

УДК 550.372+550.837

## ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОЭЛЕКТРИКИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РЕГИОНАЛЬНОЙ И РУДНОЙ ГЕОФИЗИКИ НА ПРИМЕРЕ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА

© 2018 г. В.В. Белявский<sup>1</sup>, А.Л. Шейнкман<sup>2</sup>, В.В. Килипко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Центр геоэлектромагнитных исследований – Филиал ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт геодинамики РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, г. Москва, Россия

Приведены результаты изучения возможности использования региональных работ магнитотеллурическими (МТ) методами для выделения районов перспективных на рудопроявление. Исследования проводились в пределах металлогенических зон Западных Саян и Тувы, для которых имеются данные плотных МТ наблюдений. Решение задачи существенно облегчалось тем, что ранее одним из авторов уже были подробно рассмотрены вопросы, связанные с анализом экспериментальных и модельных матриц импеданса, результатов одно- и двумерных инверсий максимальных и минимальных кривых, построением стартовых геоэлектрических разрезов, анализом матрицы импеданса для трехмерных моделей.

Описаны положение структурно-формационных зон Тувы и Западных Саян и их рудная минерализация; изложена методология трехмерной интерпретации кривых МТ зондирования. При интерпретации МТ данных определялись направления простирания региональных структур и осей фазового тензора, размерность матрицы импеданса; проверялось условие выполнения дисперсионных соотношений для инвариантных максимальных (минимальных) экспериментальных и модельных импедансов; удалялся электрический шум от приповерхностных неоднородностей; с помощью одномерной инверсии нормализованных кривых кажущегося удельного электрического сопротивления строилась стартовая геоэлектрическая модель; с помощью трехмерного математического моделирования МТ полей решалась обратная задача и рассчитывалась электропроводность вертикальных (разломов) и горизонтальных коровых блоков; оценивалась разрешающая способность определения параметров проводящих блоков коры. Результирующая трехмерная модель строилась методом интерактивного подбора 3D модельных кривых к экспериментальным; оценивалась относительная погрешность подбора.

Для выделения прогнозируемых на рудопроявление зон сначала определялась электропроводность блоков с известными типами рудопроявлений, после чего исследовалась их ассоциативная связь с низкоомными блоками в рассматриваемой структурной единице. Результатом было построение трехмерных геоэлектрических моделей металлогенических зон Тувы и Западных Саян. Показано, что области гидротермального оруденения концентрируются в зонах вблизи глубинных разломов, для которых характерно пониженное удельное электрическое сопротивление, объясняемое более высоким содержанием связанной доли флюида в порах и матрице горных пород. По этому признаку с учетом данных, полученных в смежных районах Алтае-Саянского региона, выделены зоны, перспективные для поиска месторождений полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** магнитотеллурическое зондирование, трехмерное моделирование магнитотеллурических полей, оруденение, Алтае-Саянский регион.

### Введение

Электроразведочные методы широко используются при поисках гидротермальных месторождений полезных ископаемых, что объясняется существенным отличием электрических свойств рудных и рудовмещающих формаций от тех же свойств вмещающих их пород. Высокая чувствительность электроразведочных методов обусловле-

на тем, что рудные и рудовмещающие формации отлагаются в наиболее проницаемых, пригодных к адсорбции областях, а рудные метасоматиты часто представлены сульфидами или ассоциируют с графитизированными сланцами, которые вызывают уменьшение удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород. При этом относительные изменения УЭС значительно превосходят изменения других свойств пород, поскольку их УЭС слабо зависит от сопротивления минерального скелета пород, а определяется проницаемостью и флюидонасыщенностью горных пород и минерализацией флюида или процентным содержанием связанной доли графита в матрице горных пород. Именно этой особенностью УЭС вызван интерес к изучению геоэлектрических характеристик коровых проводников и глубинных разломов.

Гидротермальные медно-молибденовые порфиоровые месторождения обязаны своим возникновением выделению флюидной массы из расплава. Переход при дегидратации 1 % веса воды из конституционного или связанного состояния в свободную фазу приводит к более значительному увеличению объема пород и к возникновению в них многочисленных трещин и коллекторов (явление гидроразрыва), которые заполняются водным раствором, поступающим при дегидратации формаций, нагретых до соответствующей температуры. В результате образуется замкнутая гидротермальная система рудообразования [Попов, 1977].

Изучение распределения УЭС в районе расположения подобных структур позволяет выявлять наиболее ослабленные и насыщенные флюидом зоны, вдоль которых происходит миграция рудных компонентов. В случае унаследованного режима развития разломов, в которых формировались рудные и рудовмещающие формации и которые являются в настоящее время активными геодинамическими структурами, появляется возможность их картирования МТ методами. Наиболее ослабленные флюидопроницаемые зоны, представляющие собой выраженные трехмерные структуры, формируются в областях пересечения разломов.

Оценка возможности использования для изучения таких зон методики 3D интерпретации данных МТЗ путем подбора модельных амплитудных и фазовых кривых к экспериментальным представляет большой практический интерес.

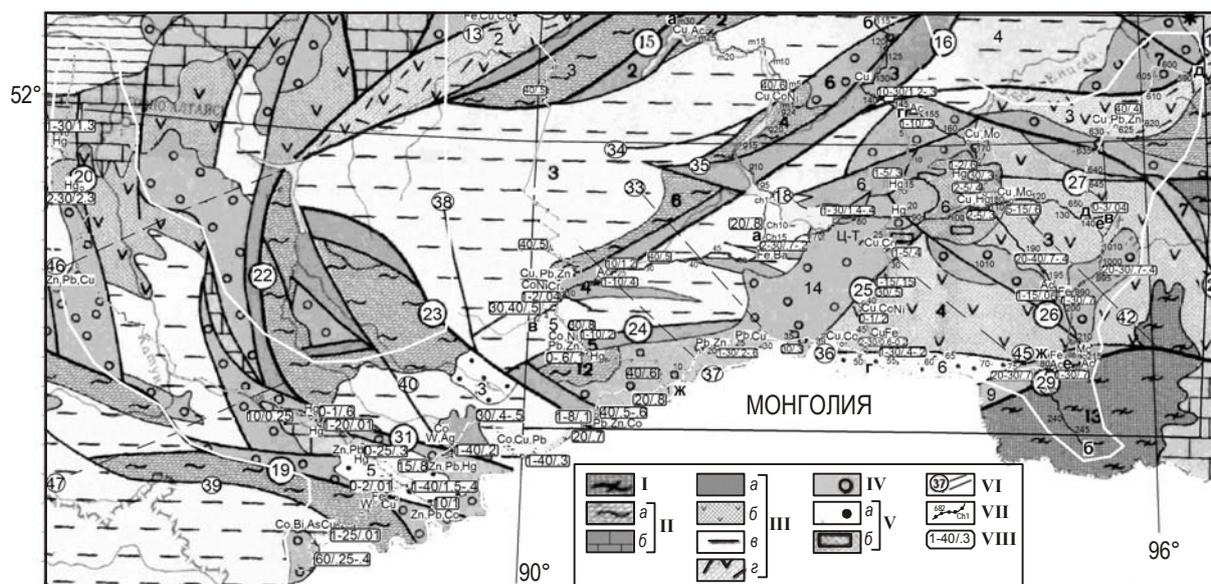
Цель настоящей работы – демонстрация возможности использования региональных работ МТ методами для выделения районов, перспективных на рудопроявление. Представляемые исследования проводились в пределах металлогенических зон Западных Саян и Тувы, для которых имеются данные МТ наблюдений, отличающихся высокой плотностью расположения точек наблюдения [Белявский, 2014; Белявский, Шейнкман, 2015].

Ранее в работе одного из авторов [Белявский, 2014] были подробно рассмотрены вопросы, связанные с анализом экспериментальных и модельных матриц импеданса, результатов одно- и двумерных инверсий максимальных и минимальных кривых, построением стартовых геоэлектрических разрезов, анализом матрицы импеданса для трехмерных моделей. Использование результатов этих исследований существенно облегчило решение задач, стоящих перед настоящей работой.

Авторами использованы материалы магнитотеллурических зондирований, полученные в исследуемом регионе в 1986–2008 гг. рядом научных институтов и производственных организаций, среди которых Производственное геофизическое объединение “Енисейгеофизика”, Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья (КНИИГиМС), Центр региональных геофизических и геоэкологических исследований ГЕОН им. В.В. Федынского.

