

УДК 550.837

ГЛУБИННЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА© 2012 Ю.Ф. Мороз^{1,2}, Т.А. Мороз¹

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
²Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, 670047; e-mail: morozyf@kscnet.ru; moroz@irlan.ru

Рассмотрены кривые МТЗ по профилю, пересекающему Байкальскую рифтовую зону. Большое внимание уделено анализу кривых МТЗ, полученных со льда оз. Байкал. Выявлены основные особенности поведения кривых МТЗ. Они изучены в пробных моделях впадины с помощью численного трехмерного и двумерного моделирования. В основу интерпретации положены кривые МТЗ, ориентированные вдоль и поперек впадины. В ее пределах продольные и поперечные кривые МТЗ в низкочастотной области различаются по уровню сопротивлений на несколько порядков. Это является характерным признаком впадины озера. По данным бимодальной интерпретации кривых МТЗ уточнена юго-восточная граница впадины озера Байкал. В результате инверсии кривых МТЗ с помощью численного моделирования МТ-поля получен геоэлектрический разрез Байкальской рифтовой зоны. Он содержит глубинные проводящие слои. Приводится возможная природа проводящих слоев.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, геоэлектрический разрез, рифтовая зона, глубинная электропроводность.

В Прибайкалье и Забайкалье в прошлые годы выполнено большое количество магнитотеллурических зондирований (МТЗ), по которым получен ряд геоэлектрических моделей, имеющих важное значение в изучении глубинного строения Байкальской рифтовой зоны (Бердичевский и др., 1999; Кузьминых, 1994; Поспеев, 1998; Поспеев, Михалевский, 1976; Роров, 1990; Moroz, Pospееv, 1995). К сожалению, крайне ограничена информация по глубинной электропроводности впадины оз. Байкал. Основные трудности здесь связаны с тем, что глубинную электропроводность впадины можно изучить только с помощью подводной аппаратуры или измерений со льда озера. Подобные эксперименты были единичны (Горностаев, 1972; Мороз и др., 2008). В последние годы удалось выполнить магнитотеллурические зондирования по профилю со льда озера и в прибрежных зонах (рис. 1). Полевые наблюдения проведены предприятием ФГУНПП «Иркутскгеофизика» с использованием японских приборов DATAMARK, магнитовариационных станций АТД-8Е, магнитотеллурических станций МТУ в диапазоне периодов от первых сотых долей до 10000 с и более. Эти МТЗ совместно с МТЗ, полученными ранее предприятием Иркутскгеофизикой и институтом

Востсибниигимс, дают возможность получить представление о глубинной электропроводности по профилю, пересекающему Байкальскую рифтовую зону. Этой теме и посвящена настоящая статья.

КРАТКАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Байкальская рифтовая зона располагается на границе двух крупнейших структур Восточной Сибири: докембрийского Сибирского кратона и Центрально-Азиатского подвижного пояса. Байкальская рифтовая зона включает оз. Байкал – крупную межгорную впадину, заполненной кристалльно чистой водой. Впадина вытянута с юго-запада на северо-восток на 636 км при ширине от 25 до 80 км. Она разделена поднятиями дна на три котловины – Северную, Среднюю и Южную максимальные глубины которых составляют 920, 1642 и 1420 м, соответственно. (Мац и др., 2001) Профиль МТЗ, выполненный со льда озера, располагается над юго-западной оконечностью средней котловины озера, где глубины дна не превышают 1 км.

Геоэлектрический разрез впадины представляется следующим. Удельное электрическое сопротивление воды 200-300 Ом·м. Донная

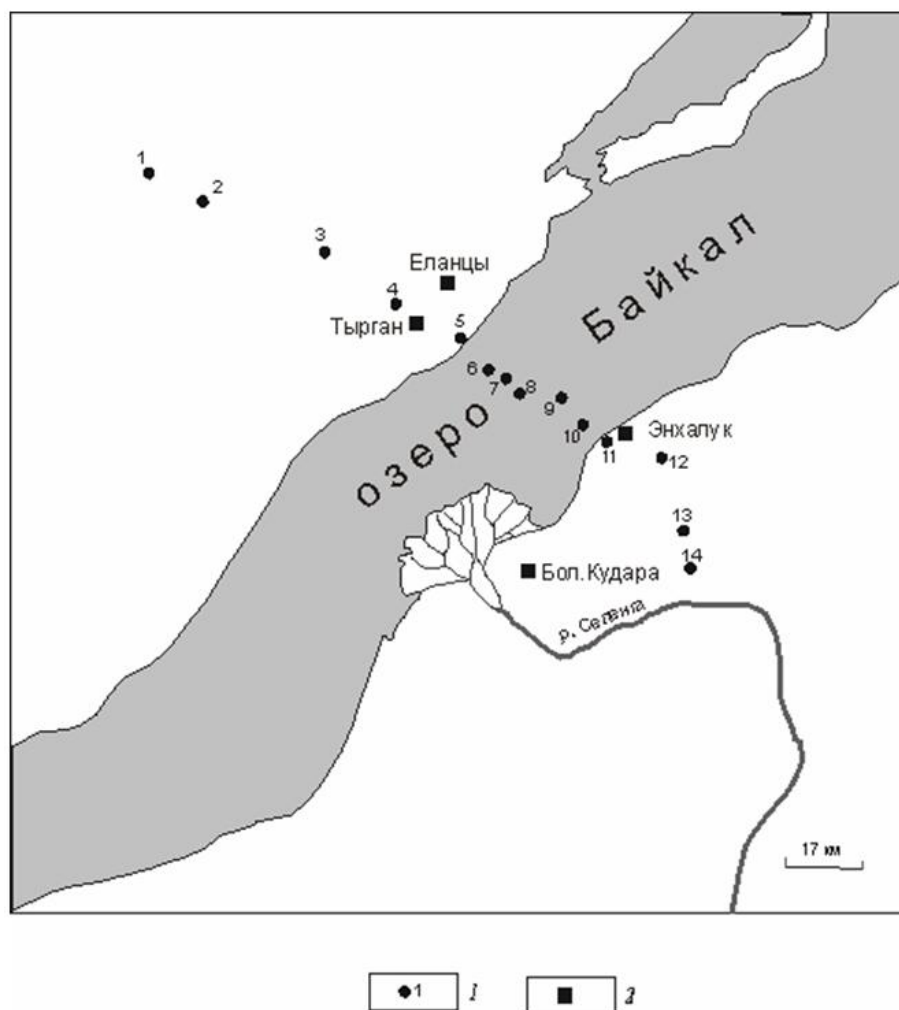


Рис. 1. Схема расположения пунктов МТЗ: 1 – пункты МТЗ и его номер.

