

УДК 550.344

## ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛОМНЫХ СТРУКТУР ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛОМОВ

© 2014 г. Н.Н. Неведрова, А.М. Санчаа, И.В. Суродина

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Россия  
<sup>2</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрены особенности интерпретации данных геоэлектрики с контролируемым источником, полученных в двух сейсмоактивных областях – Байкальской рифтовой зоне и Алтае-Саянской складчатой области. Сформулирована методика и стратегия обработки данных; представлены геоэлектрические модели наиболее сложно построенных участков с разломными нарушениями; по результатам интерпретации полевых данных и математического моделирования определены геоэлектрические параметры разломных зон.

**Ключевые слова:** вертикальные электрические зондирования, двумерная инверсия, математическое моделирование.

### Введение

В статье представлены некоторые результаты геоэлектрических исследований, выполненных в двух сейсмоактивных районах Сибири – Байкальской рифтовой зоне и Алтае-Саянской складчатой области. Наиболее детальные геоэлектрические модели в этих районах построены для межгорных впадин, современное строение которых обусловлено неотектоническими движениями. Значительный объем данных, полученных с использованием методов геоэлектрики с контролируемым источником, относится к Тункинской, Баргузинской, Селенгинской, Муйской депрессиям Байкальской рифтовой зоны, а также к наиболее крупным впадинам Горного Алтая – Чуйской, Курайской, Уймонской.

Байкальская рифтовая зона – гигантский раздвиг, который включает в себя озерные и суходольные межгорные впадины, расположенные в достаточно узкой полосе по линии простираения озера Байкал. Наиболее крупная впадина среди них – впадина озера Байкал, протягивающаяся на 640 км при средней ширине 45–55 км. Суходольные впадины байкальского типа (Тункинская, Баргузинская и др.) чаще всего вытянуты по простираению зоны и имеют небольшую ширину. Расположенная в дельте р. Селенга Селенгинская депрессия сформирована мощными кайнозойскими отложениями. Прогибание этой структуры скомпенсировано осадконакоплением [Сейсмогеология..., 1981]. В депрессии присутствуют и более древние мезокайнозойские осадочные породы. По сейсмологическим данным, дельту р. Селенги можно отнести к одному из наиболее сейсмоактивных участков Байкальской рифтовой зоны. Известно, что в районе среднего Байкала в год происходит около 300 событий с  $K > 9$ , а на акватории байкальского залива Провал находится эпицентр катастрофического исторического Цаганского землетрясения (12.01.1862 г.,  $M \approx 7.5$ ).

Межгорные впадины Горного Алтая образовались в иной геодинамической обстановке. Алтайская горная область расположена в зоне коллизии двух тектонических плит – Индостанской и Евразийской. Механизм формирования области обусловлен взаимодействием более мелких тектонических микроплит и блоков [Добрецов, 2011].

Горный Алтай является областью палеозойской складчатости Южной Сибири с современным рельефом, сформировавшимся в результате активизации тектонических движений в неогеновое и четвертичное время. Территория собственно Горного Алтая представляет собой сложную систему самых высоких в Сибири хребтов, разделённых глубокими долинами рек и обширными межгорными котловинами. Алтайские впадины, наряду с байкальскими, расположены в зоне высокой сейсмичности с возможностью возникновения разрушительных землетрясений. В частности, в ближайшем горном обрамлении Чуйской и Курайской впадин в 27.09.2003 г. произошло Чуйское землетрясение с  $M=7.3$ , приведшее к появлению протяженных разрывных нарушений и оползней во всей эпицентральной зоне, а также к смене гидрогеологического режима. Были отмечены многочисленные повреждения зданий и дорог в населенных пунктах, расположенных на территории наиболее заселенных Чуйской и Курайской впадин. В связи с этим в настоящее время область Горного Алтая, его межгорные впадины интенсивно исследуются различными геофизическими методами, в том числе и с использованием электромагнитного комплекса с контролируемым источником.

Анализ электромагнитных данных свидетельствует, что в зонах тектонических деформаций геоэлектрические модели чрезвычайно сложны. В сейсмоактивных районах присутствие разломов различных порядков формирует блочную структуру геологического массива. В первом приближении можно говорить о сочетании блоков с субгоризонтальной слоистостью и блоков, включающих наклонные и вертикальные разломные границы.

Специалистами по структурной геологии и тектонофизике в соответствии с их представлениями был введен получивший распространение термин “разломная зона”, под которым подразумевается не только собственно сместитель, но и существенно более широкая область распространения тектонических дислокаций, связанных с формированием этого сместителя [Семинский, 2003; Шерман, Борняков, Буддо, 1983]. В терминах геоэлектрики разломная зона – это блок определенной ширины, электромагнитные характеристики которого отличаются от характеристик вмещающей среды.

В статье рассмотрены особенности интерпретации полученных в сейсмоактивных областях данных геоэлектрики с контролируемым источником; сформулирована методика и стратегия обработки; представлены геоэлектрические модели наиболее сложно построенных участков с разломными нарушениями; по результатам интерпретации полевых данных и математического моделирования определены геоэлектрические параметры разломных зон.