### Район исследований. Положение структурно-формационных зон Тувы, Западных Саян и их рудная минерализация

Для Западных Саян и Тувинского нагорья характерно развитие северо-восточных и субширотных разломов, по которым осуществлялись сдвиги, взбросо-сдвиги и надвиги, являющиеся основными движениями в районе исследований. Рассматриваемый участок (рис. 1) на западе ограничен Шапшальским глубинным разломом, на севере – Саяно-Минусинским, на северо-востоке – Каа-Хемским и Систиг-Хемским, на юге – Южно-Таннуольским [Геологическое ..., 1988]. Эти глубинные разломы, как и разломы



**Рис. 1.** Прогнозная схема размещения полезных ископаемых на карте структурно-геологического районирования Алтае-Саянского региона [Геологическое..., 1988]. Прогнозируемые рудопоявления и эталонные типы месторождений (с верхним индексом “о”) приводятся по [Рундквист, Волкова, Смирнов, 1988; Государственная ..., 2002]

I – раннепротерозойские гнейсово-сланцевые и гнейсово-сланцево-карбонатные комплексы; II – поздние протерозойды: а – зеленосланцевые выступы байкалид, б – терригенно-кремнисто-карбонатные чехлы массивов; III – зона каледонид: а – раннекаледонские эвгеосинклинальные с офиолитовыми ассоциациями (1 – Куртушибинская, 2 – Хемчикская, 9 – Каа-Хемская), б – эвгеосинклинальные с базальт-андезитовыми и базальт-риолитовыми ассоциациями (3 – Ондум-Буренская, 4 – Восточно-Таннуольская), в – позднекаледонские миогеосинклинального типа (5 – Западно-Саянская), г – Эвгеосинклинального типа; IV – зона каледонид орогенной стадии: Тувинская впадина (6), Центрально-Тувинский прогиб (Ц-Т); V – зоны посторогенной активизации: а – кайнозойские (Убсунурская – 7); б – юрские угленосные (Улуг-Хемская, Кызылская – 8); VI – глубинные разломы: Саяно-Минусинский (13), Брусский (15), Хемчикско-Куртушибинский (16), Азасский (17), Уюкский (18), Шапшальский (23), Шуйский (24), Убсунур-Баянкольский (25), Восточно-Таннуольский (26), Байсютский (27), Каа-Хемский (28), Агардагский (29), Карасуг-Улатайский (33), Кантегирский (34), Южно-Таннуольский (36), Барлыкский (37), Балыктыг-Хемский (42), Унгешский (45); VII – профили и точки МТЗ: Шушенское–Ак-Дурук (а-а), Можарка–Кызыл–Эрзин (б-б), Тээли – Сарыг-Сеп (в-в), Шивилинг–Ак-Чарыз (г-г), Бояровка–Азас (д-д), Сарыг-Сеп–Ильинка (е-е), Саглы–Самагалтай (ж-ж); VIII – в числителе диапазон глубин в метрах, для которого рассчитано процентное содержание флюида (знаменатель)

более низкого ранга, характеризуются унаследованным режимом развития; вдоль них проходили разгрузки тектонических напряжений и процессы рудоотложения. Разломы обрамлены трещинами и зонами дробления, наличие которых способствовало протеканию гидротермальных процессов.

Вдоль Борусского, Хемчикско-Куртушибинского, Уюкского, Каа-Хемского и Шуйского глубоких разломов развиты офиолитовые ассоциации, которые наряду с ультраосновными формациями свидетельствуют о значительном проникновении разломов в литосферу. Вдоль Каа-Хемского, Азасского, Агардагского, Восточно-Тануольского разломов происходит перемещение блоков коры, а к местам их пересечения приурочены впадины. В Алтае-Саянском регионе присутствуют известково-углеродистые сланцы с возрастом от архея до нижнего отдела кембрия, с которыми связаны месторождения золота и полиметаллов. Накоплению металлов способствовала высокая сорбционная способность углерода на стадии диагенеза осадков.

Выполненные на ряде профилей МТЗ наблюдения методом обменных волн землетрясений (МОВЗ) и глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) позволили определить геометрию разломов, обнаружить домены с пониженными скоростями обменных волн землетрясений и оценить их флюидонасыщенность [Белявский, Ракитов, 2012]. Выделение прогнозируемых на рудопроявление зон проводилось в два этапа: на первом по данным МТЗ определялось удельное электрическое сопротивление проводящих блоков на рудопроявлениях известных типов полезных ископаемых; на втором анализировалась ассоциативная связь этих типов полезных ископаемых с низкоомными блоками прослеженными в рассматриваемой структурной единице.

### Методология 3D интерпретации кривых МТЗ

Трехмерная интерпретация данных МТЗ включала в себя следующие этапы:

- определение направления простирания региональных структур и осей фазового тензора, а также размерности матрицы импеданса (*skew*,  $\eta$ ) [Counil, le Mouel, Menvielle, 1986; Caldwell, Bibby, Brown, 2004; Marti et al., 2005];

- проверка выполнения дисперсионных соотношений для инвариантных максимальных (минимальных) экспериментальных и модельных импедансов;

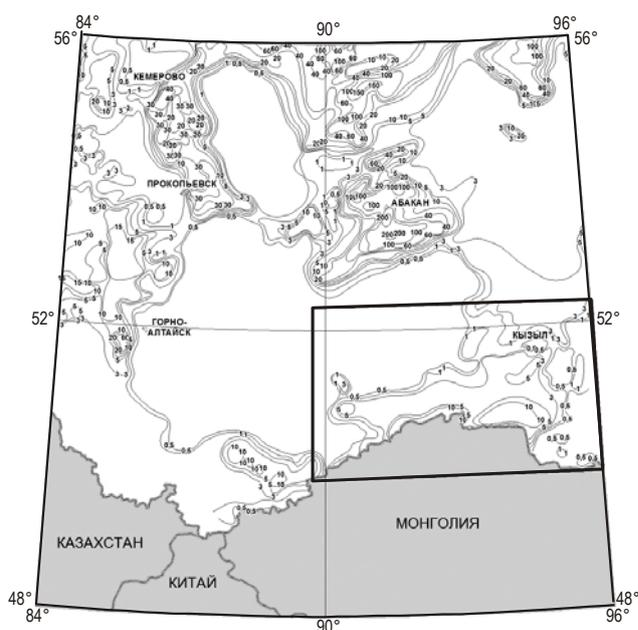
- удаление электрического шума от приповерхностных неоднородностей с помощью нормализации кривых  $\rho_k$  в предположении, что они получены над характерным блоком коры, а искажения носят случайный характер типа *shift effect*;

- построение стартовой геоэлектрической модели с помощью одномерной инверсии нормализованных кривых  $\rho_k$  максимума и минимума индукции ( $\rho^{\max H}$  и  $\rho^{\min H}$ )<sup>1</sup>, фаз  $\text{Arg}Z^{\max H}$ ,  $\text{Arg}Z^{\min H}$  импедансов  $Z^{\max H}$ ,  $Z^{\min H}$  [Counil, le Mouel, Menvielle, 1986], максимальных и минимальных кривых фазового тензора ( $\rho^{\text{fazmax}}$  и  $\rho^{\text{fazmin}}$ ) [Caldwell, Bibby, Brown, 2004; Белявский, 2014];

- решение обратной задачи МТЗ с помощью 3D моделирования МТ полей [Друскин, Книжнерман, 1994]. При этом оценивалась электропроводность вертикальных (разломов) и горизонтальных коровых блоков по инвариантным характеристикам матрицы [Z]. Параметры верхней части разреза задавались с учетом схемы распределения интегральной проводимости осадочного чехла [Шейнкман, Нарский, 2009] (рис. 2);

- оценка разрешающей способности и информативности кривых индукции  $\rho^{\max H}$  при определении параметров проводящих блоков коры.

<sup>1</sup> Здесь и далее при рассмотрении экспериментальных параметров и понятий в верхних индексах используется латинская буква *H*; при рассмотрении тех же параметров, но модельных, – *Hm*.



**Рис. 2.** Распределение интегральной проводимости в осадочном чехле Алтае-Саянского региона [Шейнкман, Нарский, 2009]; значения изолиний в См. Прямоугольник – границы области, для которой выполнено 3D моделирование МТ полей

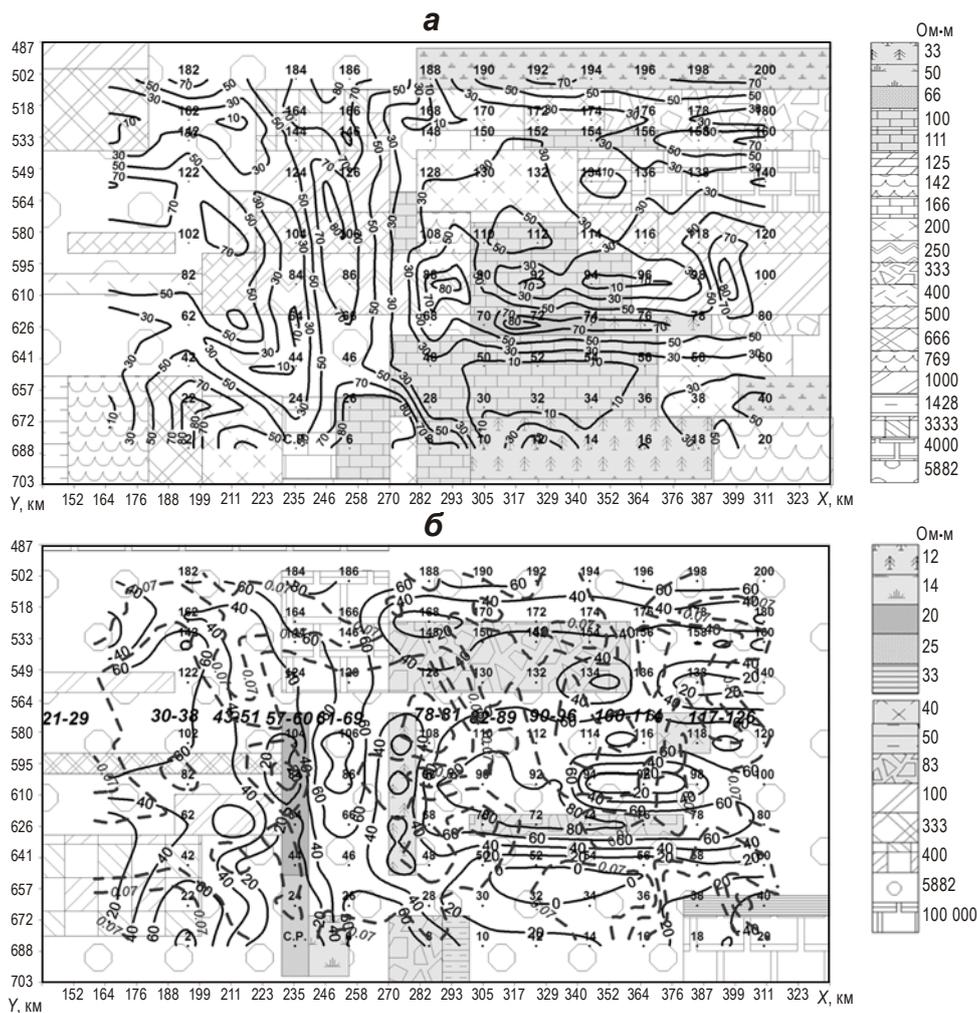
Результирующая 3D модель строилась методом интерактивного подбора модельных кривых  $\rho^{\min H_m}$ ,  $\rho^{\max H_m}$  и фаз  $\text{Arg} Z^{\max H_m}$  к экспериментальным  $\rho^{\max H}$ ,  $\rho^{\min H}$ ,  $\text{Arg} Z^{\max H}$ . Относительная погрешность подбора к среднему  $|\check{Z}^{\max H}(T_i)| = (1/N) \sum_{j=1}^N |Z^{\max H}(T_i)_j|$ , построенному для группы из  $N$  кривых, расположенных над блоком, характеризующимся единым глубинным строением, определялась как  $\delta^{Z^{\max H}}(T_i) = [ (|\check{Z}^{\max H}(T_i)| - |Z^{\max H_m}(T_i)|) / |Z^{\max H_m}(T_i)| ] \cdot 100\%$ . При расчете  $|\check{Z}^{\max H}(T_i)|$  грубые отскоки  $Z^{\max H}(T_i)$  исключались из рассмотрения. Суммарная относительная погрешность  $\bar{\delta}^{Z^{\max H}}$  оценивалась как среднеарифметическая по всем периодам  $\delta^{Z^{\max H}}(T_i)$ .

