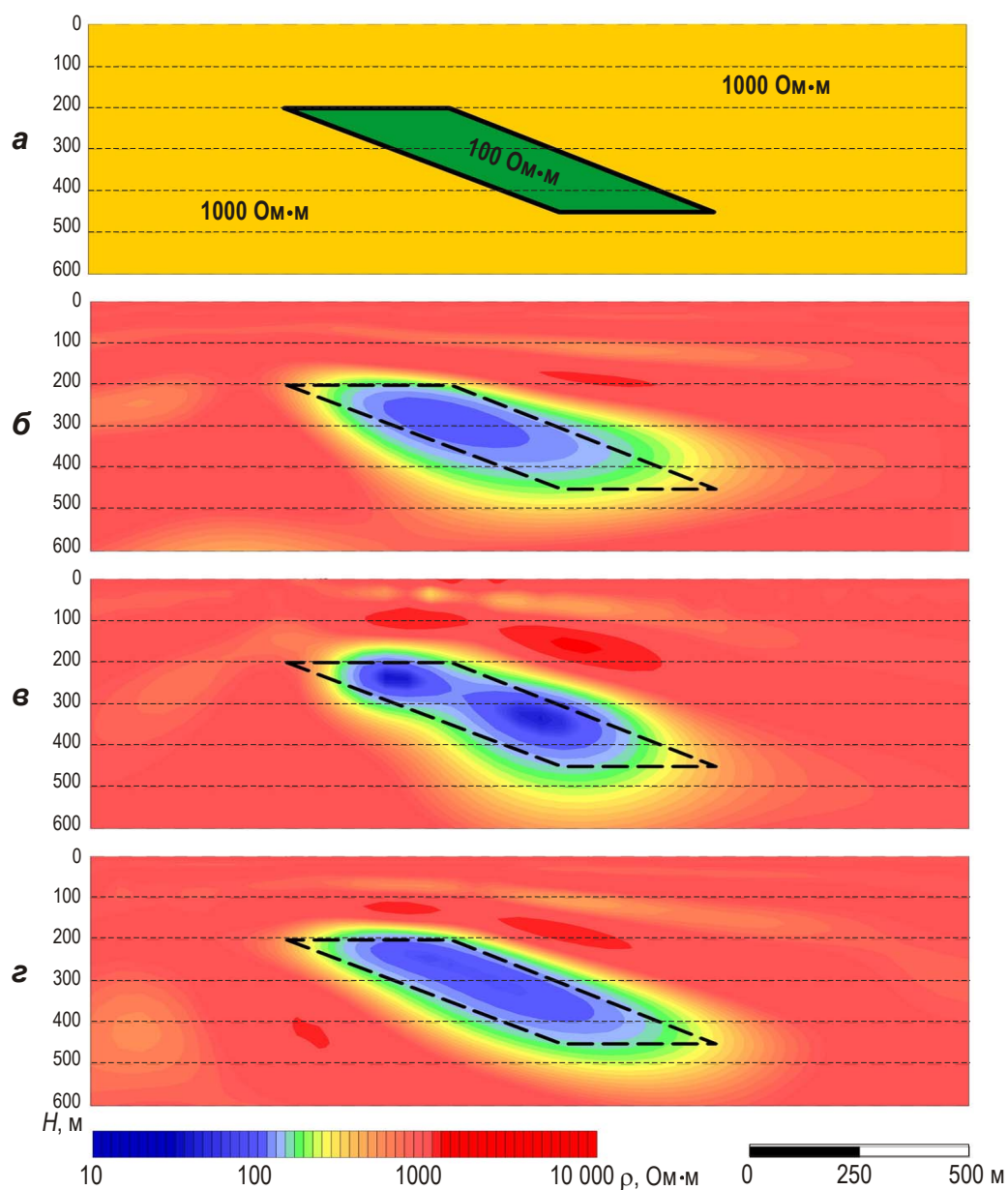
Наклонное положение зон повышенной проводимости характерно для многих рудных месторождений. Это могут быть скарновые тела, примыкающие к экзоконтактам гранитоидных интрузий, области сульфидного оруденения на меднопорфировых месторождениях и т.п. Простые наклонные тела в однородном полупространстве хорошо определяются отдельными методами электрических и электромагнитных зондирований. В качестве примера на рис. 4 приведены результаты инверсии для модели № 5 (рис. 4, а).

Самый близкий к исходной модели результат получен при совместной инверсии данных электротомографии и МТЗ (рис. 4, г). Однако расхождения между исходной моделью и результатами раздельной инверсии данных двух методов (рис. 4, б, в) незначительны.

В присутствии проводящего приповерхностного слоя или локальных приповерхностных неоднородностей (в первую очередь, имеющих низкое сопротивление) точность инверсии по магнитотеллурическим параметрам снижается. Приповерхностные локальные тела на итоговых моделях сливаются с глубинными объектами. В этих случаях совместная инверсия значительно улучшает итоговый результат.

Модель № 7 (рис. 5, а) имеет черты, характерные для месторождений меднопорфирового типа, – наличие в центральной части области повышенных значений удельного электрического сопротивления, связанной с вторичным окварцеванием пород, и узких проводящих зон, которые окаймляют центральный штокверк, имитируя области сульфидной минерализации.