### **Интерпретация электромагнитных данных, полученных в сейсмоактивных районах. Геоэлектрические модели разломных структур**

В настоящее время процесс обработки экспериментальных данных геоэлектрики осуществляется в основном с помощью автоматизированных комплексов моделирования и инверсии. Для большинства используемых компьютерных программ в качестве базовой рассматривается горизонтально-слоистая модель, приемлемая для целого ряда решаемых задач. Но для областей, подверженных влиянию геодинамических процессов (природных или техногенных), всегда имеется объем полевого материала, для интерпретация которого использование горизонтально-слоистой модели не вполне корректно. В связи с этим авторами предлагается поэтапный подход к интерпретации, когда результат каждого этапа обосновывается и уточняется на последующем.

На первом этапе геоэлектрические модели получают с использованием одномерных программных комплексов моделирования и инверсии. Модель среды в каждом пункте измерения полагается слоисто однородной. На этом этапе в ряде случаев

разломы могут быть выделены по резкому изменению суммарной мощности осадочного заполнения в двух соседних пунктах наблюдений и изменению электрических характеристик.

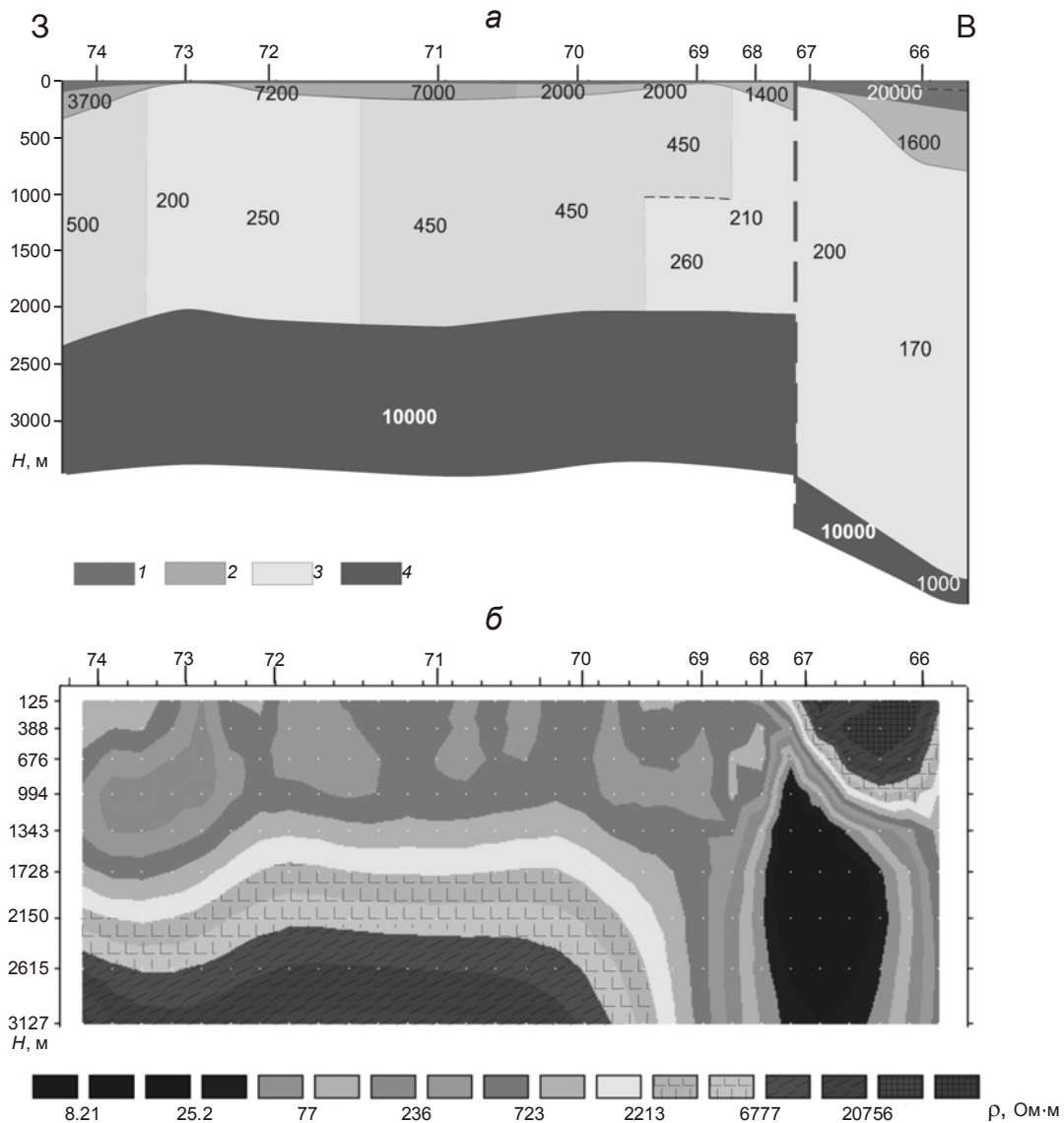
В качестве примера рассмотрим разломную зону в Муйской впадине Байкальской рифтовой зоны. По геологическим данным, впадина имеет сложное тектоническое строение, в ней присутствуют палеозойские и мезозойские разрывные нарушения. Впадина фактически разделена на несколько локальных котловин. Осадочный чехол и фундамент имеют ярко выраженное блоковое строение с характерным присутствием изометричных мощных слоев криогенных пород. Так как строение впадины ранее было изучено недостаточно, в последнее десятилетие на ее территории проведены профильные электроразведочные и региональные гравимагнитные исследования. В частности, для определения глубинного строения впадины по системе профилей были выполнены вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) с установкой Шлюмберже.