Численное трехмерное моделирование МТ полей выполнялось по программе *Maxwell* [Друскин, Книжнерман, 1988]. Использовалась сетка  $120 \times 170 \times 60$  узлов с шагом 3–5 км в пределах центрального блока модели (см. рис. 1). Надежные значения импедансов получены для вмещающей среды с  $\rho \leq 8300$  Ом·м в диапазоне периодов 0.002–300 с. Область подбора трехмерных блоков модели представлена на рис. 1, 2; при расчетах учитывалось изменение проводимости чехла и за пределами этой области. Стартовые геоэлектрические разрезы  $\rho(H)$ , построенные по результатам одномерной инверсии кривых  $\rho^{\max H}$  в Туве и Западных Саянах, представлены в [Белявский, Шейнкман, 2015], а кривых  $\rho^{\text{fazmax}}$  – в [Белявский, 2014].

### Геоэлектрическая модель Тувы и Западных Саян

Анализ распределения направления модельного магнитного поля кривых  $\rho^{\max H_m}$  в 3D модели на периодах  $T=0.5$  с (модель M1) свидетельствует, что если точки наблюдения модельных МТ полей<sup>1</sup> расположены на высокоомных блоках, то максимальные импедансы  $Z^{\max H_m}$  ориентированы ортогонально к ним –  $Z^{\perp}$  (рис. 3). Для точек наблюдения над вытянутыми низкоомными блоками те же кривые направлены вдоль блоков –  $Z^{\parallel}$ . Важно, что распределение удельного электрического сопротивления приповерхностных блоков слабо влияет на эти закономерности при  $T=20$  с.

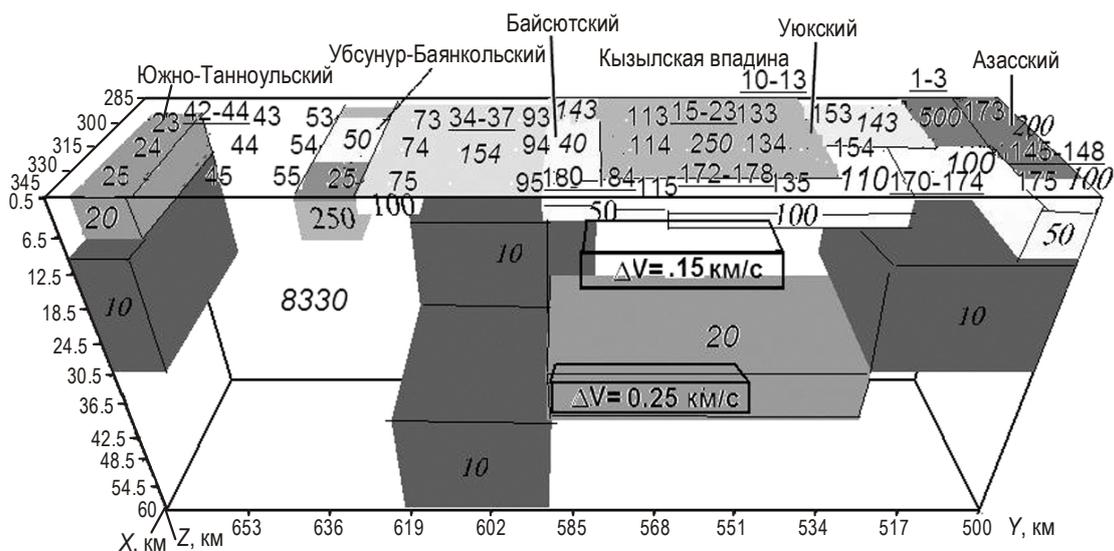
<sup>1</sup> Далее для точек моделирования используется обозначение т.н.



**Рис. 3.** Модель М1. Схемы распределения направлений магнитного поля для  $Z^{\max H_m}$  на периодах  $T=0.5$  с для  $Z=0$  км (а) и фазочувствительной асимметрии  $\eta$  на периодах  $T=20$  с для  $Z=20$  км (б). Прямые цифры – номера точек наблюдения при моделировании (т.н.); выделенные курсивом – номера точек экспериментальных МТЗ на профиле Тээли–Сарыг–Сеп. Справа – шкала  $\rho$ , Ом·м

В то же время направление простирания глубинных структур и их удельное сопротивление оказывают определяющее влияние на ориентацию  $Z^{\max H_m}$ . Над проводящими разломами кривые  $Z^{\max H_m}$  для  $T>0.1-0.5$  с – это в основном  $Z^{\text{II}}$ , которые формируются геоэлектрическими параметрами коровых проводников и разломов. Фазовая асимметрия  $\eta$ , как и ее экспериментальные значения в рассматриваемом регионе [Белявский, 2014], указывает на трехмерность структур нижнего этажа (см. рис. 3, б). Вид на подобранную трехмерную модель М2 со стороны Пр. 5зу представлен на рис. 4.

Модели М1 и М2 отличаются друг от друга количеством и расположением точек наблюдения – в первой из них по оси  $Y$  расположено 10 т.н., по оси  $X$  – 20; во второй модели – наоборот. Сечения моделей по нескольким профилям МТЗ приведены на рис. 5. Проводящие блоки при одномерной инверсии кривых  $\rho^{\max H_m}$  описываются изолиниями низких значений  $\rho(H)^M$ , которые близки к экспериментальным измерениям  $\rho(H)$  [Белявский, Шейнкман, 2015]. Это позволяет использовать для построения стартовых 3D моделей результаты одномерной инверсии кривых  $\rho^{\max H}$ .



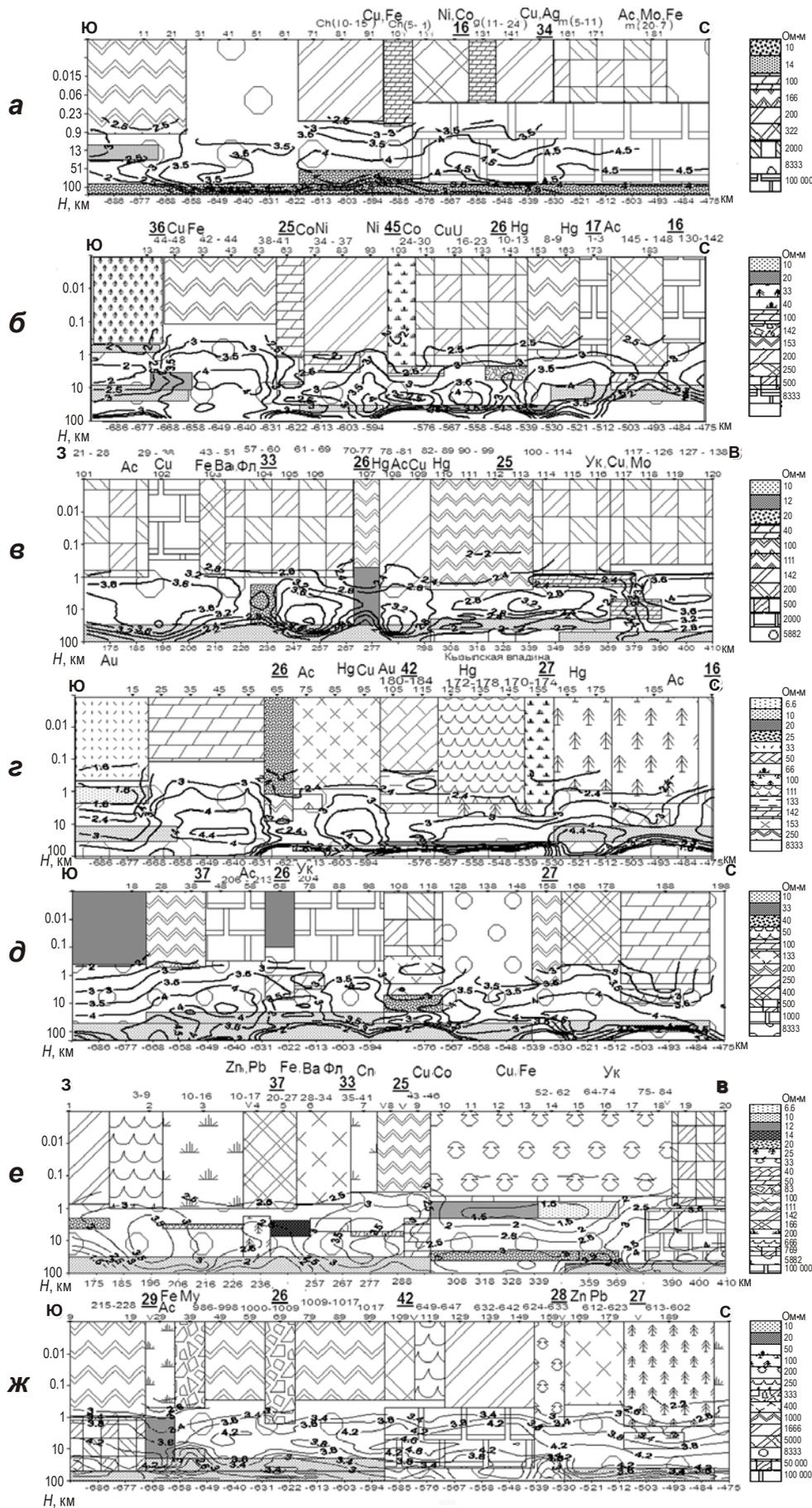
**Рис. 4.** Модель М2. Объемная геоэлектрическая модель Тувинской части Алтае-Саянского региона. Над моделью – названия разломов; на верхней плоскости – номера модельных точек наблюдения (т.н.) и экспериментальных МТЗ (подчеркнутые) для профилей Шивилинг–Ак-Чарыз и Можарка–Кызыл–Эрзин. Значения  $\rho$  модельных блоков выделены курсивом. Значения  $\Delta V$ , км/с указаны для блоков с дефицитом скоростей продольных волн [Булин, Егоркин, 2000]