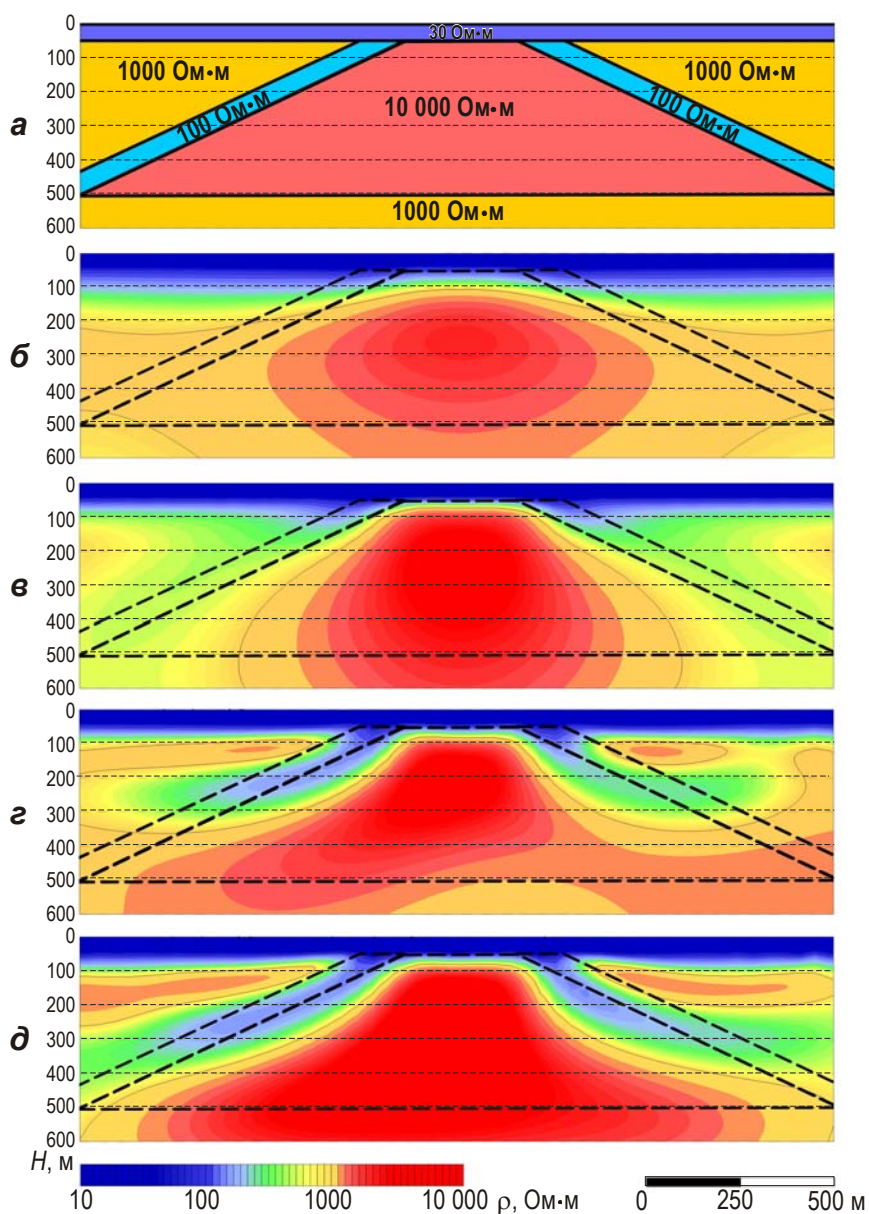
Если искомым объектом перекрыт небольшим по мощности слоем относительно проводящих пород (рис. 5, а), то преимущество совместной инверсии становится очевидным (рис. 5, д).



	МТЗ (б)	МТЗ (в)	ЭТ (г)	Совместно (д)	
				МТЗ	ЭТ
$\rho_{кз}$, %	10.3	4.5	0.2	0.6*	0.4
$\varphi_{кз}$, °	1.9	1.01		0.12*	
W		0.05			

Рис. 4. Исходная модель № 5 (а) и модели, полученные по результатам двумерной автоматической инверсии данных МТЗ (б – бимодальный импеданс и типпер), электротомографии (в) и двух методов совместно (г)

По результатам двумерной бимодальной инверсии МТ-импеданса проявляется небольшая область повышенных сопротивлений, связанная с высокоомным телом (рис. 5, б). Границы этой области намного меньше реальных размеров тела.



	МТЗ (б)	МТЗ (в)	ЭТ(г)	Совместно (д)	
				МТЗ	ЭТ
$\rho_k, \%$	10.3	4.5	0.2	0.6*	0.4
$\varphi_k, ^\circ$	1.9	1.01		0.12*	
W		0.05			

Рис. 5. Исходная модель № 7 (а) и модели, полученные по результатам двумерной автоматической инверсии данных МТЗ (б – бимодальная инверсия, в – бимодальный импеданс и типпер), электротомографии (г) и двух методов совместно (д)

При добавлении к тензору импеданса данных типпера результат инверсии несколько улучшается: увеличивается размер высокоомного блока и по бокам от него появляются области пониженного сопротивления (рис. 5, в). Однако ширина этих областей намного превышает модельную и составляет несколько сотен метров вместо 50 м, а ρ , равное 700 Ом·м, значительно превышает сопротивление проводящих пластов.

