Геология и геофизика, 2020, т. 61, № 11, с. 1595—1602

УДК 550.837.211

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

А.В. Поспеев[1,2], Е.А. Сень[1,3]

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

[2] *Иркутский научный центр СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия*

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

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 аномалеобразующей проводимости и отборе соответствующих квазипродольных кривых для оценки более глубинных параметров модели. Показано преимущество использования квазипродольных кривых; приведен пример высокой геологической эффективности разработанной методики интерпретации магнитотеллурических данных на одном из участков Сибирской платформы.

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

INFLUENCE OF “GEOLOGIC NOISE” ON MAGNETOTELLURIC-SOUNDING DATA AND METHODS FOR TAKING IT INTO ACCOUNT

A.V. Pospeev and E.A. Sen’

The paper deals with the problem of interpreting magnetotelluric data in the differentiated low-conductivity upper part of the section. An observation network often makes it impossible to describe a spatial irregularity spectrum completely; so, using 3D data inversion comes across a significant spatial equivalence of the solution. The effect of irregular conductivity of the upper part of the section at one of the sites is considered by the comprehensively studied near-field transient electromagnetic sounding in dense 3D networks. A technique is proposed for choosing the directions of the minimum gradient of anomaly-causing conductivity and for selecting corresponding quasi-longitudinal curves for estimating the deeper parameters of the model. The advantage of using quasi-longitudinal curves is shown, and the high geological efficiency of the developed technique for interpreting magnetotelluric data is demonstrated at one of the sites of the Siberian Platform.

Magnetotelluric sounding, induction and galvanic effects, impedance, conductivity, interpretation, quasi-longitudinal curve

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 надежную 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 применения упрощенных методик интерпретации с пониженной размерностью инверсии. Практически в большинстве случаев весьма существенным геоэлек-

© А.В. Поспеев✉, Е.А. Сень, 2020
✉e-mail: avp@crust.itk.ru
DOI: 10.15372/GiG2019181

трическим контрастом объектов характеризуется верхняя часть разреза. В силу слияния различных экзогенных процессов она часто сильно дифференцирована в геоэлектрическом отношении и является сильным аномалеобразующим объектом.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Результаты модельных расчетов [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 счет 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:

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

где $\rho^{\perp}$ — 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 арктангенсу угла наклона восходящей асимптоты кривой МТЗ [Дмитриев и др., 1975], $K_{\text{гэ}}$ — коэффициент гальванического экранирования.

МЕТОДИКА ОЦЕНОЧНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

$$S_e = f_i \cdot S_j\,,$$

где f_i — пространственная характеристика фильтра, S_j — распределение проводимости. Первая зависит от глубины расположения неоднородности и «жесткости» нижележащего геоэлектрического экрана. На рисунке 1 приведены импульсные характеристики «гальванического» фильтра для крайнего левого блока модели (см. ниже) при расположении неоднородностей в надэкранной толще и между непроводящим экраном и фундаментом.

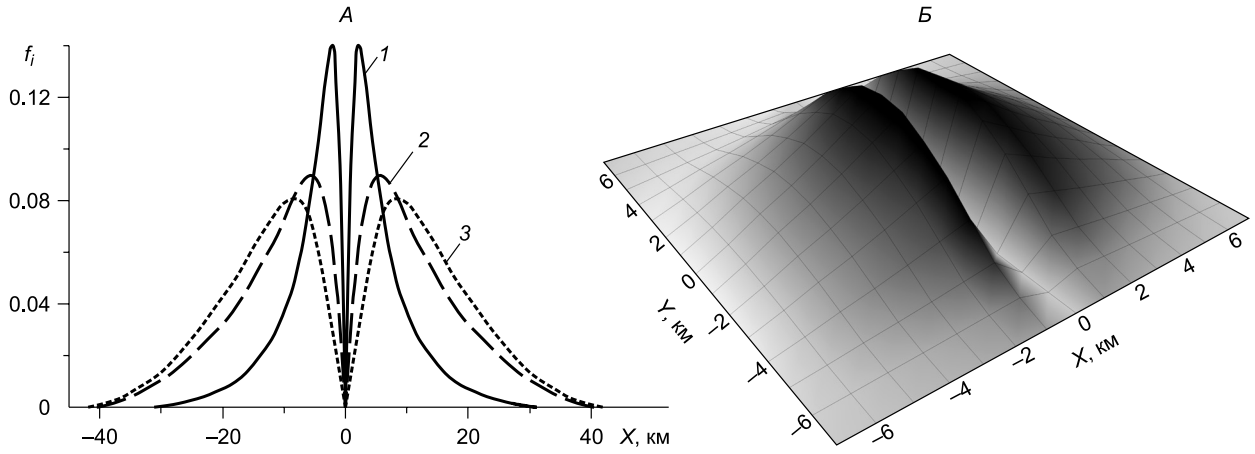

Рис. 1. Форма фильтра для формирования S_e: двумерный (*А*) и трехмерный (*Б*) варианты.