Близкие и несколько более высокие относительные среднеарифметические погрешности были получены ранее [Белявский, 2014] и для профилей Шушенское–Ак-Дурук, Танзыбей–Кызыл–Эрзин, Тээли–Сарыг-Сеп, Саглы–Самагалтай, Сарыг-Сеп–Ильинка и Бояровка–Азас. На моделях для названных профилей под экспериментальными точками МТЗ приведены номера модельных т.н. (см. рис. 5), а также показаны положение и типы рудопроявлений.

Связь рудопроявлений с характерными блоками модели рассмотрим на примере профиля Можарка–Кызыл–Эрзин (см. рис. 4 и рис. 5, б-е). Под раннеорогенными молассоидными формациями Кызыльской впадины (МТЗ 170–184, т.н. 105–155, рис. 5, з) и к северо-западу от нее (МТЗ 145–148, т.н. 183, рис. 5, б) на глубинах 1–8 км присутствуют блоки мощностью до 10 км с  $\rho=10\text{--}100$  Ом·м. Угленосным формациям в Кызыльской впадине (МТЗ 180–184, т.н. 105–115, рис. 5, з) соответствуют блоки с  $\rho=10\text{--}100$  Ом·м, мощность которых составляет до 5 км.

Глубинные разломы с  $\rho=10\text{--}100$  Ом·м, расположенные вблизи МТЗ 215–228 (т.н. 29, рис. 5, ж), МТЗ 206–213 и 196–204 (т.н. 58 и 68–78, рис. 5, д), МТЗ 180–184 и 170–174 (т.н. 105–115 и 155, рис. 5, з), отвечают Азасскому, Уюкскому, Байсютскому, Восточно-Танноульскому и Агадарскому разломам, которые активизировались в кайнозойское время и часто коррелируют с доменами повышенного поглощения обменных волн землетрясений и пониженных скоростей  $V_p$  (т.н. 105–135, см. рис. 4).

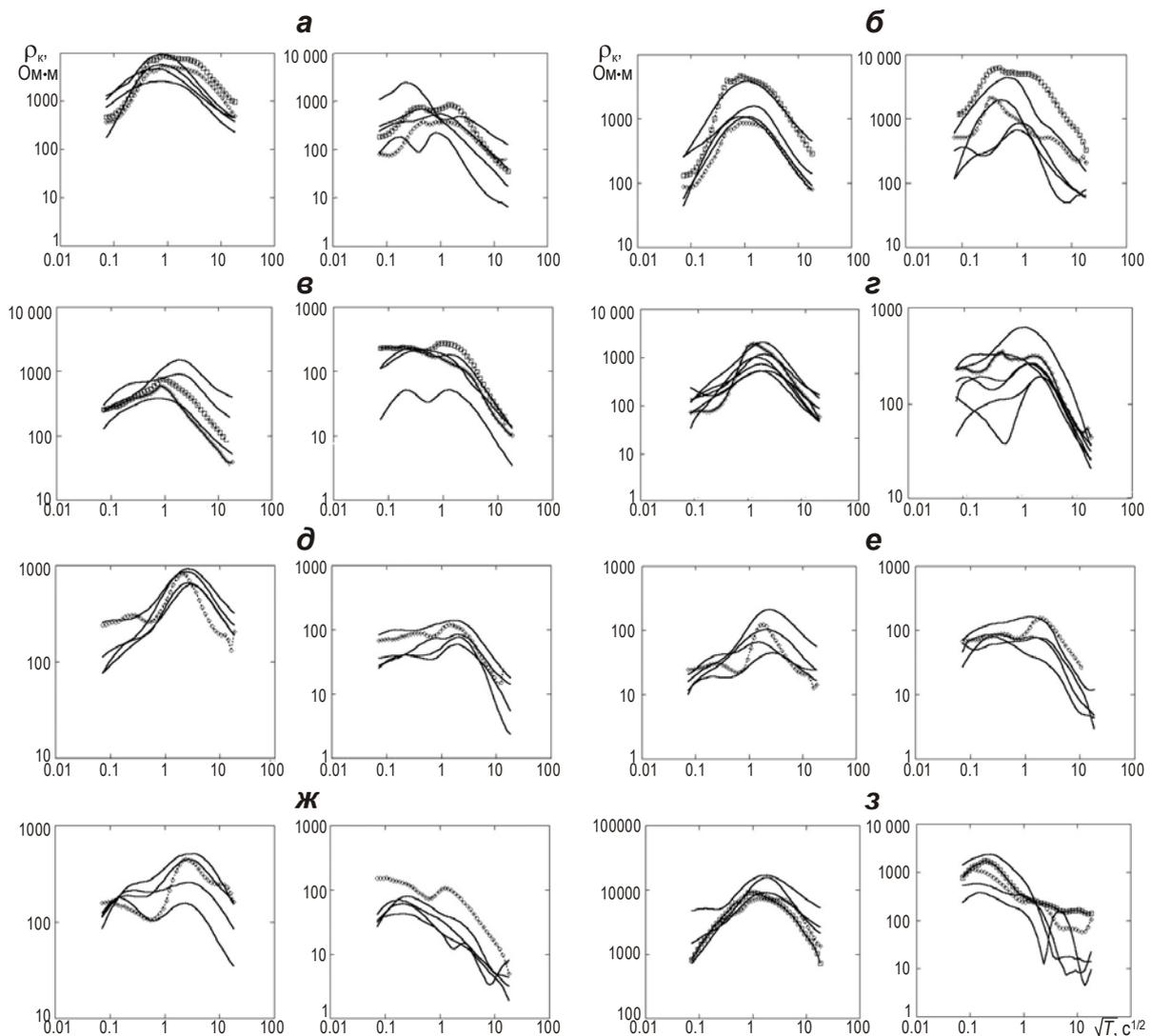
Вблизи вышеназванных точек МТЗ (см. рис. 1) находятся известные рудопроявления меди (МТЗ 134–135, т.н. 193–194), асбеста (МТЗ 153, 141–142, т.н. 184; МТЗ 217–214, т.н. 29), ртути (МТЗ 178–174, т.н. 135–134; МТЗ 180–187, т.н. 96–86), мусковита (МТЗ 215–216, т.н. 39–36) и железа (МТЗ 227–228, т.н. 29, 39).