Обратимся к результатам интерпретации ВЭЗ по профилю № 1 (рис. 1). На первом этапе интерпретация выполнялась на базе горизонтально-слоистой модели. Геоэлектрический разрез, представленный на рис. 1, *a*, получен после инверсии полевых данных метода сопротивлений с использованием программного комплекса СОНЕТ [Энов, Дашевский, Ельцов, 1990]. Отметим, что интерпретационная модель обоснована данными по скважинам.

Профиль № 1 расположен в западной части впадины, простираясь с запада на восток и пересекая две локальные котловины. Эти котловины предположительно разделены геологическими нарушениями, наличие которых, как будет показано далее, обосновано данными геоэлектрики. Большая часть пунктов ВЭЗ на профиле расположена в самой западной – Улан-Макитской – котловине, частично отделенной от собственно Муйской впадины тектоническим выступом коренных пород. Три восточных пункта ВЭЗ (№№ 66, 67, 68) попадают в Муйско-Куандинскую котловину, занимающую центральную часть Муйской впадины. Априорные данные позволяют считать, что профиль № 1 скорее всего пересекает зону достаточно крупного разрывного нарушения.

Всего в разрезе по линии профиля выделено четыре геоэлектрических горизонта с контрастными значениями удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ); определена общая мощность осадочного выполнения,  $\rho$  и толщина отдельных слоев; установлена граница кровли опорного электрического горизонта (фундамента). На разрезе четко выделяются два блока – западный и восточный, – предполагаемая разломная граница между которыми показана вертикальной штриховой линией (см. рис. 1, *a*). Эта граница выделена на основании наблюдаемого существенного изменения общей мощности осадочных пород в соседних пунктах ВЭЗ – №№ 68, 67. Кроме того, в районе пунктов №№ 69, 68, 67 отмечается резкое изменение  $\rho$  основного осадочного горизонта – по сравнению с  $\rho$  в пунктах №№ 70, 71, расположенных в приподнятом западном блоке, оно уменьшается в 2 раза. Восточнее, вблизи пункта № 66, сопротивление мощного осадочного слоя становится еще более низким. Все результаты одномерной интерпретации, скорее всего, свидетельствуют о присутствии разломной структуры.

С учетом совокупности имеющихся геолого-геофизических данных становится очевидным, что для исследуемой впадины использование горизонтально-слоистой модели не вполне корректно. Далее для верификации и уточнения структурных особенностей геоэлектрической модели, полученной на первом этапе, были использованы программы двумерной инверсии. Анализ двумерного распределения  $\rho$  в изолиниях обычно позволяет проследить латеральное распределение электропроводности, разломы при этом выделяются субвертикальными или наклонными зонами с геоэлектрическими параметрами, отличными от аналогичных параметров вмещающих блоков.



**Рис. 1.** Муйская впадина. Профиль ВЭЗ № 1. Геоэлектрические разрезы, построенные по результатам одномерной интерпретации (а) и с использованием двумерной инверсии (б). На горизонтальных осях номера пунктов ВЭЗ; цифры на разрезе – значения  $\rho$ , Ом·м

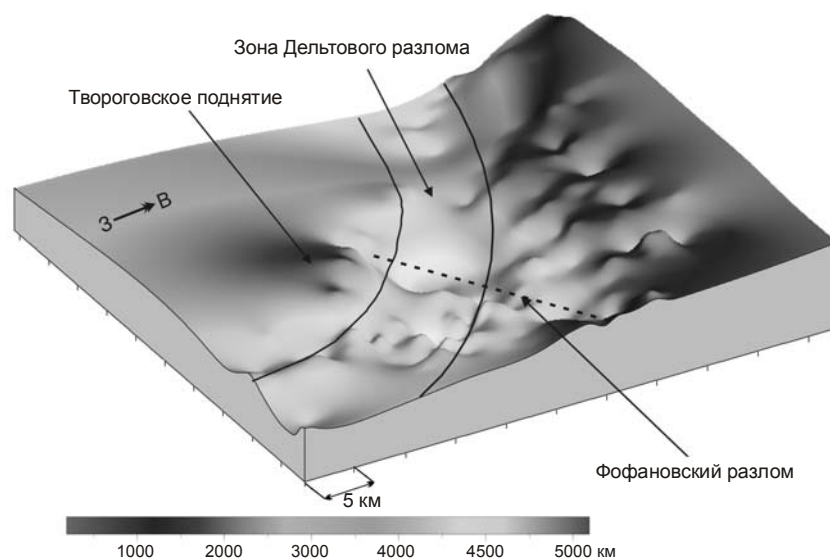
1 – многолетняя мерзлота; 2 – второй горизонт; 3 – третий горизонт; 4 – опорный горизонт (фундамент)

Оценить конфигурацию разломной структуры, ее ширину и электрические характеристики позволяет разрез (рис. 1, б), построенный по результатам двумерной инверсии, выполненной с использованием программы *Res2Dinv* (*GEOTOMO Software*). Разломная зона, разделяющая две локальные котловины Муйской впадины, выделяется в геоэлектрическом разрезе практически вертикальным блоком (пункты ВЭЗ №№ 66, 67, частично № 68), в котором наблюдается существенное понижение  $\rho$ . Ширина этого блока оценивается примерно в 2 км; точнее определить ее невозможно, так как профиль не вышел из зоны разлома. В верхней части разломной структуры присутствует мощная линза высокоомных пород, которые по значению  $\rho$ , превышающему 20 000 Ом·м и априорным данным могут быть отнесены к многолетнемерзлым.