толща осадков, сложенная глинами, песками, песчаниками, глинистыми сланцами, характеризуется средним продольным электрическим сопротивлением в первые единицы Ом·м (Жирова и др., 1993; Мороз и др., 2007; Морозова и др., 1999). По геолого-геофизическим данным мощность осадочной толщи в Байкальской впадине меняется от первых сотен метров до 4000 м и более (Мац и др., 2001). Максимальная толща осадков отмечается в районе впадения р. Селенги. Здесь намечается поднятие дна озера. Возможно, максимальные мощности осадков связаны с выносом осадочного материала рекой. Представляется, что осадочная толща подстилается породами кристаллического фундамента с удельным электрическим сопротивлением в первые тысячи Ом·м. Фундамент может быть разбит разломами на крупные блоки. Бортовые части впадины сложены дислоцированными и метаморфизованными породами с удельным электрическим сопротивлением от первых сотен до первых тысяч Ом·м. Северо-западный борт впадины более крутой, чем юго-восточный. Байкальская впадина ограничена крупными

разломами протяженностью в сотни- первые тысячи километров. Ширина зон разломов оценивается в первые десятки – сотни метров и более (Мац и др., 2001; Сейсмо тектоника.....,1975). Осадочный чехол в краевой части Сибирского кратона представлен платформенными осадками с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки-сотни Ом·м. По предварительным данным литосфера Байкальской рифтовой зоны содержит проводящие слои, связанные с повышенным содержанием жидких флюидов (Бердичевский и др., 1999; Поспеев, Михалевский, 1976; Попов, 1990).

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

На озере МТЗ регистрировались в зимний период со льда, когда толщина его достигала 1-1.5 м. Лед такой толщины возникает обычно в конце февраля месяца. Прочность льда, позволяющего проводить на нем работы, сохраняется 1-1.5 месяца. Данный временной интервал является достаточным для регистрации МТЗ в низкочастотном диапазоне. На льду озера

регистрировались только электрические составляющие поля. Измерительная установка была крестообразная. Основные линии имеют длину 500 м, дублирующие 250 м. Они располагались по направлениям, отвечающим простиранию и вкрест простирания озера. В качестве заводнений измерительных линий использовались свинцовые электроды, погруженные под лед на глубину 1.5-2 м. Регистрация вариаций электротеллурического поля производилась в цифровом виде с помощью автоматизированных приборов DATAMARK японского производства и IAE российского. Прибор находился в углублении льда, перекрытым изоляционным материалом и сверху ледовым покрывалом. Температура в приборах около 4°C. На дневную поверхность были выведены провода для снятия информации. Запись вариаций компонент геомагнитного поля H , D , Z производилась японской магнитовариационной станцией ATD-8E в п. Энхалук, расположенной на расстоянии не более 40 км от пунктов наблюдений электротеллурического поля. Дискретность регистрации составляла 1 с. Для синхронизации вариаций электротеллурического и геомагнитного полей использовалась система GPS. Схема расположения пунктов МТЗ показана на рис. 1. Возможность использования удаленной магнитовариационной станции на оз. Байкал для получения МТЗ обоснована в работе (Мороз и др., 2007). На суше регистрация электрических и магнитных компонент производилась по направлениям по простиранию и вкрест простирания структур. Установка электрических линий крестообразная или Г-образная. Используются свинцовые электроды, которые погружались на глубину до 2 м. Диапазон регистрируемых вариаций 0.1-1000 сек. и более.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

В результате обработки МТЗ определены компоненты тензора импеданса, характеризующие геоэлектрические свойства среды. Точность определения модулей компонент тензора импеданса в диапазоне периодов 0.01 до 100 с составляет первые проценты, фаз импеданса – первые градусы. В низкочастотном диапазоне точность определения поперечных модулей импеданса составляет 10-15% и более, фаз – 10-15°. Это связано с низкой интенсивностью электротеллурического поля, по-видимому, из-за влияния непроводящих бортов впадины оз. Байкал и высокой проводимости осадочного чехла в ней, определенным по данным магнитотеллурического зондирования, дипольного электрического зондирования и зондирования становлением электромагнитного поля. (Жирова и др., 1993; Мороз и др., 2008). Тензор импеданса дает воз-

можность оценить степень геоэлектрической неоднородности среды. Оценка неоднородности среды выполнена с помощью параметра неоднородности (амплитудного) – параметра Бара (Bahr 1988). Анализ показал, что параметр неоднородности N имеет значения первые десятые доли на периодах до 500 с. С увеличением периода вариаций параметр N возрастает до 0.5. Это связано с влиянием крупных геоэлектрических структур. Параметр асимметрии Свифта (Swift, 1967) свидетельствует, что горизонтальная геоэлектрическая неоднородность в районе оз. Байкал в первом приближении может быть рассмотрена как квазидвумерная. Исключением являются лишь отдельные пункты МТЗ, расположенные на значительном удалении от оз. Байкал.

Квазидвумерность Байкальской впадины в своей средней части подтверждена ниже трехмерным численным моделированием МТ-поля. О квазидвумерном характере распределения электрических свойств в Байкальской впадине свидетельствует также квазилинейная поляризация электротеллурического поля (Мороз и др., 2008). Интенсивность поля вдоль озера в несколько раз выше, чем поперек, что связано с канализацией электротеллурических токов в осадочном чехле впадины. Поэтому, для интерпретации использованы кривые по направлениям, ориентированным вдоль и вкрест простирания впадины озера. Кривые, ориентированные вдоль впадины названы продольными, а вкрест – поперечными. Это дает возможность уже на первоначальном этапе анализа разделить в указанных направлениях влияние геоэлектрических неоднородностей в приповерхностных и глубинных частях Байкальского рифта и выделить кривые кажущихся сопротивлений, в меньшей мере подверженные искажению.