По результатам инверсии данных электротомографии (рис. 5, *з*) границы и сопротивление высокоомной зоны близки к исходной модели. Боковые проводники сливаются с верхним горизонтом и с трудом читаются на результатах инверсии. Совместная инверсия дает наиболее сбалансированную модель (рис. 5, *д*), которая лучше всего отвечает исходной. Завышенными остаются сопротивления боковых проводников и не совсем точно определяются границы центрального высокоомного тела.

Модель узкого вертикального проводящего тела

Завершая описание выполненного моделирования, рассмотрим самый простой случай, когда вертикальный проводник размером 150×400 м находится в полупространстве на глубине 120 м (модель № 4, рис. 6, *а*).

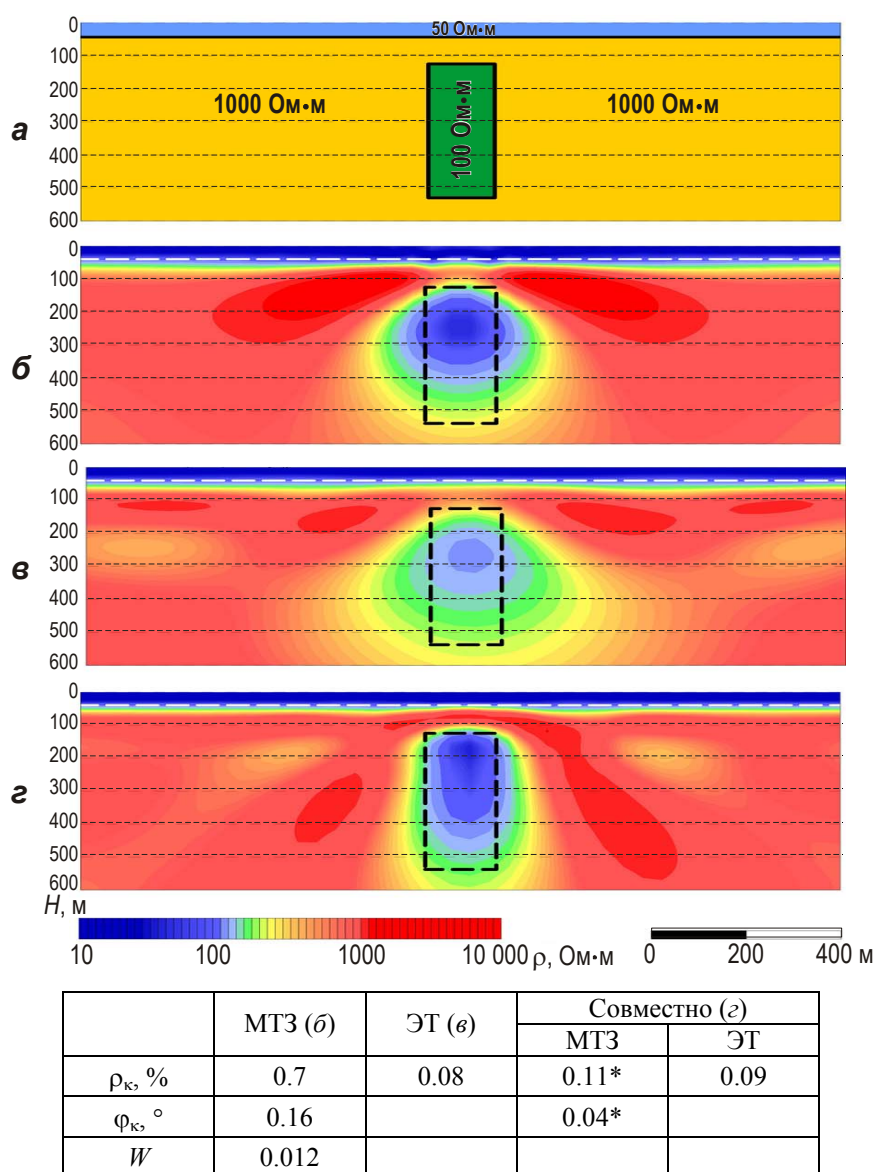


Рис. 6. Исходная модель № 4 (*а*) и модели, полученные по результатам двумерной инверсии данных МТЗ (*б* – бимодальный импеданс и типпер), электротомографии (*в*) и совместной инверсии двух методов (*г*)

Преимущество использования совместной инверсии становится особенно заметным, когда объект перекрыт приповерхностным проводником. По результатам инверсии данных МТЗ (даже с привлечением типпера) нижняя и боковые границы тела восстанавливаются некорректно (рис. 6, б). Инверсия данных только электротомографии приводит к завышенным значениям ρ для проводника, неправильно определяя при этом положение его нижней кромки (рис. 6, в), что связано с ограниченной глубиной метода. Границы вертикального проводника лучшего всего восстанавливаются при совместной инверсии (рис. 6, г).