Отметим, что результаты одномерной интерпретации и двумерной инверсии хорошо согласуются между собой. Кроме того, выявленная разломная зона в Муйской впадине подтверждается результатами современной геологической съемки [Лунина,

Гладков, 2008] и прослеживается на поверхности по сгущению трещин, ориентированных по простиранию зоны.

На примере геоэлектрической модели рельефа фундамента Селенгинской депрессии (рис. 2) рассмотрим, как еще проявляются крупные разломные структуры. Представленная модель построена по данным ВЭЗ, выполненных с разносами от 10 до 16 км, что обеспечило глубинность исследований более 4.5 км [Неведрова, Энов, Дашевский, 2004]. Рельеф поверхности опорного геоэлектрического горизонта (фундамента) депрессии позволяет судить об её основных геолого-тектонических особенностях. По данным геоэлектрики, Дельтовый разлом выделяется широкой полосой, состоящей из нескольких локальных впадин и поднятий. Правильнее исследуемую тектоническую структуру следует назвать разломной зоной, которая включает в себя значительное количество блоков и разломных нарушений разных размеров и направлений и достигает ширины 10 км.



**Рис. 2.** Байкальская рифтовая зона. Рельеф фундамента Селенгинской депрессии. Описание см. в тексте

Мощность осадочного чехла на отдельных участках Селенгинской депрессии превышает 4.5 км. Штриховой линией на рис. 2 показан Фофановский разлом, который фиксируется цепочкой погруженных и приподнятых блоков. Ранее этот разлом выделялся только по аномалиям магнитного поля. В северо-западной части дельты наблюдается приподнятый блок Твороговского поднятия, ограниченный с юго-востока тектоническими структурами Дельтового разлома, а на востоке – Фофановским разломом. Мощность осадочной толщи в пределах Твороговского поднятия не превышает 2 км. В целом строение Селенгинской депрессии можно назвать блочно-иерархическим.

Анализ пространственного распределения очагов землетрясений с  $K > 9$  за длительный период показал, что вокруг Твороговского поднятия концентрируются эпицентры землетрясений, что позволяет говорить о современной активности разломных структур, ограничивающих Твороговское поднятие.

При наличии соответствующих предпосылок (необходимость анализа искажений одномерных кривых, выполнение площадной съемки и др.) на заключительном этапе интерпретации проводится трехмерное моделирование, для чего может быть использован целый ряд программ, созданных разными авторами. Одна из них – трехмерная программа *EMF\_DC3Dmod* разработана совместно Институтом нефтегазовой геологии и геофизики и Институтом вычислительной математики и математической геофизики

СО РАН применительно к данным метода сопротивлений. Исходная модель для 3D моделирования составляется из набора усеченных треугольных призм, формирующих блоки с однородными электрическими параметрами. Такая конфигурация позволяет при необходимости менять размеры этих призм и создавать модель, наиболее близкую к реальной геологической ситуации. Практическое применение названной программы подробно описано в [Неведрова, Суродина, Санчаа, 2007].

Обычно для 3D моделирования выбираются наиболее сложно построенные в геологическом отношении участки. Следует отметить, что построение трехмерной модели геологической структуры – процесс трудоемкий; к тому же построение выполняется вручную, вследствие чего возможны ошибки при выборе параметров модели. В связи со сказанным для создания входных 3D моделей предлагается использование геоинформационных систем (*Arcview3.3*) [Де Мерс, 1999], которые позволяют не только построить виртуальную модель, но и проследить за правильностью выполняемых построений, а также рассмотреть модель в разных ракурсах. В ходе трехмерного моделирования осуществляется выбор оптимальной сети разбиения исследуемой области. Так, было выяснено, что для моделей межгорных впадин оптимальна неравномерная сеть. Нами данная программа была использована для численного моделирования над разломными структурами.

Анализ возможностей трехмерного моделирования проводился авторами с привлечением созданной профессором К. Спитцером [Spitzer, 1995] программы *3DDCXH*, предназначенной для 3D моделирования методом сопротивлений и вызванной поляризации. В этом случае прямая задача решается на основе алгоритма конечных разностей и с использованием метода сопряженных градиентов. Программа применима как для точечных, так и для дипольных источников, располагаемых на поверхности Земли или в среде; расположение электродов может быть задано пользователем. Входной файл включает модель среды, которая представляет собой набор прямоугольных блоков, координаты узлов сетки по  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ; здесь же указывается плоскость, на которой решается задача. Дополнительный файл содержит координаты произвольно располагаемых электродов.

Программа *3DDCXH* позволяет исследовать несколько типов характерных искажений кривых ВЭЗ над горизонтально-слоистой моделью при появлении уступа в высокоомном фундаменте. Нормальной считается кривая ВЭЗ, соответствующая разрезу в пункте зондирования, в котором все предположительно пересеченные вертикальной скважиной границы раздела слоев горизонтальны. Любые отличия наблюдаемых кривых ВЭЗ от нормальной будем называть искажениями.