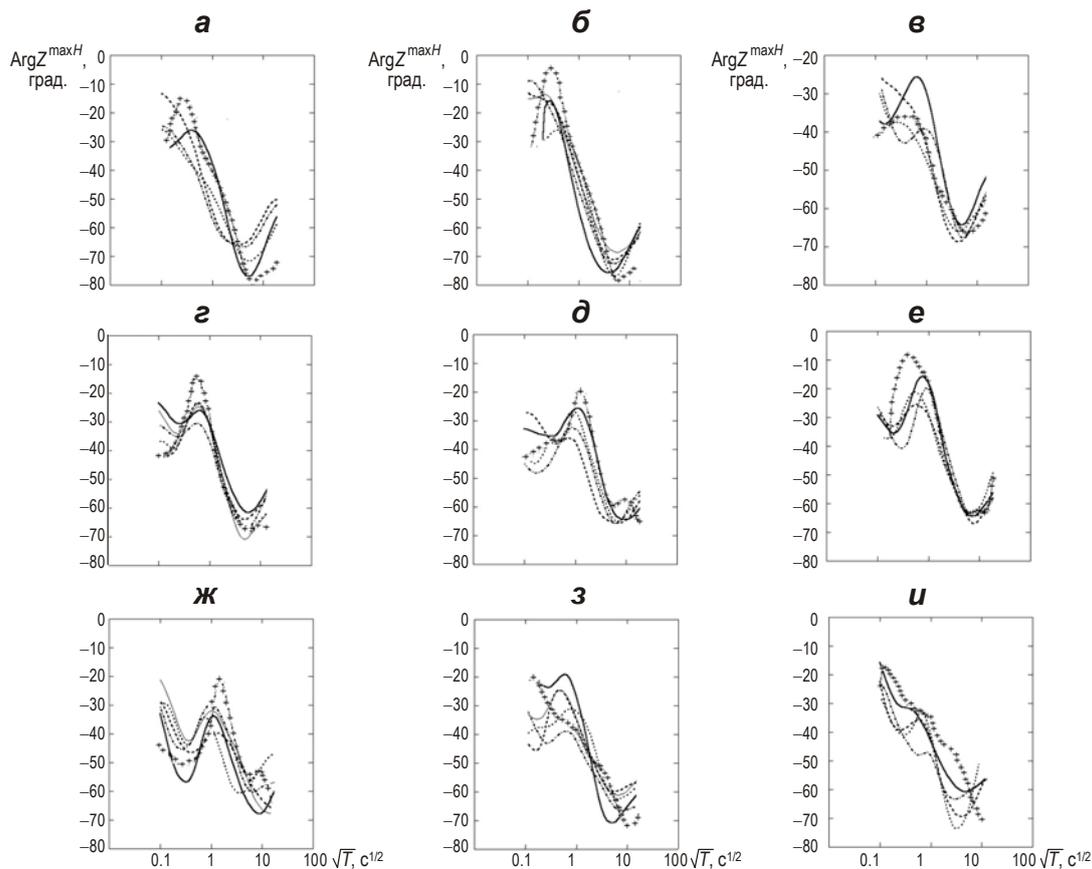


**Рис. 5.** Сечения моделей М1 и М2 по семи профилям и результаты одномерной инверсии кривых  $\rho^{\max H_M}$  вдоль них. Модель М1: Пр. 1zx (Саглы–Самагалтай, *е*), Пр. 6zx (Тээли–Сарыг–Сеп, *в*). Модель М2: Пр. 1zy (Шушенское–Ак–Дурук, *а*), Пр. 3zy (Шивилинг–Ак–Чарыз и МТЗ 145–148, *б*), Пр. 5zy (*з*) и Пр. 8zy (Можарка–Кызыл–Эрзин, *д*), Пр. 9zy (Сарыг–Сеп–Ильинка и Бояровка–Азас, *ж*). Подчеркнутые цифры – номера глубинных разломов (см. рис. 1); рядом – рудопоявления Cu, Fe, Co, Ni, As, Hg, As, Si, Fe, Ba, Фл (флюорит), Уг (уголь), Sn, Zn, Pb, Му (мусковит); ниже – номера экспериментальных МТЗ, в первом ряду номера т.н. Справа – шкала удельного электрического сопротивления блоков  $\rho$ , Ом·м; значение изолиний на сечениях –  $\rho(H)$ , Ом·м; на вертикальных осях – глубина  $H$ , км

Пример подбора модельных кривых  $\rho^{\max H_M}$ ,  $\rho^{\min H_M}$  к соответствующим экспериментальным кривым для Пр. Шивилинг–Ак–Чарыз приведен на рис. 6; на рис. 7 – подбор кривых  $\text{Arg}Z^{\max H_M}$  для того же профиля.



**Рис. 6.** Профиль Шивилинг–Ак–Чарыз (Пр. 3zy). Подбор к экспериментальным кривым  $\rho^{\max H}$  (слева) и  $\rho^{\min H}$  (справа) модельных кривых  $\rho^{\max H_M}$ ,  $\rho^{\min H_M}$  в разных точках МТЗ  
*а* – 1–3 (т.н. 173), *б* – 8–9 (т.н. 163), *в* – 10–13 (т.н. 143), *г* – 16–23 (т.н. 133), *д* – 24–30 (т.н. 113), *е* – 34–37 (т.н. 74–83), *ж* – 38–41 (т.н. 64–63), *з* – 44–48 (т.н. 23). Сплошные линии – экспериментальные кривые, все остальные – модельные



**Рис. 7.** Профиль Шивилинг–Ак-Чарыз (Пр. 3zy). Подбор к экспериментальным кривым  $\text{Arg}Z^{\max H}$  модельных кривых  $\text{Arg}Z^{\max Hm}$  в разных точках МТЗ: *а* – 1–4 (т.н. 173), *б* – 5–9 (т.н. 163), *в* – 10–13 (т.н. 143), *г* – 15–20 (т.н. 133), *д* – 25–28 (т.н. 103), *е* – 29–32 (т.н. 113), *ж* – 33–38 (т.н. 83), *з* – 40–44 (т.н. 43), *и* – 45–48 (т.н. 33). Модельные кривые отмечены крестиками; все остальные – экспериментальные кривые в разных точках МТЗ

Средняя погрешность подбора  $\bar{\delta}^{Z_{\max H}}$  по всем группам кривых, представленных на рис. 6, составила 12 %, но для  $\bar{\delta}^{Z_{\min H}}$  она выше. Если  $\delta^{Z_{\max H}}$  считать по урезанному диапазону периодов, то  $\bar{\delta}^{Z_{\max H}} \approx 8$  %.

В офиолитовых эвгеосинклинальных образованиях Агадарского проводящего разлома (см. рис. 5, *ж*) расположены месторождения асбеста (Ак-Довуарское, МТЗ 213–214), а также железа и мусковита (МТЗ 227–228). Рудопроявления ртути (Терлихайское, Арзаское, Торасаирское) и месторождение меди (Кызык-Чадрское) находятся над низкоомными блоками, один из которых с  $\rho=50\text{--}100$  Ом·м выделен на глубине 2–5 км, второй с  $\rho=20\text{--}50$  Ом·м – на глубине 40 км (МТЗ 178–184, см. рис. 5, *г*). Эти блоки коррелируют на профиле “Кварц” [Булин, Егоркин, 2000] с доменами, дефицит скорости продольных волн  $\Delta V_P$  в которых на глубине 8 км составляет 0.1–0.15 км/с, на глубине 35 км – 0.25 км/с (см. рис. 4).

Отмеченное свидетельствует о трещиноватости и глубинном заложении рудогенерирующих структур, генетически связанных с проводящим Байсютским глубинным разломом. Блок коры под МТЗ 178–184 (Кызыльская впадина) перемещается вниз вдоль проводящих Байсютского и Восточно-Танноульского разломов со скоростью 0.4 мм/год, а борта поднимаются со скоростью 0.7 мм/год.

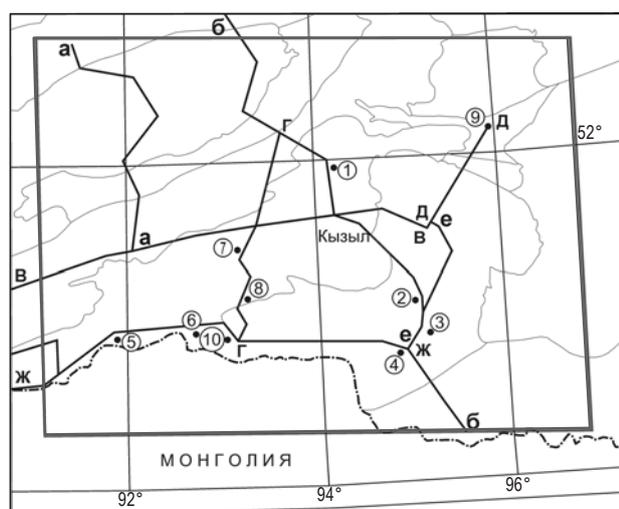
Центрально-Тувинский прогиб (см. рис. 1) испытывает погружение со скоростью 0.5 мм/год; скорость погружения Убусунурской и Тувинской впадин составляет 0.5–

0.6 мм/год. Расположенные севернее и южнее этих впадин блоки Тувинской и Восточно-Танноульской структурно формационных зон испытывают подъем со скоростью до 1–1.5 мм/год [Краснораменная, Лобацкая, 2008]. Подвижки происходят по глубинным разломам, представленным на рис. 4 и 5. Проводящие блоки под МТЗ 979–982 и МТЗ 1013–1016 (профили Сарыг-Сеп–Ильинка и Бояровка–Азас на рис. 5, ж) расположены в пределах Каа-Хемской (см. рис. 1) и Баш-Хемской рифтовых долин, ограниченных Агадырским, Восточно-Танноульским и Балыктыг-Хемским проводящими разломами. Эти разломы разделяют блоки коры, опускающиеся со скоростью 0.3–0.7 мм/год под обозначенными зонами МТЗ и поднимающиеся со скоростью 1.2–1.5 мм/год за их пределами. Флюиды, мигрирующие вдоль названных разломов, снижают удельное электрическое сопротивление коры в окрестности активизированных разломов.

Данные о содержании связанной доли флюида в выделенных низкоомных разломах и блоках коры, а также глубина их расположения приведены выше (см. рис. 1). Расчет выполнялся с учетом работы [Shankland, Waff, 1977] для  $\rho$  в блоках 3D моделей (см. рис. 5). Учитывалось влияние давления и температуры на изменение с глубиной сопротивления флюида  $\rho_{\text{ф}}$  при его минерализации солями NaCl – KCl в 10 г/л и  $\rho_{\text{ф}}=0.5$  Ом·м для  $T=18^\circ$  [Белявский, 2014].

Для области, в которой выполнялась трехмерная интерпретация кривых МТЗ (см. рис. 2), была составлена прогнозная схема размещения рудопроявлений Тувы и Западных Саян (рис. 8).