Основные проблемы интерпретации кривых МТЗ в Прибайкалье и Забайкалье обусловлены влиянием эффекта ρ , связанным с действием мелких приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. В результате его действия кривые кажущихся сопротивлений в различных направлениях смещены по оси сопротивлений во всем интервале используемых частот. Поэтому интерпретация кривых МТЗ возможна лишь после их нормализации, целью которой является уменьшение влияния приповерхностных неоднородностей. Существует ряд редуций, направленных на нормализацию кривых МТЗ (Бердичевский, Дмитриев, 2009). В нашем случае можно воспользоваться редуцией, предусматривающей совмещение низкочастотных ветвей кривых МТЗ с нормальной кривой кажущегося электрического сопротивления. Данная редуция является возможной, так как экспериментальные кривые МТЗ и нормальная кривая кажущегося

электрического сопротивления перекрываются в области длинных периодов вариаций магнитотеллурического поля. Следует отметить, что данная редукция имеет недостатки, связанные с тем, что смещение кривой по оси сопротивлений может привести к искажению информации о верхних частях геоэлектрического разреза. Наряду с этим, наличие глубинных ограниченных проводящих зон в литосфере заметно ухудшит коррекцию кривых ρ_T , искаженных глубинным эффектом «S». Поэтому в Прибайкалье и Забайкалье в качестве основных для интерпретации приняты кривые МТЗ, которые без редукции удовлетворительно согласуются со стандартной кривой кажущегося электрического сопротивления.

Другая ситуация на оз. Байкал. Здесь кривые МТЗ, полученные со льда озера, свободны от влияния эффекта ρ , так как водная толща является практически однородной средой по электропроводности. В пользу этого свидетельствует вертикальная составляющая электрического поля, зарегистрированная на пунктах МТЗ. Результаты показали, что в водной толще озера практически отсутствуют вариации вертикальной составляющей электрического поля в диа-

пазоне периодов от сотых долей секунд до 30 мин (Мороз и др., 2008). Следовательно, на озере кривые МТЗ свободны от влияния локальных геоэлектрических неоднородностей. Поэтому, низкочастотные ветви экспериментальных продольных кривых согласуются со стандартной кривой кажущегося электрического сопротивления. Это позволяет использовать продольные кривые МТЗ для оценки глубинной электропроводности под впадиной оз. Байкал.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ КРИВЫХ МТЗ

Рассмотрим основные особенности поведения кривых МТЗ по профилю, пересекающему озеро Байкал (рис. 2). В Прибайкалье продольные и поперечные кривые, за исключением МТЗ №3, согласуются по форме. На них в явном виде выражены минимумы на периодах 50-1000 с, которые отражают наличие проводящего слоя в литосфере. На оз. Байкал продольные и поперечные кривые различаются по форме. Они с увеличением периода вариаций сильно расходятся по уровню сопротивлений. Расхождение кривых на периоде 1000 с составляет 3-4 порядка. При этом

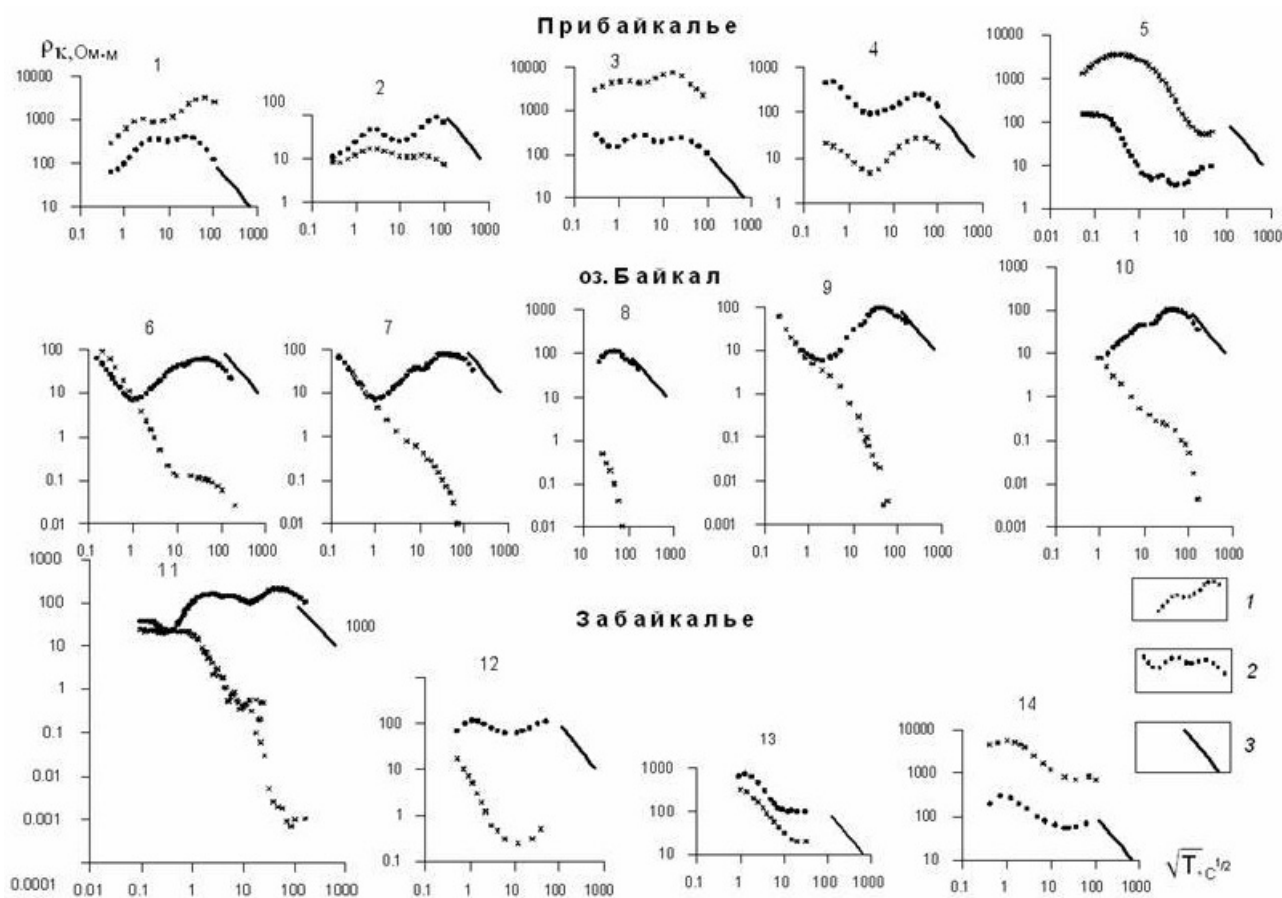


Рис. 2. Продольные и поперечные кривые МТЗ по профилю, пересекающему озеро Байкал: 1-2 – поперечные и продольные кривые МТЗ, 3 – стандартная кривая МТЗ. Цифрами обозначены номера МТЗ (см. рис. 1). Кривые МТЗ №№ 1, 2, 3, 4 приведены из геологических фондов предприятия «Иркутскгеофизика» и института «Востсибниигимс».