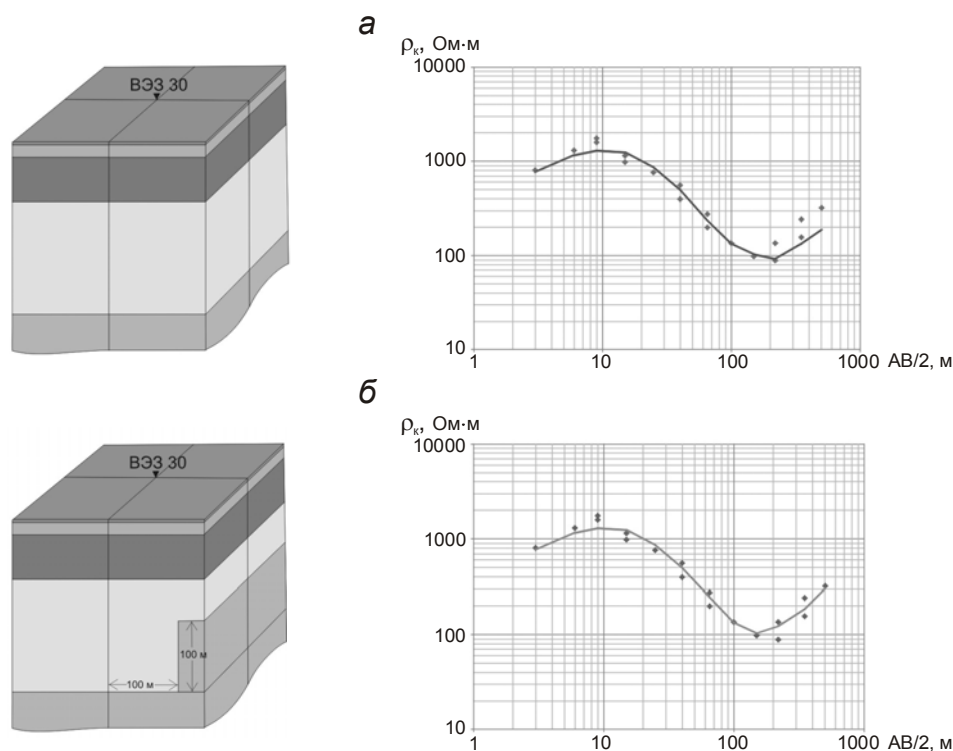
Рассмотрим два типа возможных искажений, возникающих при наличии уступа в фундаменте. Искажения первого типа наблюдаются, когда центр установки ВЭЗ расположен над поднятым крылом уступа; в этом случае угол наклона правой восходящей ветви кривой ВЭЗ к горизонтальной оси менее  $45^\circ$ . Искажения второго типа проявляются при положении центра установки зондирования над опущенным крылом. В этом случае угол наклона правой асимптоты более  $45^\circ$ , поскольку на форму кривой влияют высокоомные породы, находящиеся при больших разносах установки на меньшей глубине. Результаты трехмерного моделирования позволяют оценить количественно размеры имеющихся ступенчатых структур фундамента.

Обратимся к полевым данным. Для уточнения положения ступенчатых тектонических структур в Курайской впадине Горного Алтая было выполнено 3D моделирование с использованием результатов ВЭЗ по меридиональным профилям, пересекающим впадину с севера на юг. В качестве примера рассмотрим результаты моделирования по профилю № 2 в южной части Курайской впадины. Рассматриваемый профиль пересекает выходы на дневную поверхность вулканогенных пород Салгандуйского блока. Этот частично перекрытый осадками блок создает сложную и неоднородную структуру

фундамента и имеет разломные границы с осадочным выполнением. При измерениях на профиле № 2 в целом ряде пунктов ВЭЗ получены кривые с характерными искажениями второго типа.

Рассмотрим результаты трехмерного моделирования по программе 3DDCXH на примере ВЭЗ № 30, угол наклона восходящей ветви кривой которого  $>45^\circ$  (рис. 3).

Слева на рис. 3, а представлена использованная при интерпретации горизонтально-слоистая геоэлектрическая модель А (параметры модели см. в таблице), справа – сопоставление теоретической кривой для этой модели (сплошная линия) с полевыми данными ВЭЗ № 30 (точки). Можно видеть, что теоретическая кривая проходит ниже правой восходящей ветви, сформированной полевыми данными. Предполагается, что в кровле фундамента в районе пункта ВЭЗ № 30 присутствует ступенчатая структура.



**Рис. 3.** Курайская впадина Горного Алтая. Меридиональный профиль № 2, ВЭЗ № 30. Результаты 3D моделирования с использованием программы 3DDCXH. Описание см. в тексте

Параметры геоэлектрических моделей, используемых при 3D моделировании

№ слоя	Модель А		Модель Б	
	$\rho$ , Ом·м	мощность, м	$\rho$ , Ом·м	мощность, м
1	400	1	400	1
2	2000	8	2000	8
3	60	36	240	36
4	240	130	3000/60	130
5	3000		3000	

Следующим шагом было построение начальной модели, включающей ступень в фундаменте, и выполнение расчетов для разных размеров этой структуры. Окончательная модель (модель Б), хорошо согласующаяся с полевыми данными, приведена слева на рис. 3, б. Теоретическая кривая, рассчитанная для этой модели, в пределах погрешности

