

ВЛИЯНИЕ «ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ШУМА» НА ДАННЫЕ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И СПОСОБЫ ЕГО УЧЁТА

Поспеев А. В., Сень Е. А.

Аннотация

Статья посвящена проблемам интерпретации магнитотеллурических данных в условиях слабопроводящей дифференцированной верхней части разреза. Поскольку зачастую сеть наблюдений не позволяет полностью описать пространственный спектр неоднородностей, использование 3D-инверсии данных сталкивается с существенной пространственной эквивалентностью решения. Рассмотрен характер влияния неоднородной структуры проводимости верхней части разреза на одном из участков, детально изученным методом становления поля в ближней зоне по плотным 3D сетям. Предложено методическое решение, заключающееся в выборе направлений минимального градиента аномалиеобразующей проводимости и отборе соответствующих квазипродольных кривых для оценки более глубинных параметров модели. Показано преимущество использования квазипродольных кривых; приведён пример высокой геологической эффективности разработанной методики интерпретации магнитотеллурических данных на одном из участков Сибирской платформы.

Ключевые слова:

Магнитотеллурическое зондирование, индукционные и гальванические эффекты, импеданс, проводимость, интерпретация, квазипродольная кривая

ВЛИЯНИЕ «ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ШУМА» НА ДАННЫЕ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И СПОСОБЫ ЕГО УЧЁТА

А.В. Поспеев^{1,2}, Е.А. Сень^{1,3}

¹ *ФГБУН Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128,
Россия*

² *ФГБУН Иркутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия*

³ *ООО «СИГМА-ГЕО», 664011, Иркутск, ул. Звездинская, 6, Россия*

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на то, что вопросам методики интерпретации данных магнитотеллурического зондирования (МТЗ) посвящено огромное количество публикаций, до настоящего времени не существует реализованных алгоритмов интерпретации, позволяющих получать максимально надёжную геологическую информацию в любых геологических условиях. Это объясняется достаточно сложным характером влияния негоризонтальных элементов геоэлектрического разреза на структуру магнитотеллурического поля Земли. При этом, негоризонтальные эффекты имеют аддитивный характер, так что разделение влияния разноэтажных неоднородностей также является проблемой.

С теоретической точки зрения для восстановления изучаемого геоэлектрического разреза необходимо лишь применение соответствующих размерности среды процедур инверсии. Однако, наиболее полно учитывающие размерность среды процедуры 3D-инверсии чрезвычайно времязатратны. Кроме того, нерегулярность сетей наблюдения приводит к проявлению эффектов пространственной эквивалентности. Это предопределяет возможность использования упрощённых методик интерпретации, использующие пониженные размерности инверсии. Практически, в большинстве случаев весьма существенным геоэлектрическим контрастом объектов характеризуется верхняя часть разреза. В силу слияния различных экзогенных процессов она часто сильно дифференцирована в геоэлектрическом отношении и является сильным аномалиеобразующим объектом.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Результаты модельных расчётов [Дмитриев и др., 1975] показали, что все типы влияний негоризонтальных неоднородностей на кривые МТЗ разделяются на два класса: индукционные и гальванические. Первые из них связаны не только с вертикальным, но и латеральным распространением электромагнитного поля при продольном относительно двумерных структур протекании магнитотеллурического тока. Вторые обусловлены формированием в неоднородной части разреза избыточного или недостаточного количества зарядов при поперечном возбуждении геоэлектрических объектов.

Гальванические эффекты являются основным фактором, осложняющим поведение кривых МТЗ [Бердичевский, Жданов, 1981]. За счёт недостатка или избытка зарядов в неоднородном слое правые ветви кривых испытывают параллельный сдвиг по оси ординат, так называемый «static shift». Для чисто двумерных структур соотношение кажущихся сопротивлений поперечной и локально однородной кривых описываются простым соотношением:

$$\rho^{\perp} = \rho_{1D} \left(\frac{S_i}{S_e} \right)^{\alpha} = \rho_{1D} \cdot K_{эз}, \quad (1)$$

где ρ^{\perp} – сопротивление поперечной кривой в диапазоне влияния гальванического эффекта; ρ_{1D} – сопротивление кривой, соответствующей локально одномерному разрезу; S_i , S_e – соответственно проводимость внутри и интегральная проводимость снаружи неоднородности; α – степенной коэффициент, примерно равный углу арктангенсу угла наклона восходящей асимптоты кривой МТЗ [Дмитриев и др., 1975], $K_{эз}$ – коэффициент гальванического экранирования.