поперечные кривые кажущегося сопротивления достигают аномально низких значений в десятые и сотые доли Ом·м. Такое поведение поперечных кривых может быть связано с эффектом «S», вызванным влиянием хорошо проводящей осадочной толщи в Байкальской впадине и, возможно, более глубинными проводящими слоями. Продольные кривые на оз. Байкал весьма близки по форме и уровню сопротивлений. На МТЗ № 6, 7, 9 в левой части кривых хорошо выражен минимум, связанный с осадочной проводящей толщей. На ряде продольных кривых в диапазоне периодов 100-2500 с проявился минимум, отражающий наличие слоя повышенной электропроводности в земной коре – верхней мантии. Кроме этого на продольных кривых МТЗ № 8, 9 в области нисходящей правой ветви слабо выражен минимум, свидетельствующий о наличии глубинного проводящего слоя в верхней мантии. Следует отметить, что и на других МТЗ нисходящие ветви кривых располагаются заметно ниже нормальной кривой кажущегося электрического сопротивления, что не противоречит наличию глубинного проводящего слоя.

При удалении от озера Байкал в Забайкалье происходит нормализация продольных и поперечных кривых. Они становятся близкими по форме (МТЗ № 13, 14). На указанных кривых выражены минимумы, указывающие на возможное присутствие глубинных проводящих зон. Характерно, что на суше в прибрежной части озера (МТЗ № 11, 12) кривые МТЗ сохраняют особенности, свойственные кривым на озере. Это говорит о том, что здесь геоэлектрический разрез содержит проводящую толщу осадков, аналогичную на озере.

Таким образом, в результате качественного анализа кривых МТЗ мы приходим к выводу, что впадина оз. Байкал характеризуется аномальным поведением поперечных кривых кажущегося электрического сопротивления. Нисходящие ветви поперечных кривых в области низких частот достигают значений в десятые – тысячные доли Ом·м. При этом низкочастотные ветви продольных кривых МТЗ удовлетворительно согласуются с нормальной кривой кажущегося электрического сопротивления, если допустить наличие глубинного мантийного проводника. Выявленные особенности поведения продольных и поперечных кривых МТЗ свидетельствуют, что юго-восточная граница Байкальской впадины приурочена не к берегу озера Байкал, а проходит в районе МТЗ № 12, то есть на расстоянии от берега примерно в 17 км. Это подтверждается МТЗ, полученными в данном районе в восьмидесятых годах прошлого века (рис. 3). МТЗ зарегистрированы станцией ЦЭС-2. Амплитудные кривые имеют хорошее

качество. Они организованы в семейства, изображенные на рис. 4. Продольные и поперечные кривые принципиально различны по форме. Поперечные кривые также имеют вид нисходящих асимптотических ветвей, достигающих на низких частотах значений кажущегося электрического сопротивления в десятые доли Ом·м. Все это дает основание полагать, что прибрежная часть суши (севернее залива Провал) является составной частью Байкальской впадины (рис. 3).

АНАЛИЗ ПРОБНЫХ МОДЕЛЕЙ БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЫ

В основу пробных моделей оз. Байкал положены сведения о ширине и глубине Байкальской впадины, мощности и электропроводности осадочного чехла по данным зондирования становления поля и по результатам формальной интерпретации кривых МТЗ, а также приближенные сведения о коровом и мантийном проводящих слоях (Бердичевский и др., 1999; Жирова и др., 1993; Мац и др., 2001; Мороз и др., 2007; Мороз и др., 2008; Морозова и др., 1999). Глубинная часть моделей представлена стандартным распределением электропроводности (Ротанова, Пушков, 1982).

ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЫ

Озеро Байкал имеет изогнутую форму. Поэтому, в магнитотеллурическом поле воз-

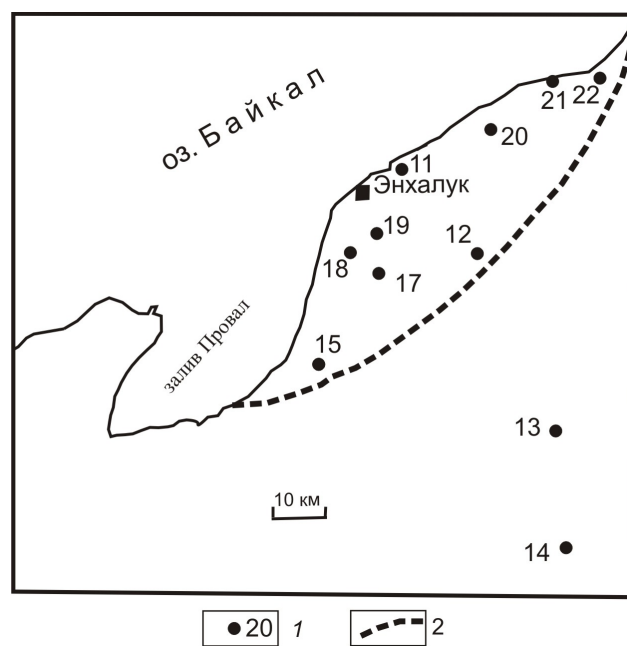


Рис. 3. Схема расположения пунктов МТЗ в прибрежной части оз. Байкал (района залива Провал): 1 – пункт МТЗ и его номер; 2 – предполагаемая граница Байкальского рифта.