Модель вертикального проводящего тела может рассматриваться как базовая для кимберлитовых тел. В большинстве случаев трубки взрыва имеют пониженное сопротивление относительно вмещающих пород, чему содействует повышенная трещиноватость и обводненность интрузии, а также наличие проводящих акцессорных минералов.

Совместная инверсия полевых данных

Рассмотрим результаты совместной инверсии данных глубинной электротомографии и АМТЗ на двух медно-порфировых месторождениях – Ак-Суг в Республике Тува и Бенкала в Республике Казахстан.

Месторождение Ак-Суг расположено на южных склонах Восточного Саяна. Комплексные геофизические работы проводились для определения границ зон оруденения на больших глубинах и выявления скрытых рудных тел.

Структура месторождения определяется строением вмещающего оруденение Ак-Сугского интрузивного массива. Рудное поле ограничивается, в основном, площадью распространения рудовмещающего гранитоидного массива и частично прилегающими к нему геологическими образованиями. Ак-Сугская интрузия имеет куполовидную асимметричную форму с крутым ($70-80^\circ$) падением контактов. В составе массива выделяются три основные группы пород, которые соответствуют фазам его формирования, – габбро и диориты; порфировидные тоналиты и плагиограниты; порфиры.

Гидротермально-метасоматические изменения Ак-Сугского массива имеют определённую зональность: внешняя зона изменённых пород представлена пропилитами, промежуточная образована кварц-серицитовыми метасоматитами и аргиллизитами, а внутренняя сложена существенно кварцевыми метасоматитами. Внутри кварц-серицитовой зоны выделяется “кварцевое ядро”, имеющее в плане полуовальную форму, а в разрезе – столбообразную. Контакты “кварцевого ядра” крутые с углами более 80° . Породы “ядра” отличаются интенсивным прокварцеванием. Рудная минерализация – как прожилковая, так и вкрапленная – тяготеет к серицит-кварцевым прожилкам, приуроченным к субвертикальным трещинам. Свыше 95 % объема рудной массы локализуется в порфирах, порфировидных плагиогранитах и тоналитах, преобразованных в кварц-серицитовые метасоматиты [Забелин, 1992].

По профилю, пересекающему месторождение с северо-запада на юго-восток, были выполнены комплексные измерения методами электротомографии и АМТЗ. При проведении электротомографии использовалась осевая установка “диполь–диполь”; длина питающей линии АВ составляла 200 м, разносы – от 25 до 1000 м, шаг по профилю – 100 м. АМТЗ проводились в тех же точках, что и электротомография. Зондирования АМТЗ выполнялись с аппаратурой “*Phoenix Geophysics*” в режиме пятикомпонентной съемки с базовой точкой и шагом вдоль профиля 100 м.

Геологическая модель месторождения и результаты разных видов инверсии по пройденному профилю показаны на рис. 7.