МЕТОДИКА ОЦЕНОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сглаженная проводимость S_e в формуле (1) может быть представлена в виде свёртки значения проводимости слоя и коэффициентов «гальванического» фильтра:

$$S_e = f_i * S_j,$$

где f_i – пространственная характеристика фильтра, S_j – распределение проводимости. Первая зависит от глубины расположения неоднородности и «жёсткости» нижележащего геоэлектрического экрана. На рис. 1 приведены импульсные характеристики «гальванического» фильтра, для крайнего левого блока модели, приведённой на рис. 4А, при расположении неоднородностей в надэкранной толще и между непроводящим экраном и фундаментом.

В случае приповерхностной неоднородности фильтр является относительно узким, что объясняется достаточной возможностью «просачивания» поперечных токов. Форма фильтра при положении неоднородности между экраном и фундаментом зависит, кроме того, от «жёсткости» высокоомного экрана. Чем больше произведение продольной проводимости надэкранной толщи и поперечного сопротивления экрана, тем шире переходная характеристика фильтра.

Принцип пространственной фильтрации был распространён на трёхмерный случай. Для этого сформирован 3D-фильтр, в центральном сечении подобный двумерному и затухающий по оси Y по направлениям от центра. Коэффициент гальванического экранирования $K_{г3}$ с использованием подобного фильтра определяется как свёртка отношений S_i/S_e для каждого Y -сечения фильтра с гаусс-подобной кривой. Поскольку коэффициент гальванического экранирования зависит от направления поляризации поля, для каждой расчётной точки он вычисляется, как функция угла направления поля φ .

На вышеописанном принципе авторами была сформирована программа оценки азимутального распределения коэффициента гальванического экранирования.

Непосредственные расчёты проведены с использованием данных о распределении надсолевой проводимости S_1 одной из площадей в пределах Ангаро-Ленской ступени юга Сибирской платформы, изученной методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ) по плотным 3D сетям. Геоэлектрический разрез района исследований содержит 3 геоэлектрических комплекса осадочного чехла, залегающих на высокоомном кристаллическом фундаменте (рис. 2). Суммарная мощность осадков около 3 км, а их интегральная проводимость составляет 30–40 См. Продольное сопротивление комплексов варьирует от первых десятков до первых сотен Ом·м. Следует отметить, что прослой солей, залегающие в среднем – карбонатно-галогенном комплексе, имеют удельное электрическое сопротивление в многие десятки Ом·м. Из-за этого поперечное сопротивление среднего комплекса крайне велико и составляет $(5–10) \cdot 10^7$ Ом·м².

Пространственное распределение параметра S_1 на указанной площади носит сложный трёхмерный характер, что связано с вариациями геологических характеристик надсолевого комплекса – влиянием разломной тектоники, изменениями гидрогеологической обстановки и т. п.

Для каждой расчётной точки по известным значениям надсолевой проводимости S_1 программа оценивала коэффициент гальванического экранирования с поворотом фильтра по направлению через 22.5°. Полученные в результате этого азимутальные диаграммы $K_{г3}$, совмещались с единичной окружностью (рис. 3).

Анализ результатов расчётов показывает сложный характер распределения азимутальных зависимостей $K_{гз}$, в зависимости от аномалий надсолевой проводимости. Так, в пределах вытянутых проводящих аномалий $K_{гз}$ приближается к 1 в продольном направлении. В пределах непроводящих участков максимальные значения $K_{гз}$ ориентированы поперёк простирания аномалий и наименее экранированы минимальные компоненты. На площади оказывается достаточное количество точек, в пределах которых значения $K_{гз}$ по всем направлениям меньше или больше 1. Можно также отметить, что на определённой части расчётных точек кривые азимутального распределения $K_{гз}$ заметно отклоняются от эллиптической формы.