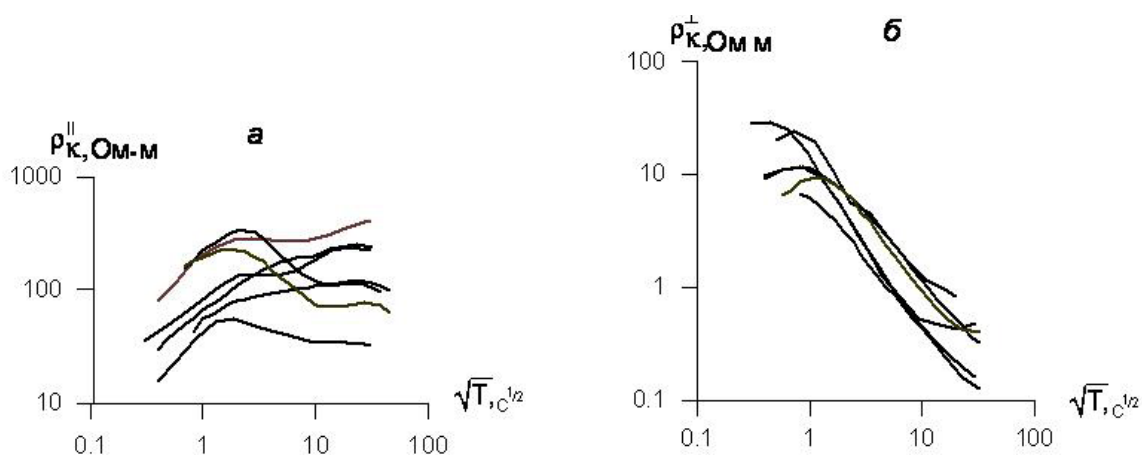


Рис. 4. Совмещенные продольные и поперечные кривые МТЗ в прибрежной части оз. Байкал (район залива Провал): *a* и *б* – продольные (*a*) и поперечные (*б*) кривые МТЗ. Номерами обозначены кривые МТЗ (см. рис. 2 и 3). Кривые МТЗ приведены из геологических фондов предприятия «Иркутскгеофизика».

можно трехмерные эффекты. Они изучены в пробной модели с помощью трехмерного численного моделирования магнитотеллурического поля по программе Макки (Mackie et al., 1994). Численная модель включает водную толщу озера и осадочный чехол. Удельное электрическое сопротивление воды 200 Ом·м, осадочного чехла во впадине – 4 Ом·м. Поверхность осадочного чехла является рельефом морского дна. В пробной модели нижняя граница осадочного чехла является горизонтальной. Глубинный геоэлектрический разрез принят стандартным. Он закономерно уменьшается с глубиной. Моделирование выполнено на основе сеточной модели, приведенной на рис. 5. Оси сетки ориентированы вдоль и поперек впадины (район средней части озера). Общие размеры сетки 52×140 элементов: по оси *x* – 52 элемента, по оси *y* – 140 элементов. Размеры элементов (ячеек) сетки 5×5 км. Такая сетка принята для выражения рельефа дна впадины. На краях сетки размеры ячеек увеличены в десятки, сотни и тысячи раз для обеспечения условий двумерности и одномерности граничных условий. Это позволило существенно ускорить сходимость итерационного процесса. Расчеты выполнены для 25 значений периодов в диапазоне от 1 до 2500 с. Для каждого фрагмента модели рассчитаны кривые кажущихся сопротивлений, фазовые кривые импеданса и другие магнитотеллурические параметры.

На рис. 6 изображены кривые МТЗ в районе юго-западного замыкания Средней котловины. Здесь проходит профиль МТЗ. Модельные кривые МТЗ получены по направлению вдоль и поперек впадины. Эти кривые будем называть продольными и поперечными. Они приведены в сопоставлении с локально-нормальной кривой. Рассмотрим кривые МТЗ во впадине (МТЗ № 4, 5). Здесь продольная и поперечная кривые в области коротких периодов практически

совпадают между собой, что свидетельствует об их слабом искажении. В области больших периодов амплитудная поперечная кривая искажена сильным эффектом «S» (нисходящая ветвь кривой ρ^{\perp} смещена относительно локально-нормальной кривой, более чем на порядок). Это искажение связано с влиянием осадочного чехла впадины. Продольная кривая, относительно локально-нормальной кривой, имеет более крутую восходящую ветвь, что обусловлено непроводящими бортами впадины. Характерно, что низкочастотная ветвь продольной кривой почти сливается с локально-нормальной кривой. Полученные данные свидетельствуют, что продольная кривая более реально отражает глубинный геоэлектрический разрез, чем поперечная. Поэтому, продольная кривая МТЗ может быть использована для формальной интерпретации. Обратимся к МТЗ № 3, расположенному вблизи берега. Здесь амплитудная продольная кривая подобна локально-нормальной кривой. Однако, по уровню сопротивлений продольная кривая расположена выше. На поперечной кривой не выражен минимум, связанный с осадочным чехлом. Различие форм продольной и поперечной кривых можно объяснить краевым эффектом, вызванным перераспределением поперечного электрического тока (Бердичевский, Дмитриев, 2009). Характерно, что в области низких частот продольная и поперечная кривые становятся близкими по уровню сопротивлений.

Рассмотрим кривые за пределами Байкальской впадины (МТЗ № 1, 2). На расстоянии 5 км от границы впадины (МТЗ № 2) продольные и поперечные кривые отличаются от локально-нормальной кривой. На продольной кривой выражен минимум, связанный с индукционным влиянием электрических токов во впадине. Поперечная кривая занимает более низкий уровень по электрическому сопротивлению, свя-