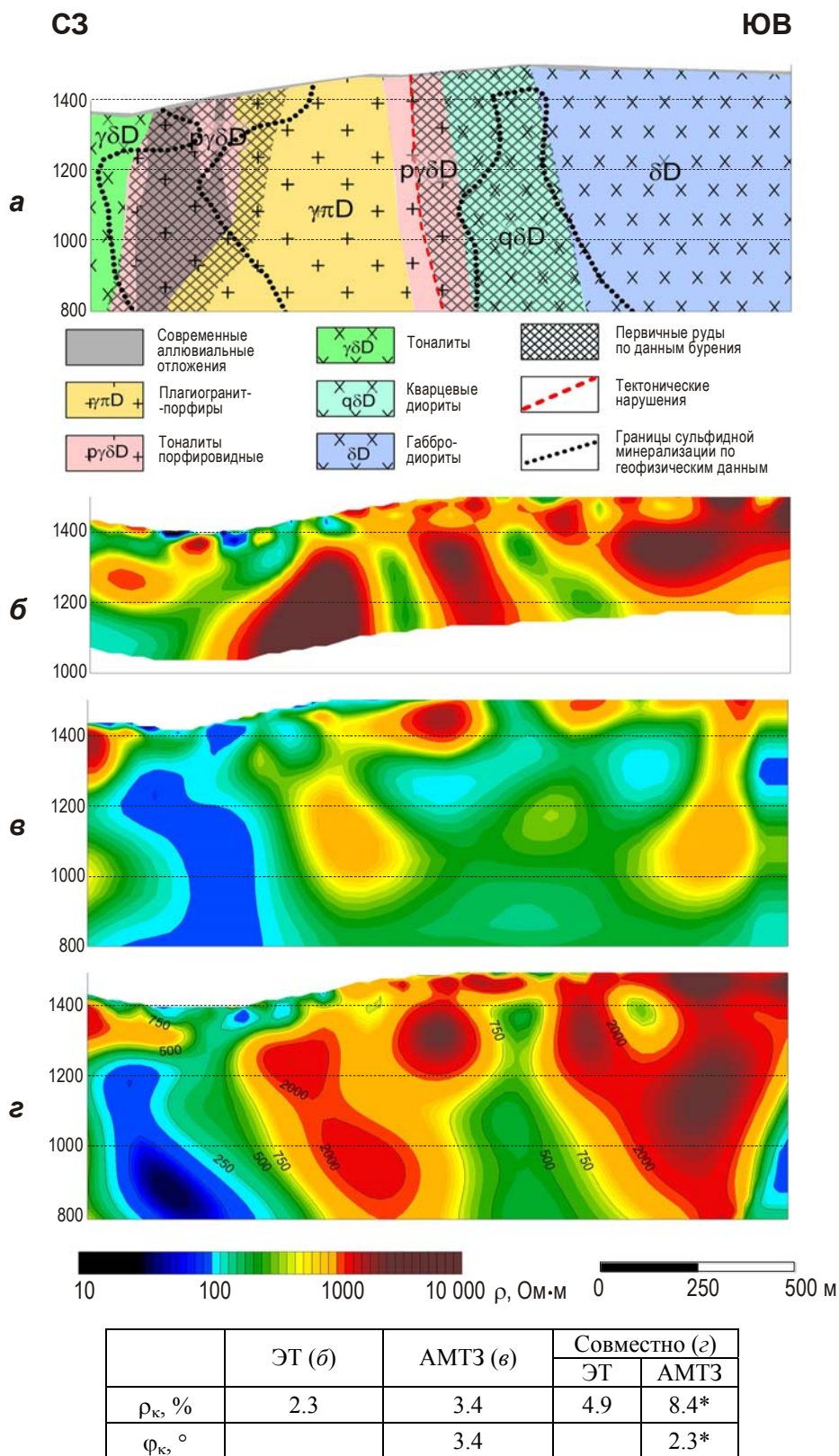


Рис. 7. Геологическая модель месторождения Ак-Суг (а) и модели, полученные по результатам двумерной автоматической инверсии данных электротомографии (б), АМТЗ (в – бимодальная инверсия) и двух методов совместно (г)

По результатам интерпретации данных электротомографии четко проявляются области высокого сопротивления, связанные в центральной части месторождения с “кварцевым ядром”, а в южной части – с высокоомными габбро-диоритами (рис. 7, б).

Модель, полученная по результатам инверсии данных АМТЗ, характеризуется более низкими значениями ρ , так как на результаты магнитотеллурических параметров большее влияние оказывают проводящие области сульфидной минерализации, области метасоматических изменений, аргиллизации (рис. 7, в). Модель, полученная по результатам совместной инверсии данных двух методов (рис. 7, г), наилучшим образом отображает геологический разрез, включая в себя черты обеих моделей, полученных при отдельной инверсии. При проведении совместной инверсии использовались эффективные кривые кажущегося сопротивления и фазы магнитотеллурического импеданса. Средняя невязка модельных и экспериментальных кривых по всему профилю для электротомографии составила 2.3 %, для магнитотеллурических данных – 3.4 % (по кажущемуся сопротивлению) и 3.4° (по фазе импеданса).

Наиболее ярко на геоэлектрической модели проявляется северное рудное тело. Область пониженных значений $\rho=100-250$ Ом·м шириной около 300 м прослеживается на глубину 650 м и более. Параметры проводящей зоны точно соответствуют параметрам северной залежи, установленным по данным бурения. Южная зона сульфидной минерализации проявляется менее контрастно. Она имеет примерно такую же ширину, что и северная, но характеризуется более высокими (500 Ом·м) значениями ρ . Этот результат также соответствует данным бурения, согласно которым южная зона по площади превосходит северную, но характеризуется невысоким содержанием меди и молибдена. Она облекает “кварцевое ядро” с юга и востока и круто падает на юг с углами 80–85°. По глубине область распространения медной минерализации прослежена почти до 700 м, при этом установлена тенденция увеличения концентрации халькопирита и молибденита с глубиной. В центре профиля высокими значениями ρ проявилось “кварцевое ядро” – центральная часть рудного штокверка.

Месторождение Бенкала расположено в Костанайской области Республики Казахстан. Оно находится в юго-западной части Валерьяновской структурно-формационной зоны и приурочено к ядру синклинали складки субмеридионального простирания. Площадь месторождения сложена вулканогенно-осадочными породами среднего-верхнего визе и прорывающими их интрузивными и дайковыми породами нижнего-среднего карбона. На западе месторождения распространены преимущественно вулканогенные породы – дацитовые, андезитовые, андезито-базальтовые, реже базальтовые порфириды; на восточном фланге преобладают породы туфогенно-осадочные – туффиты, туфопесчаники, туфоалевролиты [Агеева, 1982].

Интрузивные породы представлены единым штокообразным телом, сложенным порфиоровидными и кварцевыми порфиоровидными диоритами, гранодиоритами и гранит-порфирами. Интрузивное тело, вытянутое в субмеридиональном направлении, имеет протяженность до 2500 м при максимальной ширине до 1600 м. Геологическая модель месторождения и результаты инверсии данных по профилю, пересекающему центральную часть залежи с запада на восток, представлены на рис. 8.