1—3 — соответственно форма двумерного фильтра при расположении неоднородности: *1* — над экраном, *2* — под экраном с умеренным поперечным сопротивлением (< $1\cdot10^7$ Ом·м²), *3* — под экраном с высоким поперечным сопротивлением (>$10\cdot10^7$ Ом·м²).

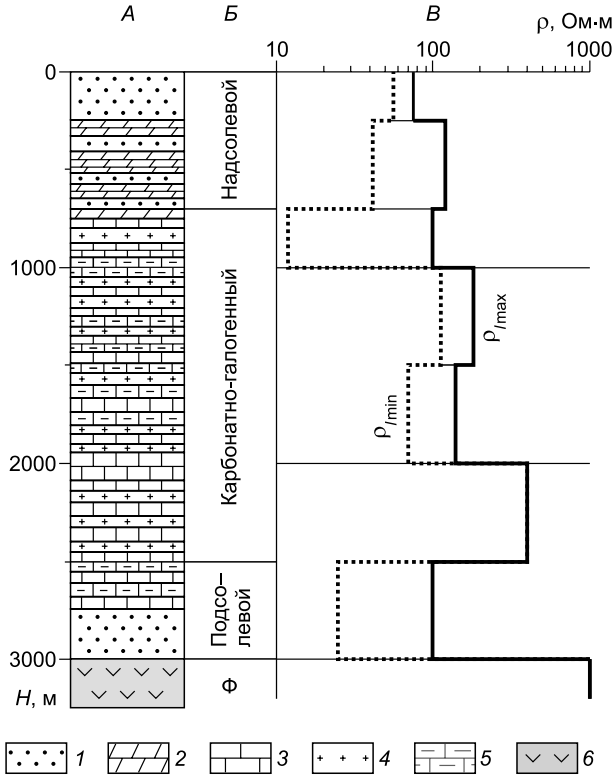

Рис. 2. Геологическая (*А*, *Б*) и геоэлектрическая (*В*) модели района исследований.

1 — песчаники, *2* — мергели, *3* — известняки, доломиты, *4* — соли, *5* — аргиллиты, алевролиты, *6* — кристаллические породы фундамента; Ф — кристаллический фундамент, $\rho_{l\min}$, $\rho_{l\max}$ — примерные минимальные и максимальные значения продольного сопротивления горизонтов.

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 «жесткости» высокоомного экрана. Чем больше произведение продольной проводимости надэкранной толщи и поперечного сопротивления экрана, тем шире переходная характеристика фильтра.

Принцип пространственной фильтрации был распространен на трехмерный случай. Для этого был сформирован 3D-фильтр в центральном сечении, подобный двумерному и затухающий по оси Y по направлениям от центра. Коэффициент гальванического экранирования $K_{гэ}$ с использованием подобного фильтра определяется как свертка 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 расчетной точки он вычисляется как функция угла направления поля φ.

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

Непосредственные расчеты 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 три 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 прослои солей, залегающие в среднем — карбонатно-галогенном комплексе, имеют удельное электрическое сопротивление в многие десятки тысяч Ом·м. Из-за этого поперечное сопротивление среднего комплекса крайне велико и составляет $(5—10)\cdot 10^7$ Ом·м^2.

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

Для каждой расчетной 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 $K_{гэ}$, совмещались с единичной окружностью (рис. 3).

Анализ результатов расчетов показывает, что распределение азимутальных зависимостей $K_{гэ}$ сложным образом связано с размерами и формой аномалий надсолевой проводимости. Так, в пределах вытянутых проводящих аномалий $K_{гэ}$ приближается к единице в продольном направлении. В пределах непроводящих участков максимальные значения $K_{гэ}$ ориентированы поперек простирания аномалий и наименее экранированы минимальные компоненты. На площади оказывается достаточное количество точек, в пределах которых значения $K_{гэ}$ по всем направлениям меньше или больше единицы. Можно также отметить, что на определенной части расчетных точек кривые азимутального распределения $K_{гэ}$ заметно отклоняются от эллиптической формы.