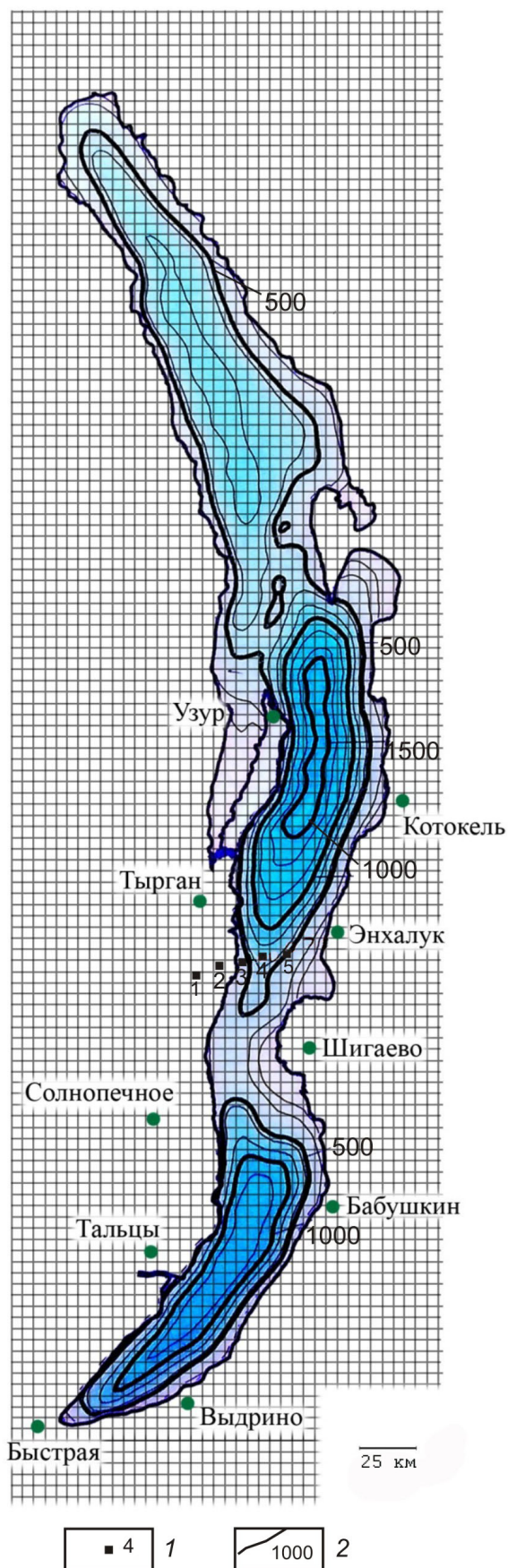


Рис. 5. Сеточная модель впадины оз. Байкал: 1 – пункты, в которых получены модельные кривые МТЗ; 2 – изобаты в метрах.

занный с влиянием осадочного чехла во впадине. Эти особенности проявляются также на фазовых кривых. При удалении от берега оз. Байкал на расстояние 15 км (МТЗ № 1) продольные и поперечные кривые практически совпадают с локально-нормальной кривой.

ДВУМЕРНЫЕ МОДЕЛИ БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЫ

Выполненный анализ показывает, что поведение продольной и поперечной кривых во многом аналогично поведению кривых в модели грабена и проводящей вставки (Бердичевский, Дмитриев, 2009). Это дает возможность с помощью двумерных пробных моделей изучить влияние осадочного чехла и глубинных проводящих зон на поведение кривых МТЗ. Исследованы три модели. Численное двумерное моделирование МТ-поля выполнено по программе (Wannamaker et al., 1987).

Рассмотрим поведение кривых МТЗ в первой модели, включающей водную толщу, осадочный чехол, подстилаемый кристаллическим фундаментом (рис. 7). Глубинный геоэлектрический разрез является стандартным. На рис. 8 для модели 1 приведены продольная, поперечная и локально-нормальная кривые МТЗ во впадине и за ее пределами для $y = 0, 15, 30$ и 50 км. Кривые МТЗ в данной модели подобны кривым в трехмерной модели. Поэтому нет смысла детально рассматривать поведение кривых во впадине. Следует лишь отметить, что при приближении к борту впадины ($y=15$ км) эффект «S» усиливается и поперечная кривая в низкочастотной области достигает значений меньше 0.1 Ом·м.

Рассмотрим на рис. 8 кривые МТЗ на границе впадины ($y=30$ км). Продольная и поперечная кривые изображены совместно с нормальными кривыми для впадины (а) и за ее пределами (б). Продольная кривая имеет хорошо выраженный минимум, связанный с индукционным влиянием электрических токов, концентрирующихся во впадине. Низкочастотная нисходящая ветвь кривой совпадает с нормальными кривыми. Поперечная кривая в высокочастотной области заметно отличается от нормальных кривых и продольной кривой. Различие вызвано перераспределением поперечного тока, обусловленного разной толщиной скин-слоя во впадине и за ее пределами. Данный гальванический эффект является краевым (Бердичевский, Дмитриев, 2009). Продольная и поперечная кривые в диапазоне периодов $0.1-1000$ с расходятся противоположным образом. Этот эффект является эффектом расхождения (Бердичевский, Дмитриев, 2009). За пределами впадины действие искажающих эффектов затухает. Обратимся к кривым

ГЛУБИННЫЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

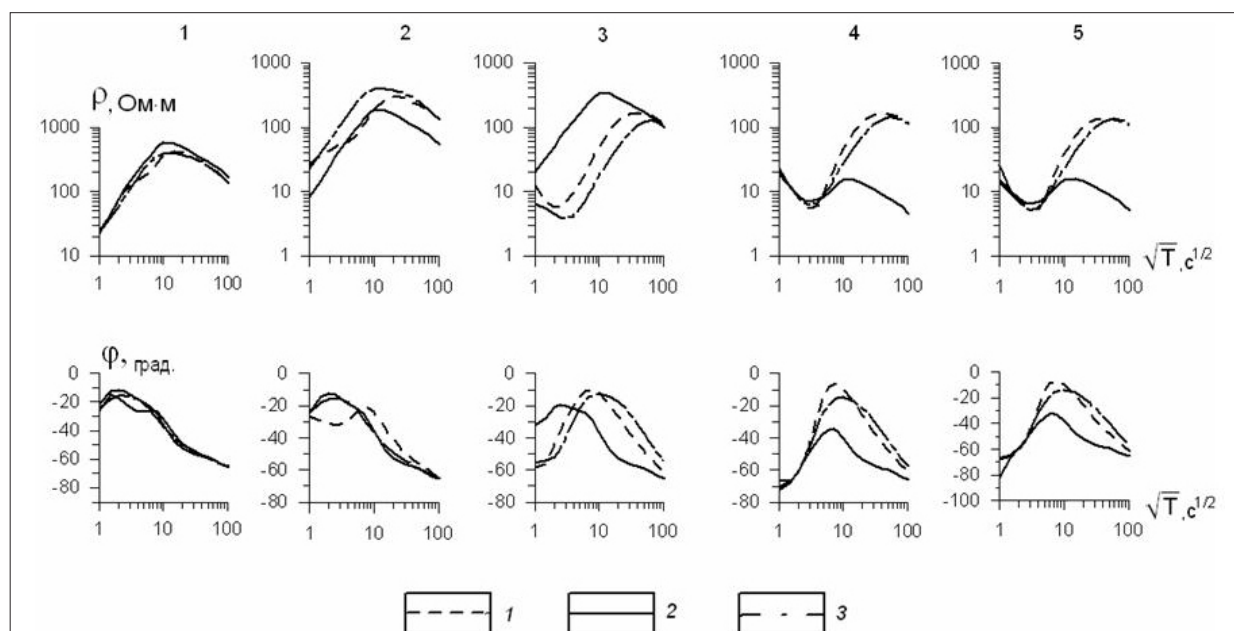


Рис. 6. Кривые МТЗ в трехмерной модели Байкальской впадины: 1, 2, 3 – поперечная, продольная и локально-нормальная кривые. Цифрами обозначены номера пунктов МТЗ в модели (см. рис. 5).