На профиле длиной 3000 м были выполнены измерения методами электротомографии и АМТЗ. При проведении электротомографии использовалась осевая установка “диполь-диполь”; длина питающей линии AB составляла 1000 м, приемной линии MN – 10–400 м; разности – от 15 до 1500 м, шаг по профилю – 50 м. Методика и аппаратура измерений методом АМТЗ была такой же, как на месторождении Ак-Суг.

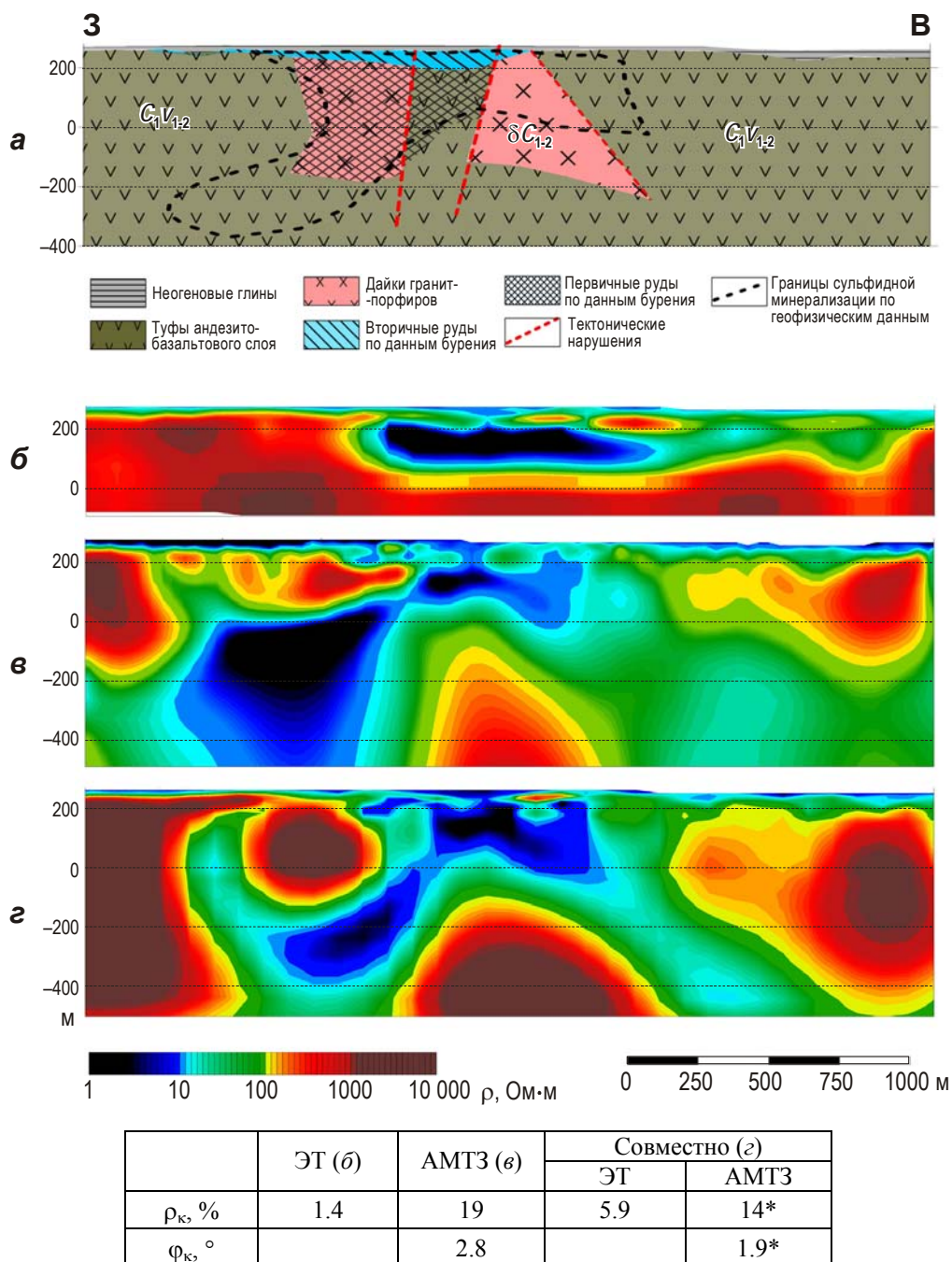


Рис. 8. Геологическая модель месторождения Бенкала (а) и модели, полученные по результатам двумерной автоматической инверсии данных электротомографии (б), АМТЗ (в – бимодальная инверсия) и двух методов совместно (г)

По результатам инверсии данных электротомографии определяются только контуры верхней залежи, которая представлена вторичными рудами, приуроченными к коре выветривания (рис. 8, б). По результатам бимодальной инверсии магнитотеллурических данных восстанавливаются общие черты зоны первичных прожилково-вкрапленных руд, которые локализуются в гидротермально-измененных кварцевых диоритах и гранит-порфирах. Области пониженных значений ρ также могут быть связаны с пиритовой минерализацией, наблюдаемой в зоне контактов интрузии порфиroidных диоритов с вмещающими эффузивно-осадочными породами (рис. 8, в).

Результаты совместной инверсии (рис. 8, з) позволили выделить на границах интрузии “подковообразную” область пониженных сопротивлений ($\rho=5-30$ Ом·м). Эта модель объединяет результаты, полученные при раздельной инверсии данных двух методов.