В силу принципа суперпозиции при наличии нескольких этажей неоднородностей происходит суммирование эффектов гальванического экранирования.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

На практике, чаще всего точное распределение параметров неоднородностей, оказывающих преимущественное гальваническое влияние на кривые МТЗ, неизвестно; в этом случае невозможно и оценить реальное соотношение между уровнем поперечной и локально одномерной кривых.

Наличие в руках исследователя аппарата двумерного и трёхмерного моделирования не всегда может быть залогом получения геоэлектрических разрезов, максимально близких к реальным условиям изучаемого региона. Это связано не только с объективными ограничениями аппарата интерпретации, но и очевидным влиянием на надёжность построений существующего недостатка необходимой информации.

Прежде всего, это связано с тем, что сети магнитотеллурических наблюдений, как правило, не позволяют описать весь пространственный спектр неоднородностей. Особенно актуальна данная проблема для неоднородностей, расположенных в верхней части разреза (ВЧР). Здесь в силу значительного влияния экзогенных процессов формируются среды с высоким контрастом геоэлектрических свойств. В отличие от процесса регистрации сигналов во временной области в этом случае не могут быть реализованы системы подавления эффекта подмены частот в виде предварительной фильтрации.

С другой стороны, неоднородности ВЧР крайне редко являются самостоятельным объектом изучения при проведении магнитотеллурических исследований. Поэтому, главной задачей интерпретатора является адекватный учёт их влияния на кривые МТЗ с целью получения максимально достоверной информации о поведении тех частей разреза, которые имеют поисковый интерес [Зингер, 1992].

Для оценки статистических характеристик реальных геоэлектрических неоднородностей был проведён анализ пространственных параметров проводимости

надсолевого, карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов площадей, расположенных в центральной части Непско-Ботубинской антеклизы, изученных методом ЗСБ по плотным 3D сетям. Шаг между точками составлял 400–600 м, что обеспечивает изучение аномальных объектов размерами более одного километра. Гистограммы распределения ширины и длины аномалий представлены на рис. 4.

Как видно из рисунка, средний размер поперечника аномалий составляет около 1.5 км. Соотношение среднего размера длинной и короткой осей аномалий составляет примерно 2/1. Таким образом, при использовании стандартного шага 2 км будет пропущено примерно 70 % аномалий.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Для оценки возможных влияний параметров неоднородностей на кривые МТЗ с помощью программы 2D-моделирования, разработанной И.Л. Варданынц, были рассчитаны кривые Е- и Н-поляризации для модели, представленной на рис. 5А.

Данная модель сформирована путём инверсии средней квазипродольной кривой МТЗ юга Сибирской платформы с добавлением в среднюю часть надсолевого комплекса неоднородностей, параметры которых заданы случайным образом. На рис. 5Б представлена та же модель, но с увеличенной втрое шириной неоднородных блоков. Результаты расчётов представлены на рис. 6.

Из рисунка видно, что при использовании значений проводимости ВЧР, определённых на точках с шагом 3 км, расчётные графики импедансов существенно отличаются от прореженных.

Осознание необходимости подавления влияния неоднородностей ВЧР побуждает исследователей применять приёмы учёта гальванического сдвига кривых. При этом имеются различные методические подходы. Их можно разделить на 2 группы:

- 3D-инверсия полных матриц импеданса с восстановлением параметров среды на точках наблюдений и между ними;
- селекция импедансов с последующим подавлением гальванических влияний.

Что касается первого варианта, то рис. 6 наглядно показывает, что решение двумерной обратной задачи с использованием данных, наблюдаемых на сети, более редкой, чем высокочастотная пространственная гармоника неоднородностей, связана с существенной неоднозначностью. Серьёзным осложняющим обстоятельством может являться и произвольное направление пересечения неоднородностей профилем наблюдений.

Достаточно распространённым является принцип селекции компонент. При этом используются различные варианты выбора компонент: по направлениям приёмных линий

[Каплун, 2014], преимущественно максимальных [Кузьминых, 1991], минимальных [Эпов и др., 2012].

Для оценки эффективности селекционного принципа проанализируем статистику неоднородностей и собственно импедансов. Из рис. 4 видно, что проводимость неоднородностей распределяется по закону, близкому к логнормальному. Геометрические параметры неоднородностей распределены таким образом, что число изометричных объектов с отношением осей 1:1–1:2 составляет около 15 %, число практически двумерных объектов с отношением осей 1:6 и менее – около 30 %.