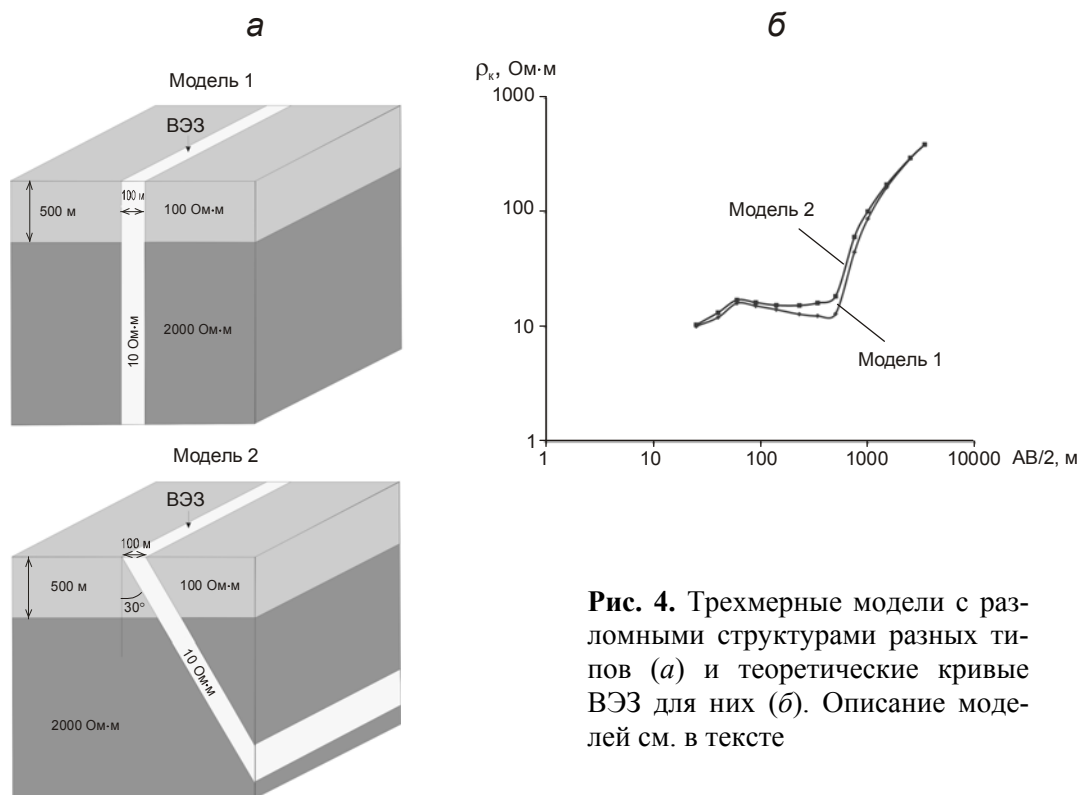
измерений совпадает с экспериментальной (см. рис. 3, б, справа). По результатам моделирования были количественно оценены размеры тектонической структуры – высота ступени и ее удаление от центра установки.

Итак, по результатам интерпретации полевых данных геоэлектрики, полученных в сейсмоактивных районах, показано, что именно разломные структуры разного вида являются основным фактором, усложняющим геоэлектрические модели, в связи с чем важно получить их количественные оценки. Поэтапный подход к интерпретации данных дает возможность выявить основные особенности строения зон разломов. Применение программ двух- и трехмерного моделирования позволяет уточнить пространственное положение разломной структуры и выяснить ее реальные размеры.

### Численное моделирование разломных структур

Для выяснения влияния разломных зон на геоэлектрические характеристики было выполнено 3D моделирование на теоретических моделях разного типа. Все расчеты осуществлялись по программе *EMF\_DC3Dmod*, позволяющей наиболее точно аппроксимировать сложные трехмерные структуры. Были рассмотрены модели с разной шириной разломной зоны и разными параметрами вмещающей среды. Кроме того, были выполнены расчеты и для более сложных моделей с разным наклоном сместителя, включая случай изменения угла его наклона с глубиной.

Сначала рассмотрим две сравнительно простые модели разломов в горизонтально-слоистой двухслойной среде (рис. 4, а). В обоих случаях верхний горизонт – это осадочный чехол с более низким по сравнению с подстилающим слоем значением сопротивления ( $\rho=100$  Ом·м); нижний слой – фундамент, характеризующийся более высокими значениями  $\rho$ , достигающими 2000 Ом·м. Интерпретация полевых данных позволяет представлять зону разлома в виде проводящей вставки.



**Рис. 4.** Трехмерные модели с разломными структурами разных типов (а) и теоретические кривые ВЭЗ для них (б). Описание моделей см. в тексте



В одном случае (модель 1 на рис. 4, *а*) разломная зона вертикальна; в другом (модель 2 там же) угол между вертикалью и плоскостью сместителя разлома составляет  $30^\circ$ . Ширина разломной области – 100 м,  $\rho=10$  Ом·м. Центр установки ВЭЗ расположен посередине разломной области. Для двух этих моделей с использованием программы трехмерного моделирования были вычислены теоретические кривые ВЭЗ (рис. 4, *б*), сопоставление которых позволяет сделать следующий вывод – наклон сместителя разломной зоны начинает влиять на форму кривой при разносах ВЭЗ от 100 до 2000 м.