**Рис. 8.** Прогнозная схема размещения рудопроявлений Тувы и Западных Саян в пределах области трехмерной интерпретации кривых МТЗ, совмещенная со схемой металлогенического районирования рассматриваемой территории [Прогнозно-минерагеническая..., 2002]. Черные линии – профили МТЗ, обозначенные в соответствии с легендой к рис. 1 буквами “а–ж”; серые – границы металлогенических зон; цифры в кружках 1–10 – номера прогнозных областей рудопроявлений



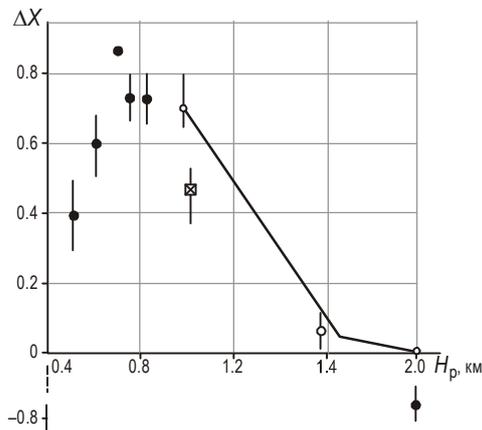
При составлении схемы рассматривались эталонные рудные объекты на картах зон рудной минерализации с соответствующими типами полезных ископаемых, взятых с металлогенических карт [Рундквист, Волкова, Смирнов, 1988; Государственная ..., 2002]. Предлагаемые для дальнейшего изучения зоны рудопроявлений вынесены на схему металлогенического районирования, приводимую на рис. 8 (на рис. 1 они показаны вместе с эталонными объектами и результатами интерпретации данных МТЗ для зон, не входящих в область трехмерного математического моделирования). Видно, что эти зоны концентрируются вблизи границ минерагенических зон, которые контролируются глубинными разломами. В целом же, рудопроявления в металлогенических зонах, расположенные как вблизи проводящих глубинных разломов, так и в стороне от них, выделяются зонами низких удельных электрических сопротивлений или контактами высоко- и низкоомных пород.

Таким образом, можно утверждать, что метод МТЗ позволяет выделить проводящие участки глубинных разломов, в которых возможно формирование месторождений гидротермального типа или месторождений, связанных с зоной графитизации. На прогнозной схеме области рудопроявлений расположены на профилях МТЗ Можарка–Кызыл–Эрзин, Саглы–Самагалтай, Тэлли–Сарыг–Сеп, Шивилинг–Ак–Чарыз и Бояровка–Азас и соответствуют следующим видам минерализации: 1 – Cu, Mo; 2 – Fe; 3, 4 – As; 5 – Pb, Zn; 6 – Co, Pb, Cu, Ni; 7 – Co, Cu, Ni; 8 – Co, Cu, Ni, Ag; 9 – Zn, Pb, Cu; 10 – Cu, Co. Большинство этих зон, соответствующих на геоэлектрических разрезах низкоомным участкам, связано с рудной минерализацией гидротермального типа.

О надежности представленных на схеме данных о глубинах до проводящих объектов (см. рис. 1), их проводимости и содержании связанной доли флюида можно судить по оценке разрешающей способности рассматриваемых типов кривых МТЗ.

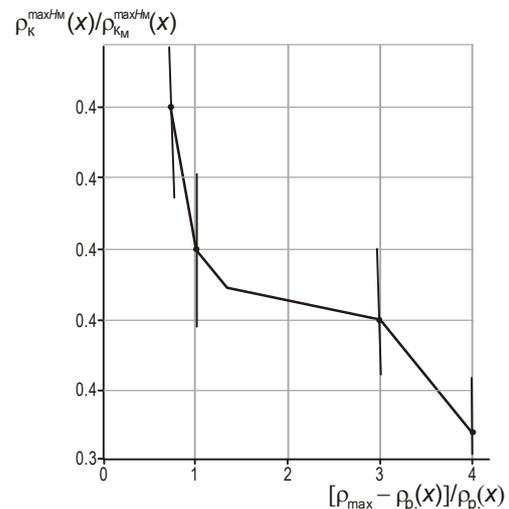
### Оценка разрешающей способности и информативности кривых МТЗ

Оценка разрешающей способности кривых МТЗ к параметрам разломов выполнена по относительному отклонению кажущегося удельного сопротивления у модельных кривых  $\Delta(x, T) = [\rho_k^{\max H_M}(x, T) / \rho_{kM}^{\max H_M}(x_M, T) - 1]$  от изменения глубины залегания кровли разлома  $H_p$  (рис. 9), где  $\rho_k^{\max H_M}(x, T)$  – значения кажущегося УЭС в модели с рассматриваемым вектором параметров  $(x)$  на периоде  $T$ , а  $\rho_{kM}^{\max H_M}(x_M, T)$  – его максимальное значение на том же периоде. Анализировалась также зависимость  $\rho_k^{\max H_M}(x, T) / \rho_{kM}^{\max H_M}(x_M, T)$  от параметра  $[\rho_{\max} - \rho_p(x)] / \rho_p(x)$ , где  $\rho_{\max}$  – максимальное значение кажущегося удельного электрического сопротивления на периоде  $T=1$  с;  $\rho_p(x)$  – значение сопротивления разлома в модели с вектором параметров  $x$  (рис. 10).



**Рис. 9.** Зависимость относительного отклонения  $\Delta x$  для периода  $T=1$  с от глубины расположения кровли разлома  $H_p$  в модели, приводимой на рис. 5

Кружки без заливки – расчеты в т.н. 124 (нет контакта с чехлом); кружки с заливкой – в т.н. 127 (есть контакт с чехлом); квадрат – в т.н. 124 (разлом в стороне от т.н. 107). Вертикальные отрезки – изменения  $\Delta x$  при введении 20 % погрешности подбора



**Рис. 10.** Зависимость  $\rho_k^{\max H_M}(x) / \rho_{kM}^{\max H_M}(x)$  от  $[\rho_{\max} - \rho_p(x)] / \rho_p(x)$ , где  $\rho_p(x)$  – УЭС разлома,  $\rho_{\max}$  – максимальное значение кажущегося УЭС кривых в т.н. 90 на периоде  $T=1$  с

Вертикальные отрезки – изменение  $\rho_k^{\max H_M}(x) / \rho_{kM}^{\max H_M}(x)$ , при введении 20 % погрешности подбора кривых  $\rho^{\max H_M}(x)$

Анализ проводился с использованием данных по профилям Тээли–Сарыг–Сеп и Шивилинг–Ак–Чарыз (см. рис. 5, б, в). Результаты оценки разрешающей способности по другим профилям приведены в [Белявский, 2014].

*Профиль Тээли–Сарыг–Сеп.* Под т.н. 104 модели (см. рис. 5, в) на периодах  $T < 0.2$  с глубина до кровли проводящего блока  $H_{cr}$ , определенная по кривым  $\rho_{кМ}^{maxHМ}$ , близка к модельной  $H_p = 1.5$  км. Приближение к “чехлу” кровли разлома с 2 км до 1 км ведет к росту  $\Delta(x, 1)$  от 0.05 до  $\Delta(x, 1) = 0.5$  (см. рис. 9), что выше погрешности подбора  $\rho^{maxHМ}$  к  $\rho^{maxH}$ . Для блока с  $\rho = 10$  Ом·м, залегающего на глубине  $Z = 40\text{--}30$  км, получаем  $H_{cr} = 20\text{--}30$  км. Под т.н. 107 погружение кровли Восточно-Таннуольского разлома от 0.6–0.7 до 1 км приводит к росту  $\Delta(x, 1)$  с 0.5 до 0.7. При относительной погрешности  $\bar{\delta}^{ZmaxH}$ , составляющей 10 %, чувствительность  $\Delta(x, 1)$  изменяется от 0.4–0.6 в первом случае до 0.56–0.84 во втором (см. рис. 9). Если разлом не контактирует с чехлом, то увеличение  $H_p$  от 0.5 до 2 км ведет к росту  $\Delta(x, 1)$  с 0.4 до 0.8, а с учетом погрешности с 0.32–0.48 до 0.64–0.96; на периоде  $T = 90$  с  $\Delta(x, 90)$  растет с 0.3 до 0.9.

Таким образом, метод МТЗ достаточно надежно картирует положение верхних проводящих блоков. Однако, если точка наблюдения находится в стороне от разлома, то проводник залегающий на глубине  $Z = 30$  км выделяется как залегающий на глубине 35 км.

*Профиль Шивилинг–Ак–Чарыз.* Из зависимости  $\rho_{кМ}^{maxHМ}(x, T) / \rho_{кМ}^{maxHМ}(x_M, T)$  от  $[\rho_{max} - \rho_p(x)] / \rho_p(x)$  (см. рис. 10) в т.н. 63–64 (см. рис. 5, б) следует, что рост сопротивления разлома  $\rho_p$  от 30–40 до 180 Ом·м приводит к увеличению  $\rho_{кМ}^{maxHМ}(x, 1)$  в 2.3 раз, а  $\Delta(x, 1)$  уменьшается с 0.63 до 0.2 при  $\rho_p = 180$  Ом·м и до 0.38 при  $\rho_p = 100$  Ом·м. Можно показать, что относительная погрешность подбора  $\bar{\delta}^{ZmaxH}$ , составляющая 10 %, ведет к росту погрешности оценки  $\rho_p$  до 100–200 %. В т.н. 163 (см. рис. 4, рис. 5, б) изменение  $\rho_p$  от 100 до 170 Ом·м вблизи Уюкского разлома при его мощности  $H_1 = 1$  км и  $\rho_3$  у пласта, расположенного под верхним блоком, показало, что уменьшение  $\rho_3$  с 100 до 30 Ом·м у блока, залегающего на  $H_3 = 5\text{--}10$  км, с учетом погрешности  $\bar{\delta}^{ZmaxH} = 10$  % существенно не влияет на оценку глубины залегания корового проводника.

В результате модельных исследований установлено, что чувствительность кривых  $\rho^{maxHМ}$  позволяет картировать кровлю проводника, оценивать наличие его контакта с проводящими блоками в условиях изменения параметров верхней части разреза даже при 20-процентной погрешности подбора модельных кривых к экспериментальным (см. рис. 9, 10). Оценка же удельного электрического сопротивления проводящего блока достаточно грубая. Глубины до проводников в нижней коре и их УЭС при неоднородной верхней части разреза определяются со значительной погрешностью.