В западной части месторождения контуры проводящей области хорошо согласуются с данными бурения; инверсия показывает, что оруденение простирается по глубине до 650 м. Проводящие породы в апикальной части интрузии отвечают вторичным рудам. Восточное “крыло” проводника связано, скорее всего, с пиритизированными областями зон эпидотизации и хлоритизации.

Выводы

Приведенные результаты наглядно демонстрируют существенные преимущества, которые при решении рудных задач дает использование совместной инверсии данных геометрических зондирований на постоянном токе и электромагнитных индукционных зондирований Земли.

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. Кроме того, этот метод направлен на изучение существенно неоднородных, трехмерных сред, к которым смело можно отнести большинство рудных провинций. Главный недостаток метода – ограничение глубинности исследований. Увеличение разносов приводит к появлению проблем разного рода, среди которых необходимость увеличения мощности источника тока и размеров приемных и питающих линий, переход на более низкие частоты измерений и, как следствие, увеличение времени измерений для выполнения условий ближней зоны.

Глубинность магнитотеллурических методов ограничена только временем записи на точке измерений. Для достижения глубинности от нескольких сотен метров до первых километров, как правило, достаточно аудиоманнитотеллурического диапазона, длительность записи при использовании которого не превышает 1 часа.

Магнитотеллурические параметры имеют повышенную по сравнению с электротомографией чувствительность к проводящим объектам и не экранируются высокоомными горизонтами. При инверсии данных магнитотеллурических методов можно использовать различные, дополняющие друг друга независимые параметры, благодаря чему и сужается область эквивалентных решений обратной задачи.

Литература

- Агеева С.Т.* Геологическая позиция и морфологические особенности зон Северо-Бенкалинского месторождения (Зап. Тургай) // Геология штоковерковых месторождений меди Урала и Казахстана. 1982. С.14–25. (Тр. ЦНИГРИ; Вып. 170).
- Андреева Е.В., Бобачев А.А., Варенцов Ив.М., Верещагина М.И., Куликов В.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В.* Комплексирование геофизических методов при поисках медно-никелевых руд на объектах ГМК “Норильский Никель” // Разведка и охрана недр. 2006. № 8. С.71–79.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 680 с.
- Варенцов Ив.М.* Общий подход к решению обратных задач магнитотеллурики в кусочно-непрерывных средах // Физика Земли. 2002. № 11. С.11–33.
- Варенцов Ив.М.* Разрешающая способность современных ЭМ геофизических методов с естественным возбуждением поля // Разведка и охрана недр. 2006. № 8. С.66–71.

- Варенцов Ив.М., Ковачикова С., Куликов В.А., Логвинов И.М., Трегубенко В.И., Яковлев А.Г., Синхронные МТ и МВ зондирования на западном склоне Воронежского массива // Геофизический журнал. 2012. Т. 34, № 4. С.90–107.
- Варенцов Ив.М., Куликов В.А., Яковлев А.Г., Яковлев Д.В. Возможности методов магнитотеллурики в задачах рудной геофизики // Физика Земли. 2013. № 3. С.9–29.
- Забелин В.И. Элементы геолого-генетической модели Ак-Сугского медно-молибденового месторождения // Магматизм и металлогения рудных районов Тувы. Новосибирск: Наука, 1992. С.92–103.
- Каминский А.Е., Ерохин С.А., Шлыков А.А. Совместная двумерная инверсия данных электротомографии и РМТ/АМТ // Геофизика. 2015. № 4. С.32–39.
- Куликов В.А., Яковлев А.Г. Практическое применение магнитотеллурических методов в рудной геофизике // Разведка и охрана недр. 2011. № 3. С.26–33.
- 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.
- Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. М.: ГЕРС, 2005. 311 с.
- Pedersen L.B., Engels M. Routine 2D inversion of MT data using the determinant of the impedance tensor // Geophysics. 2005. V. 70, N 2. P.G33–G41.
- Varentsov Iv.M. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice. Amsterdam: Elsevier, 2015a. P.191–229.
- Varentsov Iv.M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion // Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice. Amsterdam: Elsevier, 2015b. P.271–299.

Сведения об авторах

КУЛИКОВ Виктор Александрович – доктор геолого-минералогических наук, доцент, Геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119234, Москва, ул. Ленинские Горы, МГУ им. М.В. Ломоносова. Тел.: +7(495) 939-49-12. E-mail: vic@nw-geophysics.ru

КАМИНСКИЙ Александр Евгеньевич – геофизик, ООО “КГЭ АСТРА”. 195009, Санкт-Петербург, ул. Бобруйская, д. 5Б. Тел.: +7(921) 654-93-96. E-mail: kaminae@yandex.ru

ЯКОВЛЕВ Андрей Георгиевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры геофизических методов исследования земной коры, Геологический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. 119234, Москва, ул. Ленинские Горы, МГУ им. М.В. Ломоносова. Тел.: +7(495) 939-49-12. E-mail: mail@nw-geophysics.com

COMBINED INVERSION OF ELECTRIC RESISTIVITY TOMOGRAPHY AND MAGNETOTELLURIC SOUNDING FOR SOLVING TASKS OF ORE GEOPHYSICS

V.A. Kulikov¹, A.E. Kaminsky², A.G. Yakovlev¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² “Astra Geophysics LTD”, S-Peterburg, Russia

Abstract. The paper presents the results of combined inversion of data of electric resistivity tomography and magnetotelluric sounding in ZONDRES2D code for solving tasks of ore geophysics. It illustrates the advantages

of combined inversion for vertical exploration up to a depth of 400-500 m on synthetic models and real field survey data.