В качестве методического приёма, максимально подавляющего влияние, может быть предложен отбор и интерпретация квазипродольных кривых, соответствующих тем направлениям, отношение локальной и внешней проводимости по которым наиболее близко к единице. Алгоритм выбора квазипродольных кривых достаточно прост. В качестве первого приближения используется уровень эффективного импеданса, сглаженного таким образом, чтобы влияние «геологического шума» эффективно подавлялось, а влияние глубинной части разреза искажалось наименее. Затем, отбираются компоненты, наиболее близкие к сглаженному эффективному импедансу и, наконец, проводится завершающее сглаживание отобранных квазипродольных компонент по профилю. Среднеквадратические отклонения отношений компонент к сглаженному эффективному импедансу приведены на рис. 7. Сопоставление показывает, что использование квазипродольных компонент существенно снижает влияние ненулевых градиентов проводимости: для отобранных из $Z_{\max}, Z_{\min}, Z_{\text{eff}}$ (Z_1^{\parallel}) – среднеквадратическое расхождение уменьшается примерно в полтора раза по сравнению с эффективными кривыми; для отобранных из $Z_{\max}, Z_{\min}, Z_{\text{eff}}, Z_{xy}, Z_{yx}$ (Z_2^{\parallel}) – в два раза. Для кривых сопротивлений улучшение составит соответственно в 2 и 4 раза.

Отметим, что квазипродольные кривые обладают несмещённой оценкой. В отличие от этого, компоненты, ориентированные по направлениям главных осей эллипса поляризации, характеризуются систематическим смещением.

Для подавления влияния ненулевых градиентов проводимости по выбранным квазипродольным направлениям эффективным является использование пространственной фильтрации данных. При этом параметры сглаживания выбираются таким образом, чтобы, с одной стороны не допустить нереальной детализации глубоких частей разреза, с другой – отразить фактически существующие глубинные неоднородности.

На рис. 8 представлен сейсмогеоэлектрический разрез, полученный на одной из площадей, расположенной на юго-востоке Сибирской платформы. Здесь интерпретация данных МТЗ для оценки параметров верхней части разреза проведена с использованием

принципов, описанных выше. Для формирования стартовой модели МТЗ привлекались материалы сейсморазведочных работ.

Площадь работ характеризуется сложным геологическим строением (наличием крупных структур разного порядка: Учуро-Майской плиты, Майской впадины и Верхояно-Колымской складчатой системы). Разрез представлен терригенными, терригенно-карбонатными и карбонатными формациями рифея, венда и кембрия, метаморфитами архея.

В результате работ наблюдается согласное поведение геоэлектрических и отражающих границ. Следует отметить отчётливое совпадение положения высокоомных геоэлектрических блоков с зонами выхода кристаллического фундамента на дневную поверхность: в центральной части – Ингилийского штока, в северо-восточной– Нельканской надвиговой зоны.

Также прослеживается корреляция изменения сопротивления и разломов разных направлений и разных порядков, выделенных по данным сейсморазведочных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным типом влияний, вызывающих сдвиг ветвей амплитудных кривых МТЗ, являются гальванические влияния, связанные с наличием градиентов проводимости по направлениям поляризации магнитотеллурического поля. Реальные изменения проводимости слоёв, подстилаемых относительно непроводящими экранами, формируют сложные распределения азимутальных кривых коэффициента гальванического экранирования. Больше, чем в половине случаев возможно определение таких направлений, по которым градиент проводимости близок к нулю и уровень амплитудных кривых МТЗ не искажён.

В условиях сложного и неизвестного характера распределения проводимости слоёв, подстилаемых относительно непроводящими экранами, наиболее эффективным методическим приёмом подавления гальванических влияний является выбор квазипродольных кривых, отвечающих направлениям минимальных градиентов проводимости, и их дополнительная пространственная фильтрация.

Практическое применение данной методики для интерпретации данных МТЗ в различных геоэлектрических условиях показало её высокую геологическую эффективность и хорошую подтверждаемость дальнейшими геофизическими исследованиями.