Расчеты для моделей с разными углами наклона сместителя показали, что угол наклона влияет на результаты измерений на вполне определенных разносах. Причем на этих же разносах проявляется влияние и другого параметра – ширины разломной зоны. Однако при изменении ширины разломной зоны существенно меняется форма кривой зондирования, поэтому всегда можно определить, какой из двух параметров оказывает своё влияние на результаты измерений – ширина зоны или наклон сместителя.

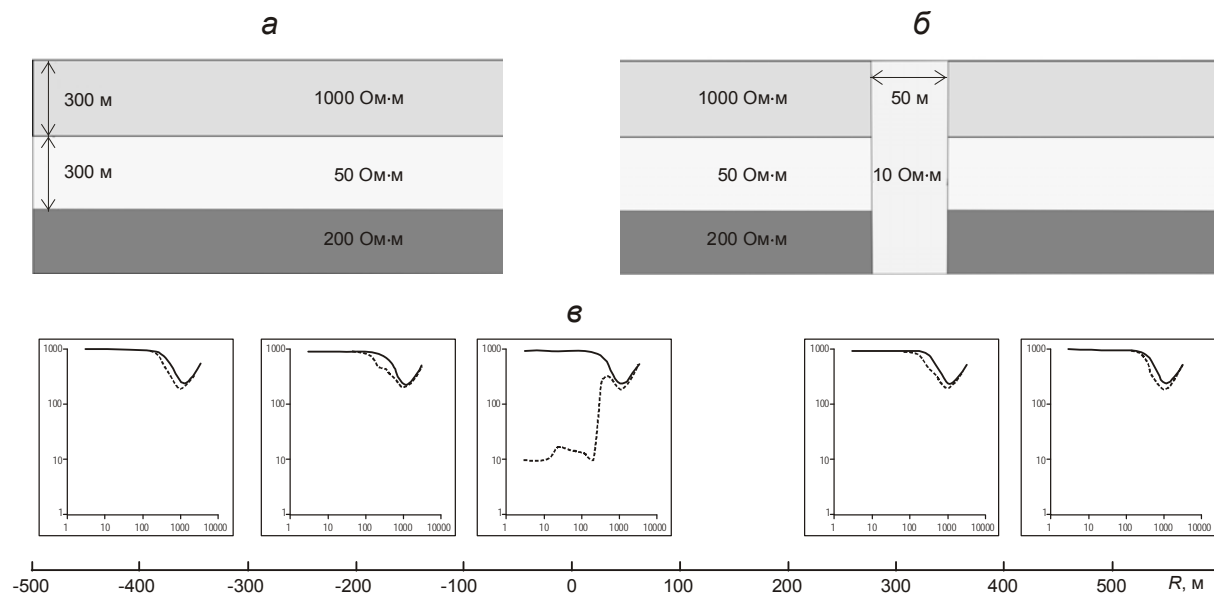
Моделирование, выполненное для разной мощности верхнего слоя, дало возможность учесть геоэлектрические характеристики вмещающей среды. Отмечено, что мощность верхнего слоя начинает существенно влиять на результаты измерений при больших разносах, на которых формируется правая ветвь кривой ВЭЗ. При этом с увеличением мощности слоя формирование правой ветви начинается на всё больших разносах.

Далее рассмотрим, как влияют параметры модели на кривые ВЭЗ при профильных измерениях. Расчеты выполнены для имитации измерений ВЭЗ, проведенных по профилю, пересекающему зону разлома. Параметры слоев, их удельное сопротивление и мощности выбраны с учетом реальных геоэлектрических условий Чуйской депрессии. Осадочные отложения, выполняющие все крупные межгорные впадины Горного Алтая, сходны по геоэлектрическим характеристикам; горизонты осадочного чехла впадин хорошо дифференцированы по значениям  $\rho$ .

Характерные для алтайских впадин геоэлектрические модели строились с учетом данных, полученных методами геоэлектрики на постоянном и переменном токе – ВЭЗ и зондирования методом становления поля. Модели по данным комплекса методов неплохо согласуются между собой по значениям  $\rho$  и мощностям отдельных слоев. При этом по данным ВЭЗ можно получить более детальные характеристики верхней части разреза, но в условиях межгорных впадин этот метод ограничен по глубинности исследований. Метод зондирования становлением поля при размерах установок, значительно меньших глубины до фундамента, обеспечивает необходимую глубинность. Комплексные измерения позволили получить полные глубинные модели впадин, включая характеристики верхней части опорного горизонта (фундамента).

Для алтайских впадин при рассмотрении геоэлектрических характеристик их осадочного выполнения, залегающего на фундаменте с  $\rho \geq 2000$  Ом·м, прослеживается тенденция возрастания  $\rho$  снизу вверх по разрезу. Так, непосредственно на опорном горизонте (фундаменте) залегает мощный осадочный горизонт с  $\rho=20-70$  Ом·м, а верхняя часть чехла сложена породами с  $\rho=200-1500$  Ом·м.

В качестве базовой при моделировании использовалась трехслойная горизонтально-слоистая модель, не содержащая проводящей зоны (рис. 5, *а*). Теоретические кривые ВЭЗ, рассчитанные для этой модели, сопоставлялись с кривыми, полученными для характерной для Чуйской впадины модели со средними геоэлектрическими характеристиками, которая содержит три слоя, пересекаемых вертикальной проводящей вставкой, имитирующей разлом (рис. 5, *б*). Ширина разломной зоны составляет 50 м, что соответствует средним поперечным размерам внутривпадинных разломов Горного Алтая.