Electric tomography as a DC method is hypersensitive to high resistance object and makes it possible to determine more correctly boundaries of different intrusions, quartz core, dykes and other high-resistivity bodies. The principal failure of this method is limitation of the depth of penetration.

The depth of magnetotelluric methods is limited only by the recording time. As a rule, in order to reach the depth of several hundred meters – first kilometers, AMT range is enough. The duration of recording in this mode is less than 1 hour. MT-parameters are more sensitive to conductive bodies and are not shielded by highly resistive layers. In magnetotelluric methods, one can use various independent parameters, which complement each other and constrict the area of inverse solutions.

Keywords: electric resistivity tomography, magnetotelluric sounding, two-dimensional inversion, ore exploration.

References

- Ageeva S.T. Geological position and morphological features of the Severo-Benkalsk deposit zones (Western Turgai), *Geologiya shtokverkovykh mestorozhdenii medi Urala i Kazahstana, Tr. TsNIGRI* (Geology of the stockwork copper deposits of the Ural and Kazakhstan, Proc. TsNIGRI), 1982, vol. 170, pp. 14-25.
- Andreeva, E.V., Bobachev, A.A., Varentsov, Iv.M., Vereshagina M.I., Kulikov V.A., Yakovlev A.G., and Yakovlev D.V. Combining Geophysical Methods for the Prospecting for Copper-Nickel Ores on the Objects of GMK Norilsk Nickel, *Razved. Okhr. Nedr*, 2006, no. 8, pp. 71-79.
- Berdichevsky, M.N. and Dmitriev, V.I. *Models and Methods of Magnetotellurics*, Berlin: Springer, 2008.
- Kaminskiy A.E., Erokhin S.A., and Shlykov A.A. Joint 2D Inversion of Electrical Resistivity Tomography and Radio/Audio Magnetotelluric data, *Geofizika* (The Russian Geophysics Journal), 2015, no. 4, pp. 32-39.
- Kulikov V.A. and Yakovlev A.G. Practical application of the magnetotelluric methods in ore geophysics, in *Razved. Okhr. Nedr*, 2011, no.3, pp. 26-33.
- Kulikov V.A., Bobachev A.A., and Yakovlev A.G. Applications of Electrical resistivity tomography in deep mining prospecting *Geofizika* (The Russian Geophysics Journal), 2014, no. 2, pp. 39-46.
- Elektrorazvedka. Uchebnoe posobie po elektrorazvedochnoi praktike dlya studentov geofizicheskikh spetsial'nostei* (Electric Prospecting. Training Manual for Students in Geophysics), Khmelevska, V.K., Modin, I.N., and Yakovlev, A.G., Eds., Moscow: MGU, 2005.
- Pedersen L.B. and Engels M. Routine 2D inversion of MT data using the determinant of the impedance tensor, *Geophysics*, 2005, vol. 70, no. 2, pp. G33-G41.
- Varentsov Iv.M. Methods of joint robust inversion in MT and MV studies with application to synthetic datasets, *Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice*, Amsterdam: Elsevier, 2015a, pp. 191-229.
- Varentsov Iv.M. Arrays of simultaneous EM soundings: design, data processing, analysis, and inversion, *Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior: Theory, Modeling, Practice*, Amsterdam: Elsevier, 2015b, pp. 271-299.
- Varentsov Iv.M. A General Approach to the Magnetotelluric Data Inversion in a Piecewise-Continuous Medium, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2002, vol. 38, no. 11, pp. 913-934.
- Varentsov Iv.M. Resolving Efficiency of the Modern EM Geophysical Methods with Natural Sources, *Razved. Okhr. Nedr*, 2006, no. 8, pp. 66-71.
- Varentsov Iv.M., Kovachikova, S., Kulikov, V.A., Logvinov I.M., Tregubenko V.I., and Yakovlev A.G., Simultaneous MT and MV Soundings on the Western Slope of the Voronezh Massif, *Geofiz. Zh.*, 2012, vol. 34, no. 4, pp. 90-107.
- Varentsov Iv.M., Kulikov V.A., Yakovlev A.G., and Yakovlev D.V. Possibilities of magnetotelluric methods in geophysical exploration for ore minerals, *Izv. Phys. Solid Earth*, 2013, vol. 49, no. 3, pp. 309-328.
- Zabelin V.I. Elements of the geological-genetic model of the Ak-Sug copper-molybdenum deposit, *Magmatizm i metallogeniya rudnykh raionov Tuvy* (Magmatism and metallogeny of the Tuva ore regions, Novosibirsk: Nauka, 1992.