Статья выполнена в рамках реализации интеграционного проекта «Фундаментальные исследования и прорывные технологии как основа опережающего развития Байкальского региона и его межрегиональных связей».

ЛИТЕРАТУРА

Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра, 1981. 327 с.

Дмитриев В.И., Бердичевский М.Н., Кокотушкин Г.А. Альбом палеток для магнитотеллурического зондирования в неоднородных средах, часть 1. Москва, МГУ, 1975, 100 с.

Зингер Б.Ш. Учёт статических искажений в магнитотеллурике. Обзор // Физика Земли, 1992, №5, с. 53–70.

Каплун В.Б. Геоэлектрические разрезы северо-западного борта Среднеамурского осадочного бассейна (Дальний Восток) по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеанская геология, 2014, т. 33, №6, с. 70–85.

Кузьминых Ю.В. Геоэлектрическое строение Забайкалья по данным магнитотеллурических зондирований // IV Всесоюзный съезд по геомагнетизму: Тез. Докл. Владимир–Суздаль, 1991, с. 138–139.

Эпов М.И., Поспеева Е.В., Витте Л.В. Особенности состава и строения земной коры краевой части Сибирского кратона (в зоне влияния рифтогенных процессов) по данным магнитотеллурических зондирований // Геология и геофизика, 2012, т. 53, №3, с. 380–398.

Рис. 1. Форма фильтра для формирования S_e : двумерный (А) трёхмерный (Б) варианты. 1 – надэкранный; 2 – подэкранный; 3 – с максимальной жёсткостью.

Рис. 2. Геологическая (А, Б) и геоэлектрическая (В) модели района исследований. 1 – песчаники, 2 – мергели, 3 – известняки, доломиты, 4 – соли, 5 – аргиллиты, алевролиты, 6 – кристаллические породы фундамента; Φ – кристаллический фундамент, $\square_{l\ min}$, $\square_{l\ max}$ – примерные минимальные и максимальные значения продольного сопротивления горизонтов.

Рис. 3. Результаты расчёта азимутального распределения $K_{гз}$. 1 – расчётные пункты МТЗ и единичный круг; 2 – азимутальные диаграммы $K_{гз}$: а – $K_{гз} > 1$, б – $K_{гз} < 1$; 3 – изолинии проводимости, См. На врезке сверху: А – азимутальные диаграммы сложной формы, Б – не отклонена по уровню эффективная кривая, В – все кривые выше нормального уровня, Г – не отклонена максимальная кривая, Д – все кривые ниже нормального уровня, Е – не отклонена минимальная кривая.

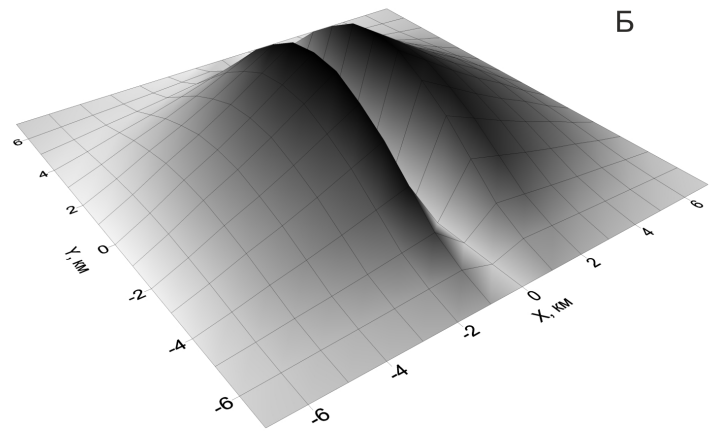
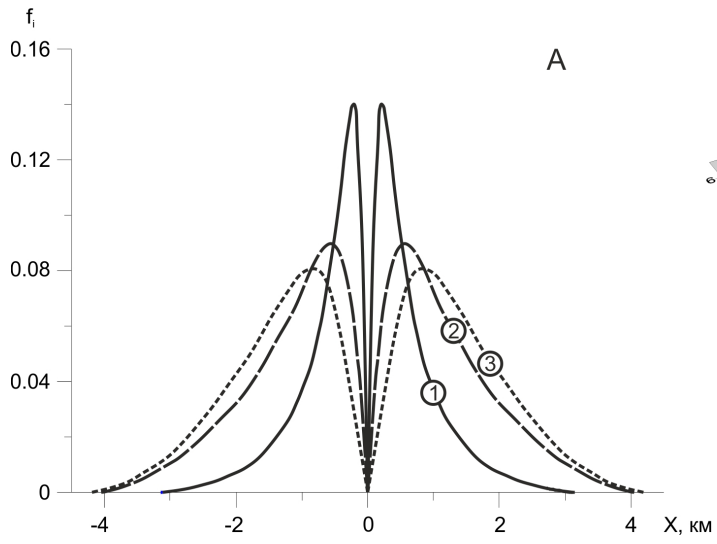
Рис. 4. Гистограммы распределения ширины (1) и длины (2) геоэлектрических аномалий надсолевого геоэлектрического комплекса на восточном склоне Непского свода.