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

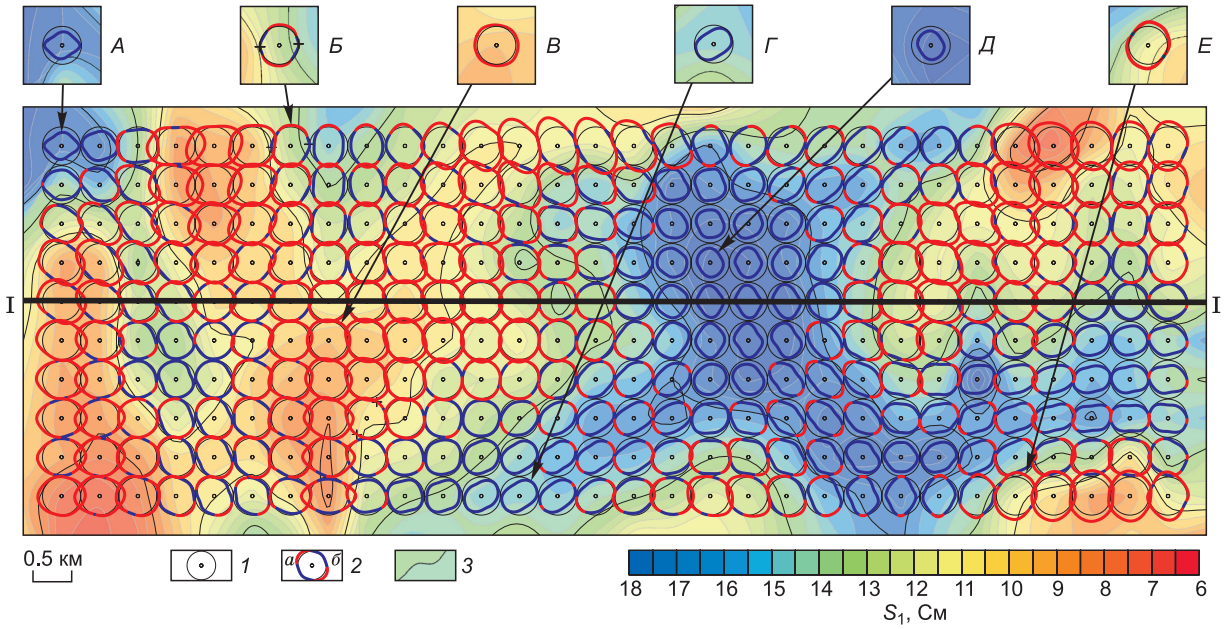

Рис. 3. Результаты расчета азимутального распределения $K_{гэ}$.

1 — расчетные пункты МТЗ и единичный круг; *2* — азимутальные диаграммы $K_{гэ}$: *а* — $K_{гэ} > 1$, *б* — $K_{гэ} < 1$; *3* — изолинии проводимости (См). На врезке вверху: *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. I—I — линия профиля.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

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

Наличие в руках исследователя аппарата двумерного и трехмерного 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 надежность 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 интерпре-

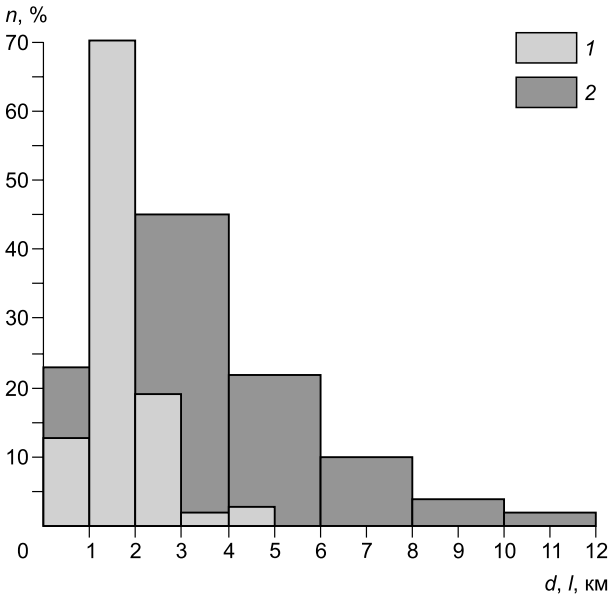

Рис. 4. Гистограммы распределения ширины *d* (*1*) и длины *l* (*2*) геоэлектрических аномалий надсолевого геоэлектрического комплекса на восточном склоне Непского свода.