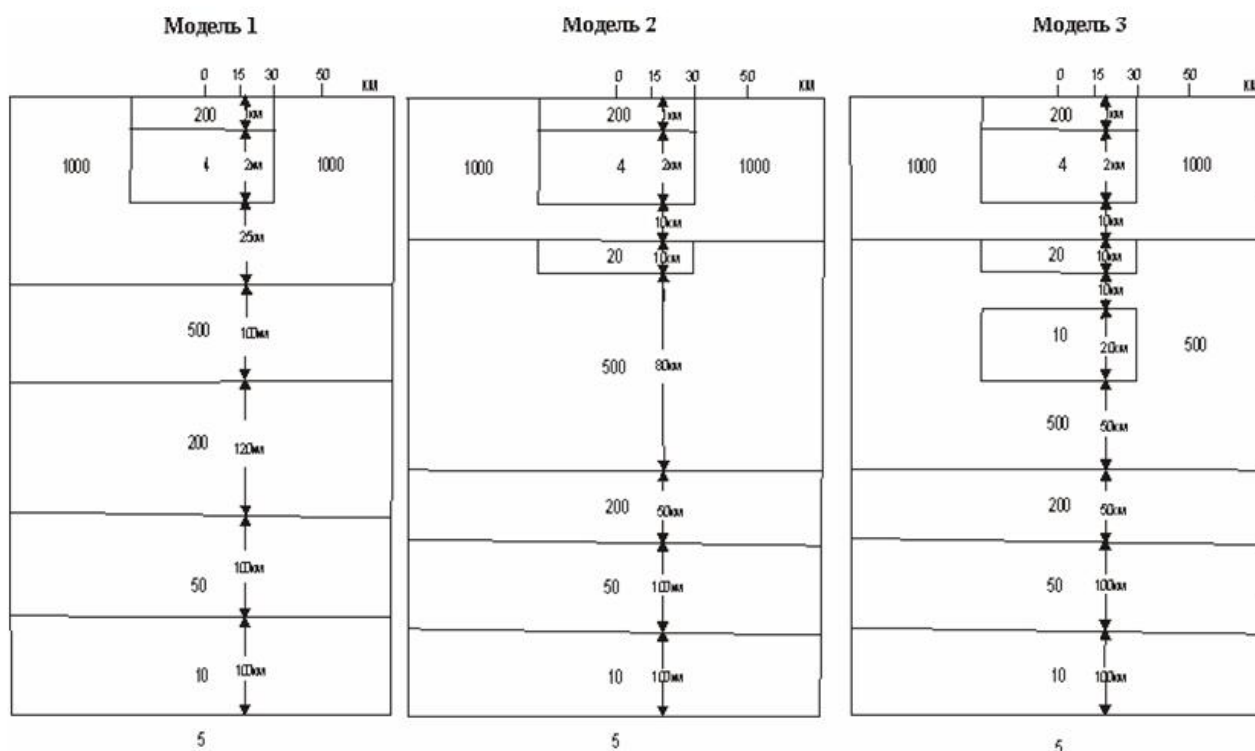


Рис. 7. Пробные двумерные геоэлектрические модели рифта. Цифрами обозначены удельные электрические сопротивления в Ом·м.

МТЗ на расстоянии 20 км от края впадины ($y = -50$ км). Здесь поперечная кривая МТЗ практически совпадает с локально – нормальной кривой. На продольной кривой проявляется лишь слабый минимум, связанный с индукционным влиянием электрических токов во впадине.

Рассмотрим, каким образом на поведение кривых МТЗ влияют глубинные проводящие

зоны. По существующим представлениям земная кора Прибайкалья и Забайкалья содержит слой пониженного электрического сопротивления в первые десятки Ом·м на глубинах 10-20 км. Введем такой слой в первоначальную модель. Удельное электрическое сопротивление его примем в 20 Ом·м. Полученная модель изображена на рис. 7 под номером 2. Для нее рассчитаны кривые МТЗ, показанные на рис. 8.