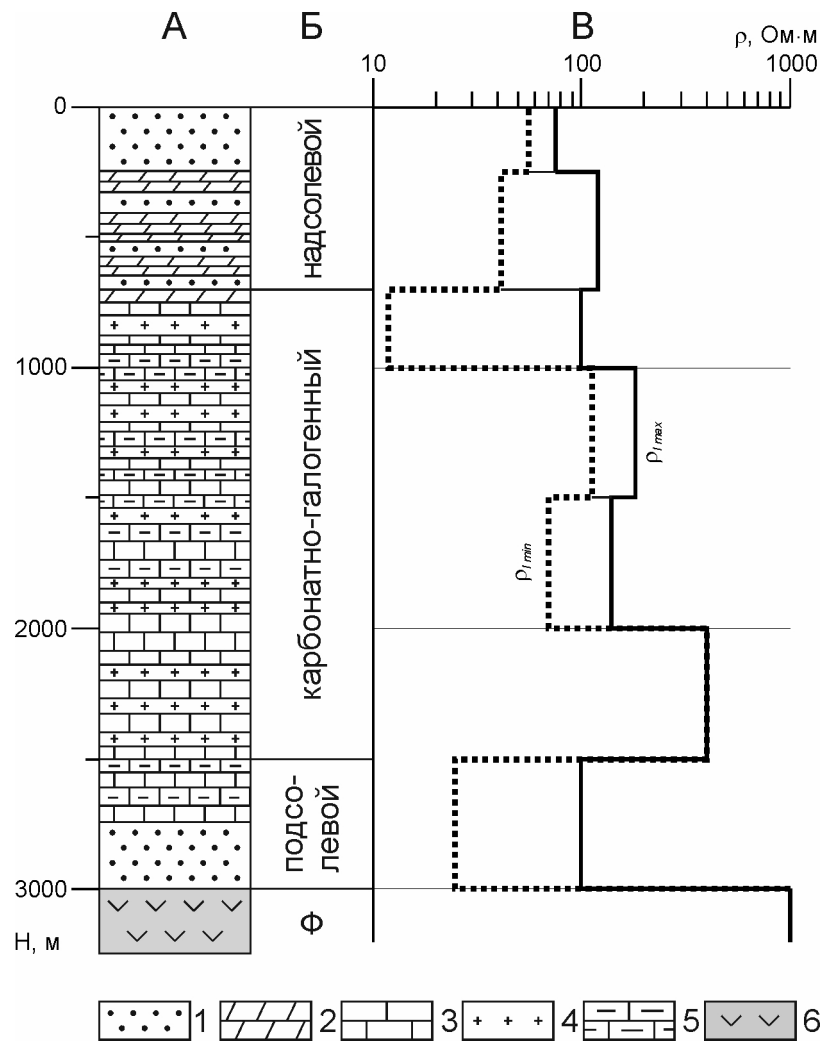
Рис. 5. Расчётные 2D-модели: А – с шириной блоков 3 км; Б – разреженная в 3 раза из модели А; В – легенда.