татора является адекватный учет 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 проведен анализ пространственных параметров проводимости надсолевого, карбонатно-галогенного и подсолевого комплексов площадей, расположенных в центральной части Непско-Ботуобинской 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 между точками МТЗ, равного 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. Варданянц [1978], были рассчитаны кривые Е- и Н-поляризации для модели, представленной на рис. 5, *А*.

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

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

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

– 3D-инверсия полных матриц импеданса с восстановлением параметров среды на точках наблюдений и между ними;

– селекция импедансов с последующим подавлением гальванических влияний.

А

h \ l	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
0.2	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
0.5	G	M	H	J	H	J	K	B	K	L	H	F	F	K	K	G	E	E	K	I	E	E	A	D	F	B	G	H	B	K
0.4	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
0.9	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
0.9	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
16	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
22	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
105	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
∞	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C

Б

h \ l	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
0.2	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
0.5	M	M	M	H	H	H	B	B	B	H	H	H	K	K	K	E	E	E	I	I	I	A	A	A	B	B	B	B	B	B
0.4	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
0.9	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q
0.9	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
16	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
22	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
105	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
∞	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C

В

	ρ, Ом·м
Q	1000
P	700
O	450
N	170
M	75
L	52
K	45
J	41
I	37
H	33
G	29
F	26
E	23
D	20
C	15
B	13
A	10

Рис. 5. Расчетные 2D-модели:

А — с шириной блоков 3 км; *Б* — разреженная в 3 раза из модели *А*; *В* — легенда. *h*, *l* — соответственно толщина и ширина блоков, км.

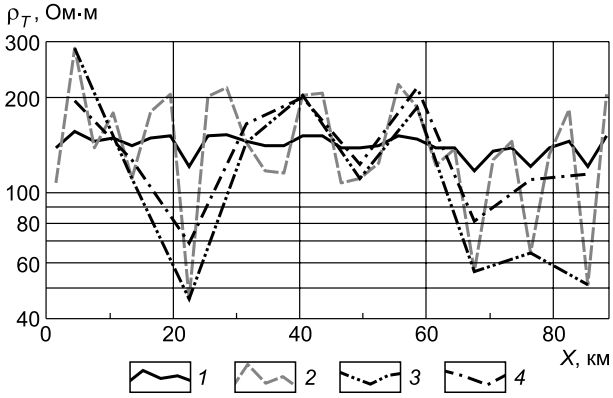

Рис. 6. Графики ρ_T на периоде 36 с для моделей, приведенных на рис. 5.

1 — одномерные кривые в точках наблюдений; *2—4* — поперечные кривые для моделей: *2* — *А* с шагом 1 км; *3* — *А* с шагом 3 км; *4* — *Б* с шагом 3 км.

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

Достаточно распространенным является принцип селекции компонент. При этом применяются различные варианты выбора компонент: по направлениям приемных линий [Каплун, 2014], преимущественно максимальных [Кузьминых, 1991], минимальных [Эпов и др., 2012].

Для оценки эффективности селекционного принципа проанализируем статистику неоднородностей и собственно импедансов. Из рисунка 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 приема, 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_{eff} ($Z_1^{\parallel}$) — среднеквадратическое расхождение уменьшается примерно в полтора раза по сравнению с эффективными кривыми; для отобранных из $Z_{\max}$, $Z_{\min}$, Z_{eff}, Z_{xy}, Z_{yx} ($Z_2^{\parallel}$) — в два раза.

Отметим, что квазипродольные кривые обладают несмещенной 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

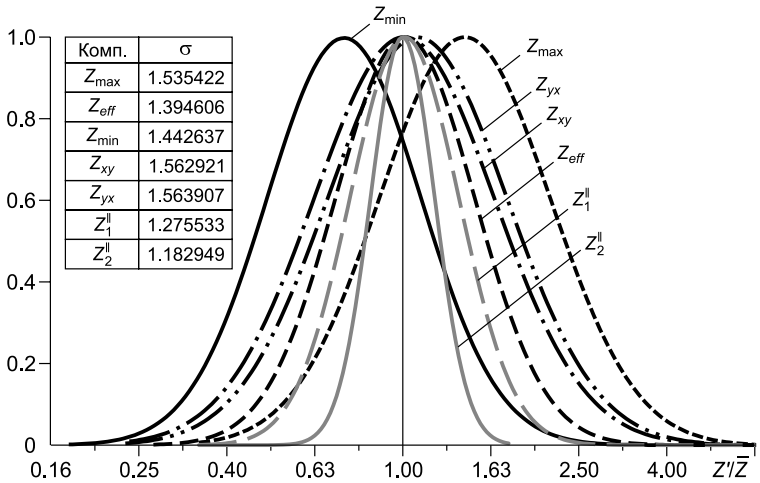

Рис. 7. Нормированные кривые, аппроксимирующие нормальным законом распределения гистограммы отклонений различных компонент импеданса на периоде 36 с от среднего для профиля Батолит:

$Z_{\max}$ — максимальных, $Z_{\min}$ — минимальных, Z_{eff} — эффективных, Z_{xy}, Z_{yx} – по направлениям приемной установки, $Z_1^{\parallel}$ — квазипродольных, отобранных из $Z_{\max}$, $Z_{\min}$, Z_{eff}, $Z_2^{\parallel}$ — квазипродольных, отобранных из $Z_{\max}$, $Z_{\min}$, Z_{eff}, Z_{xy}, Z_{yx}. В таблице приведены среднеквадратические расхождения отклонений компонент.

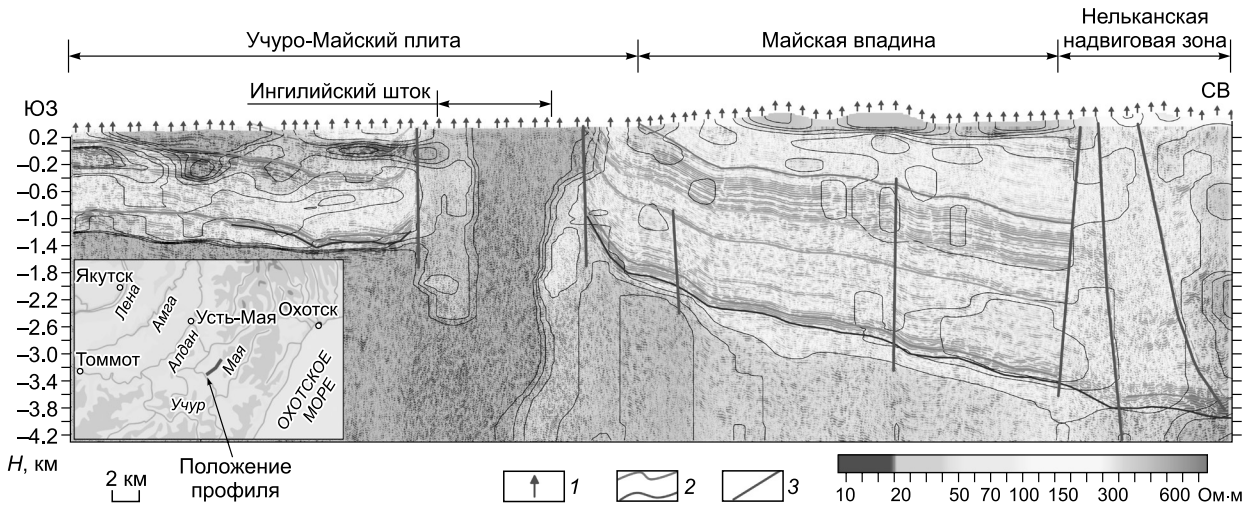

Рис. 8. Сейсмогеоэлектрический разрез.

1 — пункты МТЗ; *2* — отражающие границы; *3* — тектонические нарушения.

параметры сглаживания выбираются таким образом, чтобы, с одной стороны, не допустить нереальной детализации глубоких частей разреза, с другой, — отразить фактически существующие глубинные неоднородности.

На рисунке 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 помощью 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 отчетливое 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, связанные с наличием градиентов проводимости по направлениям поляризации магнитотеллурического поля. Реальные изменения проводимости слоев, 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 искажен.

В условиях сложного и неизвестного характера распределения проводимости слоев, подстилаемых относительно непроводящими экранами, наиболее эффективным методическим приемом 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 ее 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.

Варданянц И.Л. Расчеты методом сеток магнитотеллурических полей над двумерно-неоднородными средами. Ч. 1 // Вопросы геофизики, 1978, вып. 27, с. 36—40.

Дмитриев В.И., Бердичевский М.Н., Кокотушкин Г.А. Альбом палеток для магнитотеллурического зондирования в неоднородных средах. Ч. 1. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 100 с.

Зингер Б.Ш. Учет 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. Тезисы докладов 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.

Рекомендована к печати 27 ноября 2019 г.
М.И. Эповым

Поступила в редакцию 24 января 2019 г.,
после доработки — 8 ноября 2019 г.