**Рис. 5.** Используемая при моделировании трехслойная горизонтально-слоистая модель (а), включающий разлом характерный разрез Чуйской впадины Горного Алтая (б) и результаты численного моделирования ВЭЗ по профилю, пересекающему зону разлома (в). На разрезах для каждого слоя и вертикальной зоны разлома, указаны значения мощности (м) и  $\rho$  (Ом·м). на в: сплошные линии – кривые ВЭЗ, рассчитанные для базовой модели; штриховые – для модели, включающей зону разлома;  $R$ , м – удаление от середины зоны разлома

Установка ВЭЗ перемещалась по профилю и пересекала зону разлома; максимальный разнос  $AB/2 = 3400$  м. Можно видеть (рис. 5, в), что максимальное влияние разлома на кривые ВЭЗ наблюдается при положении установки над центром проводящей структуры ( $R=0$  м). При перемещении установки по профилю влияние разломной зоны достаточно быстро уменьшается, и его можно обнаружить только на вполне определенном интервале разносов от 100 до 1000 м. При этом надо отметить, что влияние разлома на названных разносах наблюдается при удалении установки от его середины до 400–500 м; разлом перестает влиять, когда зондирование выполняется на расстоянии, превышающем половину максимального разноса.

### Заключение

В статье обсуждается методика интерпретации данных геоэлектрики, полученных в районах со сложным тектоническим строением. В последние десятилетия все шире используются многомерные методы интерпретации. Развития новых способов интерпретации обусловлено достижениями в теории электромагнитных полей, численном моделировании и поддержано созданием усовершенствованных двумерных и трехмерных программ моделирования и инверсии [Жданов, 2012].

В работе продемонстрированы примеры применения 2-3D программ при построении и обосновании геоэлектрических моделей, анализе характерных искажений кривых одномерной интерпретации.

Численное моделирование на основе трехмерных программ выполнено для методической поддержки полевых геоэлектрических работ в сейсмоактивных регионах. Установлено, что на результаты измерений влияет ширина разломной зоны, угол наклона

смещителя, геоэлектрические характеристики вмещающей среды. Определены размеры установок, интервалы разносов, на которых влияние описанных в статье факторов максимально. Показано, что большая часть влияющих факторов идентифицируется либо на различных разносах, либо по изменению формы графика зондирования. Наиболее интересны результаты профилирования с установкой ВЭЗ, которые позволяют зафиксировать расстояния по профилю измерений, на которых становится заметным влияние зоны разлома на кривые зондирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 12-05-33048 мол\_а\_вед; проекта РАН ОНЗ-7.5 “Построение моделей земной коры Чуйско-Курайской сейсмоактивной зоны на основе данных электромагнитных зондирований”.

### Литература

- Де Мерс М.Н.* Географические информационные системы. Основы. М.: Изд-во “Dafa +”, 1999. 490 с.
- Добрецов Н.Л.* Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2011. 492 с.
- Жданов М.С.* Геофизическая электромагнитная теория и методы. М.: Научный мир, 2012. 680 с.
- Лунина О.В., Гладков А.С.* Активные разломы и поля напряжений северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2008. Т. 48, № 7. С.773–787.
- Неведрова Н.Н., Суродина И.В., Санчаа А.М.* Трехмерное моделирование сложных геоэлектрических структур // Геофизика. 2007. № 1. С.36–41.
- Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Дашевский Ю.А.* Определение структуры массива горных пород и анализ результатов электромагнитного мониторинга на Байкальском прогностическом полигоне // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 3. С.29–45.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: ГЕО, 2003. 241 с.
- Сейсмогеология и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья. Новосибирск: Наука, Сибирское отд-ние, 1981. 164 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю.* Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
- Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н.* Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований: препр. № 3. Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1990. 29 с.
- Spitzer K.* A 3-D finite-difference algorithm for DC resistivity modeling using conjugate gradient methods // Geophys. J. Int. 1995. V. 123. P.903–914.

#### Сведения об авторах

**НЕВЕДРОВА Нина Николаевна** – старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3. Тел.: 333-16-39. E-mail: [NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru](mailto:NevedrovaNN@ipgg.sbras.ru)

**САНЧАА Айдиса Михайловна** – старший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, д. 3. Тел.: 330-49-54. E-mail: [SanchaaAM@ipgg.sbras.ru](mailto:SanchaaAM@ipgg.sbras.ru)

**СУРОДИНА Ирина Владимировна** – старший научный сотрудник, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д. 6. E-mail: [sur@ommfao1.sccc.ru](mailto:sur@ommfao1.sccc.ru)

# CHARACTERISTICS OF FAULT STRUCTURES ACCORDING TO ELECTRIC SOUNDINGS. FAULT MODELING

N.N. Nevedrova<sup>1</sup>, A.M. Sanchaa<sup>1</sup>, I.V. Surodina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** We discuss characteristics of interpretation of geoelectrical data with a controlled source, obtained in two seismoactive areas – the Baikal rift zone and the Altai-Sayanskaya mountain belt. The technique and processing strategy are formulated, geoelectric models of the most complex areas with presence of fault disturbances are presented, and geoelectric parameters of fault zones obtained as a result of interpretation of field data and mathematical modeling are evaluated.

**Keywords:** vertical electric sounding, 2D inversion, mathematical modeling.