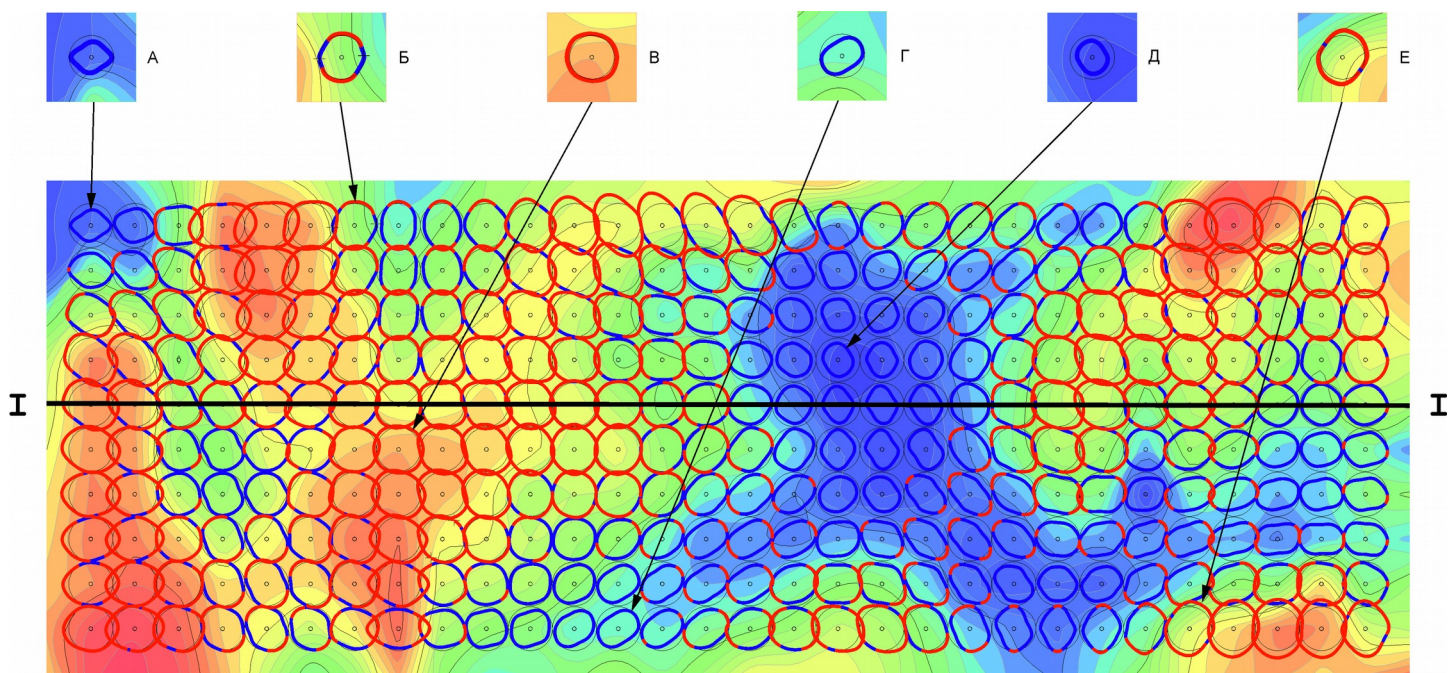
Рис. 6. Графики ρ_T на периоде 36 с. 1 – одномерных кривых в точках наблюдений; 2–4 – поперечных кривых для моделей: 2 – А с шагом 1 км; 3 – А с шагом 3 км; 4 – Б с шагом 3 км.

Рис. 7. Кривые, аппроксимирующие нормальным законом распределения гистограммы отклонений различных компонент импеданса на периоде 36 с от среднего для профиля «Батолит»; 1–7, соответственно: Z_{max} , Z_{min} , Z_{eff} , Z_{xy} , Z_{yx} , квазипродольные, отобранные из Z_{max} , Z_{min} , Z_{eff} (Z_1^{\parallel}); квазипродольные, отобранные из Z_{max} , Z_{min} , Z_{eff} , Z_{xy} , Z_{yx} (Z_2^{\parallel}). В таблице слева вверху приведены среднеквадратические расхождения отклонений компонент.

Рис. 8. Сейсмогеоэлектрический разрез. 1 – пункты МТЗ; 2 – отражающие границы; 3 – тектонические нарушения.







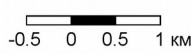
1



2



3



S_1, CM