Информативность кривых МТЗ оценивалась для кривых  $\rho^{maxHМ}$ ,  $\rho^{minHМ}$ ,  $\rho_{xy}^M$  и  $\rho_{yx}^M$  по степени близости разрезов  $\rho(H)$  к распределению УЭС с глубиной –  $\rho(Z)$  в модельных точках наблюдения, отвечающих положению экспериментальных зондирований [Белявский, 2014]. Например, для Пр. 1zx (Саглы–Самагалтай, см. рис. 5, е) в т.н. 1 разрезы  $\rho(H)$  максимальных кривых  $\rho^{faz2M}$ ,  $\rho_{yx}^M$  и  $\rho^{maxHМ}$  качественно отображают изменение  $\rho(Z)$  до глубины 50 км и отвечают значениям  $\rho(Z)$  до 1 км, а  $\rho(H)$  кривых  $\rho^{minHМ}$  близки к модельным  $\rho(Z)$  до глубины 3 км.

Разрезы  $\rho(H)$ , полученные в т.н. 9 по кривым  $\rho_{xy}^M$  и  $\rho^{maxHМ}$ , близки между собой до кровли разлома, составляющей 1 км ( $\rho_p = 50$  Ом·м). На больших глубинах одномерная инверсия кривых  $\rho^{maxHМ}$  качественно восстанавливает изменение  $\rho(Z)$  разреза до 100 км, а кривых  $\rho_{xy}^M$  только до 30 км. Одномерная инверсия кривых  $\rho^{minHМ}$ ,  $\rho_{yx}^M$  дает аналогичные результаты, качественно близкие к разрезу  $\rho(Z)$  для глубин 2–3 км. В т.н. 19–20,

расположенных вблизи разлома, контактирующего с высокоомным блоком,  $\rho(H)$  кривых  $\rho^{\min H_m}$  и  $\rho_{yx}^m$  определяет глубину до проводящего разлома (при  $Z_p=1$  км), а максимальные  $\rho_{xy}^m$  и  $\rho^{\max H_m}$  отражают разрез до глубины 100 км.

Из рассмотрения результатов для остальных профилей МТЗ, представленных в [Белявский, 2014] следует, что одномерная инверсия инвариантных кривых не всегда восстанавливает разрез  $\rho(Z)$  даже качественно. Так, для кривых  $\rho^{\min H_m}$  примерное соответствие между  $\rho(H)$  и  $\rho(Z)$  отмечается только до глубин 1–5 км, а для кривых  $\rho^{\max H_m}$  до  $Z=10–40$  км  $\rho(Z)$  только качественно отображает  $\rho(H)$ . Графики  $\rho(H)$ , полученные для кривых  $\rho^{\text{faz}2m}$ , отражают изменение  $\rho(Z)$  до  $Z=100–300$  км.

Сведения об информативности различных типов кривых МТЗ позволяют выбрать при интерпретации тот тип кривой, который при построении стартового геоэлектрического разреза дает наиболее верное представление о нем.

### Заключение

1. Интерактивный подбор кривых  $\rho^{\max H_m}$ ,  $\rho^{\min H_m}$  и фаз  $\text{Arg}Z^{\max H_m}$ , рассчитанных для серии трехмерных моделей, к соответствующим экспериментальным кривым позволил построить геоэлектрические модели центральной части Алтае-Саянского региона (см. рис. 4, 5). Отбракованы аномалии УЭС, связанные с проводниками верхнего структурного этажа (впадины, русла рек, конусы выноса галечников и т.д.) от аномалий, вызванных проводящими глубинными разломами и блоками коры. Исследования на трехмерных моделях показали, что большинство вертикальных блоков с  $\rho=10–200$  Ом·м проявляются теми же пониженными значениями  $\rho(H)^m$  на кривых  $\rho^{\max H_m}$  (см. рис. 5), что и экспериментальные с  $\rho(H)=300–1000$  Ом·м, при фоновых  $\rho(H)\approx 10000$  Ом·м на стартовых разрезах [Белявский, 2014]. В результате, оценены значения удельного электрического сопротивления глубинных разломов, коровых проводников и окружающих их формаций.

2. Рудопроявления гидротермального типа, расположенные в пределах активизированных в настоящее время глубинных разломов, выделяются низкими значениями удельного электрического сопротивления (см. рис. 1, 5). Устанавливается взаимосвязь между проводящими разломами, блоками пониженных сопротивлений и расположением в них (или в непосредственной близости к ним) рудных и неметаллических месторождений полезных ископаемых гидротермального типа. Этот тип месторождений, обусловлен влиянием гидротерм проводящих глубинных разломов, активизированных современными тектоническими движениями. Основными факторами, влияющими на понижение сопротивления в области разломов, являются достаточно высокая трещиноватость слагающих их пород, дилатансия и заполнение пустот водным флюидом ювенильного или приповерхностного генезиса. Эти глубинные разломы расположены в офиолитовых поясах, в базальт-риолитовых или базальт-андезитовых формациях и на зеленосланцевых выступах байкалид (см. рис. 1). Часть из них служила обучающими объектами, а низкие  $\rho_p$  – поисковым признаком. Прогнозная карта зон рудной минерализации в границах рассматриваемой в статье геоэлектрической трехмерной модели представлена на рис. 8 с указанием соответствующих типов полезных ископаемых (в ее описании), взятых с минералогических карт [Рундквист, Волкова, Смирнов, 1988; Государственная..., 2002]. Ряд выделенных низкоомных зон по своему положению близок к положению низкоомных графитизированных комплексов, расположенных в верхней части разреза. Например, графитизированные сланцы нижнего кембрия и верхнего протерозоя также выделяются пониженными значениями  $\rho(H)$  на МТЗ 160–161 и МТЗ 53–54 (см. рис. 1).

3. Во впадинах региона с пониженным удельным сопротивлением блоков коры преобладают растягивающие горизонтальные напряжения меридионального и северо-западного направлений, а на поднятиях и горных хребтах – сжимающие. Это связано с восходящими и нисходящими внутрикоровыми и мантийными движениями [Ребецкий, Кучай, Маринин, 2013]. Растягивающие напряжения способствуют поступлению флюида в верхнюю часть коры и снижению её сопротивления. К востоку и северу от Кызылской впадины на глубинах более 30 км температура превышает 600 °С, а на границе Мохоровичича ( $H=50-55$  км) становится  $>800^\circ$  [Геологическое . . ., 1988]. Этого оказывается достаточно для начала дегидратации пород до гранулитовой фации метаморфизма [Браун, Массет, 1984], формирования флюидопотоков и понижения удельного электрического сопротивления до 50–200 Ом·м в разломах северо-восточного и широтного простирания.

Низкоомные блоки с  $\rho=10-30$  Ом·м на глубинах  $H_{cr}=10-30$  км под Кызылской, Улуг-Хемской впадинами (Каа-Хемская рифтовая зона) при среднем в регионе значении  $H_{cr}=40$  км (см. рис. 5, б–д, рис. 1), возможно, связаны с зоной влияния, протягивающейся на запад Байкальской рифтовой системы [Курганьков, 2001], которая характеризуется относительно низкоскоростной нижней корой. Согласно томографической модели [Булин, Егоркин, 2000], снижение скоростей продольных волн  $V_p$  на 1–2 % в коре и верхней мантии под Кызылской впадиной (см. рис. 4) может объясняться повышенной проницаемостью пород этих блоков, следствием чего становится относительно высокая концентрация в этой области рудных полезных ископаемых и низкие значения удельного электрического сопротивления.

4. Следует констатировать, что при соответствующей одномерной и трехмерной интерпретации метод МТЗ может быть использован для выделения признаков оруденения и картирования в комплексе с другими геофизическими методами зон, узлов и полей месторождений гидротермального типа или месторождений, связанных с графитизацией пород.

### Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам Красноярского научно-исследовательского института геологии и минерального сырья (КНИИГиМС) и Всероссийского научно-исследовательского института геофизических методов разведки (ВНИИГеофизика) за предоставленные полевые материалы, первичную обработку магнитотеллурических данных и участие в составлении и написании отчетов по Алтае-Саянскому региону.

### Литература

- Белявский В.В. Геоэлектрическая модель Алтае-Саянской складчатой области. Ч. I, II. Deutschland, Saarbrücken, LAP-LAMBERT Academic Publishing, 2014. Ч. I – 251 с., Ч. II – 186 с.
- Белявский В.В., Ракитов В.А. Флюидонасыщенность очаговых зон землетрясений Алтае-Саянского региона // Разведка и охрана недр. 2012. № 3. С.40–47.
- Белявский В.В., Шейнкман А.Л. Геоэлектрическая модель центральной части Алтае-Саянского региона // Разведка и охрана недр. 2015. № 2. С.30–35.
- Браун Д., Массет А. Недоступная Земля. М.: Мир, 1984. 262 с.
- Булин Н.К., Егоркин А.В. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М.: Центр ГЕОН, 2000. 194 с.
- Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 7. Кн. 1. Л.: Недра, 1988. 300 с.

- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта полезных ископаемых. Алтае-Саянская серия / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Федеральное агентство по недропользованию. СПб.: ВСЕГЕИ, 2002.
- Друскин В.Л., Книжнерман Л.А. Спектральный полудискретный метод для численного решения трехмерных нестационарных задач в электроразведке // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 8. С.63–74.
- Краснораменская Т.Г., Лобацкая Р.М. Объемная неотектоническая разломно-блоковая модель Алтае-Саянской складчатой области и сейсмический процесс // Тектонофизика и актуальные вопросы науки о Земле. М.: ИФЗ РАН, 2008. С.267–269.
- Курганьков П.П. Геодинамическая обстановка сейсмоактивных районов Алтае-Саянской области и проблема внутриконтинентального рифтогенеза // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С.31–44.
- Попов В.С. Геология и генезис медно- и молибден-порфировых месторождений. М.: Наука, 1977. 203 с.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. Напряженное состояние и деформация земной коры Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 2. С.271–291.
- Рундквист Д.В., Волкова В.М., Смирнов В.И. Металлогения СССР: Комплект карт 16 регионов страны. Масштаб 1:1500000. Л.: ВСЕГЕИ, 1988.
- Прогнозно-минерагеническая карта: Схема металлогенического районирования России (с объяснительной запиской). Масштаб 1: 5000000 / Ред. Г.С. Гусев. М.: Геокарт, ИМГРЭ, 2002.
- Шейнкман А.Л., Нарский Н.В. Карта суммарной электропроводности осадочного чехла территории России // Электромагнитные зондирования Земли: Материалы IV Всесоюзной школы-семинара по электромагнитным зондированиям. М.: ИФЗ РАН, 2009. С.45–46.
- Counil J.L., le Mouel J.L., Menvielle M. Associate and conjugate directions concepts in magnetotellurics // Annales Geophysicae. Series B. Terrestrial and Planetary Physics. 1986. V. 4, N 2. P.115–130.
- Caldwel T.G., Bibby H.M., Brown C. The magnetotelluric phase tensor // Geophys. J. Int. 2004. V. 158, N 2. P.457–469. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>.
- Marti A., Queralt P., Jones A.G., Ledo J. Improving Bahr's invariant parameters using the WAL approach // Geophys. J. Int. 2005. V. 163, N 1. P.38–41. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02748.x>.
- Shankland T.I., Waff H.S. Partial melting and electrical conductivity anomalies in the upper mantle // J. Geophys. Res. Solid Earth and Planets. 1977. V. 82. P.5409–5417. DOI: 10.1029/JB082i033p05409.
- Siripunvaraporn W., Uyeshima M., Egbert G. Three-dimensional inversion for Network-magnetotelluric data // Earth Planets Space. 2004. V. 56, N 9. P.893–902. DOI: <https://doi.org/10.1186/BF03352536>.

#### Сведения об авторах

**БЕЛЯВСКИЙ Виктор Владимирович** – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Центр геоэлектромагнитных исследований – Филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 108840, г. Москва, г. Троицк, ИЗМИРАН, а/я 30. Тел./Факс: +7(495) 840-70-62. E-mail: [gemri@igemi.troitsk.ru](mailto:gemri@igemi.troitsk.ru)

**ШЕЙНКМАН Александр Львович** – член-корреспондент РАЕН, директор, ООО “Институт геодинамики” РАЕН. Москва, Варшавское шоссе, д. 8. Тел.: +7(985) 824-22-17. E-mail: [geodinam@yandex.ru](mailto:geodinam@yandex.ru)

**КЛИПКО Виктор Алексеевич** – кандидат геолого-минералогических наук, заместитель директора по научной работе, Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов. 121357, Москва, ул. Вересаева, д. 15. Тел.: +7(495) 447-84-28. E-mail: [geochem-map@imgre.ru](mailto:geochem-map@imgre.ru)

# CAPABILITY OF GEOELECTRICS FOR SOLVING PROBLEMS OF REGIONAL AND ORE GEOPHYSICS: CASE STUDY IN THE ALTAI-SAYAN REGION

V.V. Belyavsky<sup>1</sup>, A.L. Sheinkman<sup>2</sup>, V.V. Kilipko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Geoelectromagnetic Research Center, Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Geodynamics of the Russian Academy of Natural Science, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements, Moscow, Russia*

**Abstract.** The results of studying the magnetotelluric method capability for revealing potential ore-bearing regions are presented. The investigations were carried out within the metallogenic zones of the Western Sayan and Tuva, for which data of dense magnetotelluric (MT) observations are available. Our study was greatly facilitated by the fact that earlier one of the authors had already considered in detail the problems associated with the analysis of experimental and model impedance matrices, the results of 1D and 2D inversions of maximal and minimal curves, the construction of starting geoelectric cross-sections, the analysis of the impedance matrix for 3D models. The setting of the structural and formational zones of the Western Sayan and Tuva and their ore mineralization are described. The methodology of 3D interpretation of magnetotelluric sounding curves is outlined. MT data interpretation involved the determination of striking of regional structures, of the phase tensor axes and of the impedance matrix dimension; the dispersion relations were verified for invariant maximal (minimal) experimental and model impedances; electrical noise from near-surface inhomogeneities was removed. The initial geoelectric model was constructed on the basis of 1D inversion of normalized curves of apparent electrical resistivity, and 3D mathematical modeling of MT fields provided the solution of the inverse problem, the calculation of electrical conductivity of vertical (faults) and horizontal crustal blocks, and the estimation of resolution of determining the parameters of the conducting blocks. The resulting 3D model was reconstructed using interactive fitting of 3D model curves to the experimental ones with an estimate of uncertainties. To reveal the potential ore-bearing areas, the electrical conductivity of blocks with known types of ore occurrence was first determined, and then these types of minerals were associated with the low-resistivity blocks in the given structural unit. As a result, 3D geoelectric models of the metallogenic zones of the Western Sayan and Tuva were constructed. It is shown that the areas of hydrothermal mineralization are concentrated near the deep faults characterized by a low electrical resistivity related to an increased content of fluid in the pores and matrix of rock formations. Using this indicator together with the data obtained in the adjacent areas of the Altai-Sayan region, potential ore-bearing zones were identified.

**Keywords:** magnetotelluric sounding, 3D modeling of magnetotelluric fields, mineralization, Altai-Sayan region

## References

- Belyavskii V.V. *Geoelektricheskaya model Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti* (Geoelectric model of the Altai-Sayan region), p. I, II, Saarbrücken: LAP-LAMBERT Academic Publishing, 2014.
- Belyavskii V.V. and Rakitov V.A. Fluid-filled focal zones earthquakes of the Altai-Sayan region, *Razvedka i okhrana nedr* (Prospect and protection of mineral resources), 2012, no. 3, pp. 40-47.
- Belyavskii V.V. and Scheinkman A.L. Geoelectric model of the central part of the Altai-Sayan region, *Razvedka i okhrana nedr* (Prospect and protection of mineral resources), 2015, no. 2, pp. 30-35.
- Brown G.C. and Mussett A.E., *The inaccessible earth*, London: Allen & Unwin, 1981.
- Bulin N.K. and Egorkin A.V. *Regional'nyi prognoz neftegazonosnosti nedr po glubimym seismicheskim kriteriyam* (Regional forecasting of oil and gas potential based on seismic criteria), Moscow: GEON, 2000.
- Caldwel T.G., Bibby H.M., and Brown C. The magnetotelluric phase tensor, *Geophys. J. Int.*, 2004, vol. 158, no. 2, pp. 457-469. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>
- Counil J.L., le Mouel J.L, and Menvielle M. Associate and conjugate directions concepts in magnetotellurics, *Annales Geophysicae. Series B. Terrestrial and Planetary Physics*, 1986, vol. 4, no. 2, pp. 115-130.
- Druskin V.L. and Knizhnerman L.A. Spectral semi discrete method for numerical solution of three-dimensional nonstationary problems in electric prospecting, *Izv., Phys. Solid Earth*, 1988, no. 8, pp. 63-74.
- Geologicheskoe stroenie SSSR i zakonmernosti razmeshcheniya poleznykh iskopaemykh* (Geological structure of the USSR and regularities in the location of minerals, ed. Kozlovskii E.A., Leningrad: Nedra, 1988.

- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Karta poleznykh iskopaemykh* (State geological map of Russian Federation. Map of minerals, St.-Petersburg: VSEGEI, 2002.
- Krasnoramenskaya T.G. and Lobatskaya R.M. Volume neotectonic fault-block modle of the Altai-Sayan folded region and seismic process, *Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauki o Zemle* (Tectonophysics and topical problems in Earth sciences, Moscow: IFZ RAN, 2008, pp. 267-269.
- Kurgan'kov P.P. Geodynamical state of seismically active regions of the Altai-Sayan area and the problem of the continental rifting, *Geologiya i mineral'nye resursy Tsentral'noi Sibiri* (Geology and mineral resources of the Central Siberia), Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 31-44.
- Marti A., Queralt P., Jones A.G., and Ledo J. Improving Bahr's invariant parameters using the WAL approach, *Geophys. J. Int.*, 2005, vol. 163, no. 1, pp. 38–41. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2005.02748.x>
- Popov V.S. *Geologiyai genesis medno- i molibden-porfirovykh mestorozhdenii* (Geology and genesis of copper- and molybdenum-porphyry deposits), Moscow: Nauka, 1977.
- Prognozno-mineragenicheskaya karta: Skhema metallogenicheskogo raionirovaniya Rossii Masshtab 1:1500000* (Forecast-mineragenic map: Scheme of metallogenic zoning of Russia. Scale 1: 5000000), ed. Gusev G.S., Moscow: Geokart, IMGRE, 2002.
- Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., and Marinin A.V. Stress and deformation of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountainous region, *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no.2, pp. 271-291.
- Rundkvist D.V., Volkova V.M., and Smirnov V.I. *Metallogeniya SSSR. Masshtab 1:1500000* (Metallogeny of the USSR. Scale 1:1500000), Leningrad: VSEGEI, 1988.
- Shankland T.I. and Waff H.S. Partial melting and electrical conductivity anomalies in the upper mantle, *J. Geophys. Res. Solid Earth and Planets*, 1977, vol. 82, pp. 5409–5417. DOI: 10.1029/JB082i033p05409.
- Sheinkman A.L. and Narskii N.V. Map of the total electrical conductivity of the sedimentary cover of the Russian territory, *Elektromagnitnye zondirovaniya Zemli* (Electromagnetic soundings of the Earth), Proc. IV All-Union School-Seminar on Electromagnetic Sounding, Moscow: IFZ RAN, 2009, pp. 45–46.
- Siripunvaraporn W., Uyeshima M., and Egbert G. Three-dimensional inversion for Network-agnetotelluric data, *Earth Planets Space*, 2004, vol. 56, no. 9, pp. 893–902. DOI: <https://doi.org/10.1186/BF03352536>.