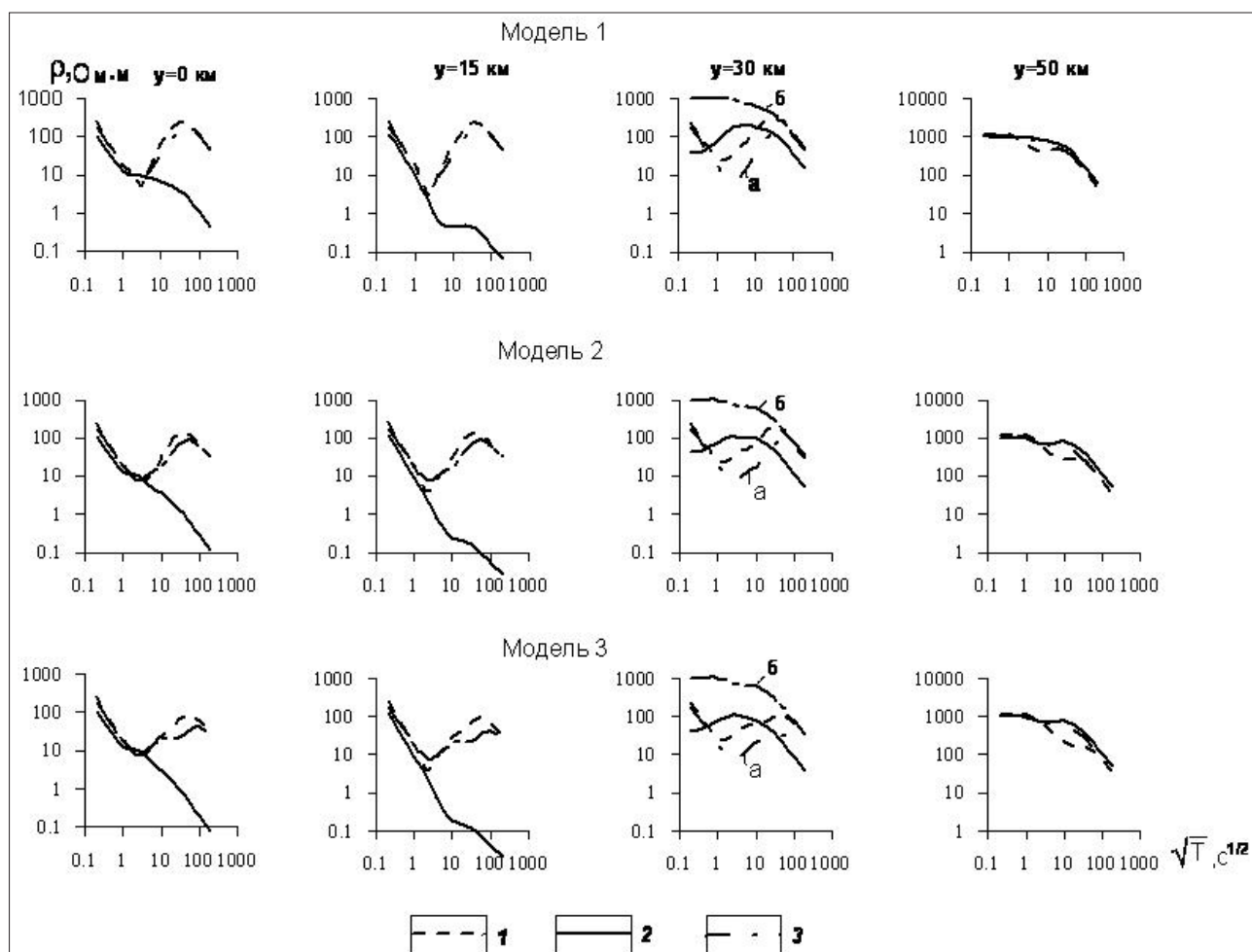


Рис. 8. Кривые МТЗ в пробных моделях, изображенных на рис. 7. 1, 2, 3 – продольная, поперечная и локально-нормальные кривые МТЗ; а и б – нормальные кривые во впадине и за ее пределами.

Влияние корового слоя приводит к следующим изменениям в поведении продольных и поперечных кривых МТЗ. Продольные кривые МТЗ во впадине ($y=0$; $y=15$) имеют более выполаженные асимптотические восходящие ветви, характеризующие увеличенную интегральную проводимость толщи, содержащей коровый слой, осадочную толщу и промежуточные высокоомные слои. Поперечные кривые во впадине ($y=0$; $y=15$) занимают уровень по сопротивлению почти на полпорядка ниже по сравнению с поперечными кривыми в модели 1. За пределами впадины ($y=50$ км) влияние корового слоя усиливает индукционный эффект на продольной кривой, выраженной в виде ложного минимума. Мы приходим к выводу, что во впадине коровый слой приводит к заметному смещению низкочастотных ветвей кривых МТЗ в сторону уменьшения кажущегося электрического сопротивления.

Рассмотрим, в какой мере на кривые МТЗ влияет глубинный проводник. Он вводится в модель на основании того, что под оз. Байкал выделяется проводящий слой в верхней мантии

(Мороз и др., 2008). Проводник находится на глубине 30 – 50 км с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м. Такую модель назовем моделью 3. Она изображена на рис. 7. Обратимся к продольным и поперечным кривым МТЗ, приведенным на рис. 8. Во впадине на продольных кривых проявились слабовыраженные минимумы, характеризующие мантийный проводник. Нисходящие ветви поперечных кривых незначительно опустились вниз по уровню сопротивлений (первые десятки процентов) по сравнению с моделью 2. На продольных кривых на границе впадины и за ее пределами усилился индукционный эффект за счет появления глубинного проводника.

Таким образом, выполненный анализ свидетельствует, что продольные кривые во впадине слабо затронуты искажающим эффектом за счет непроводящих бортов. Они отражают реальный геоэлектрический разрез и могут быть использованы в качестве основных для изучения глубинной электропроводности. Поперечные кривые во впадине в сильной мере искажены эффектом «S». Они не характеризуют реальную глубинную

электропроводность. Однако, уровень поперечной низкочастотной нисходящей ветви содержит информацию о ширине впадины и проводимости осадочного чехла, а также наличии глубинных проводящих зон. Совместный анализ продольных и поперечных кривых дает возможность определить границы впадины и определить ее геоэлектрический разрез.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

По данным формальной интерпретации кривых получены предварительные данные о геоэлектрическом разрезе земной коры и верхней мантии по профилю, пересекающему Байкальскую рифтовую зону. Мощность осадочно-вулканогенного чехла не превышает 2 км. Удельное электрическое сопротивление чехла меняется от первых единиц Ом·м до 200 Ом·м. При этом самые низкие сопротивления отмечаются в Байкальской впадине. Она хорошо выражена в поведении параметра неоднородности $M = \rho^{\frac{1}{2}}/\rho^{\text{II}}$ ($T=2500$ с). Значения неоднородности во впадине увеличиваются до 10000 и более. В средней части земной коры и в верхней мантии содержатся слои повышенной электропроводности.

Результаты формальной интерпретации уточнены с помощью численного двумерного моделирования магнитотеллурического поля. Основанием для этого являются данные численного трехмерного моделирования свидетельствующие, что средняя часть Байкальской

впадины, где расположен профиль МТЗ, может быть аппроксимирована двумерной моделью. Стартовая модель включает 14 блоков с различным распределением электропроводности в земной коре и верхней мантии. Нижняя часть модели представлена стандартным геоэлектрическим разрезом. Расчет выполнен по программе (Wannamaker et al., 1987).

Решение обратной задачи сводилось к минимизации расхождений между продольными экспериментальными и модельными кривыми МТ-зондирований. При этом большое внимание уделялось качественному соответствию поперечных модельных и экспериментальных кривых. Изменение параметров модели производилось интуитивно. Во внимание принимались другие геолого-геофизические данные. Только на двенадцатом варианте было получено удовлетворительное согласие для большинства продольных модельных и экспериментальных кривых МТЗ (рис. 9). Лишь на отдельных пунктах за пределами впадины озера не удалось получить хорошей сходимости модельной и экспериментальной продольных кривых МТЗ, что может быть связано с влиянием приповерхностных геоэлектрических неоднородностей и отличием реальной геоэлектрической модели от двумерной. Окончательный вариант модели иллюстрируется на рис. 10. Модель дает представление о параметрах электропроводности земной коры и верхней мантии Байкальской рифтовой зоны.

Осадочно-вулканогенный чехол впадины озера имеет ассиметричное строение. Его мощ-

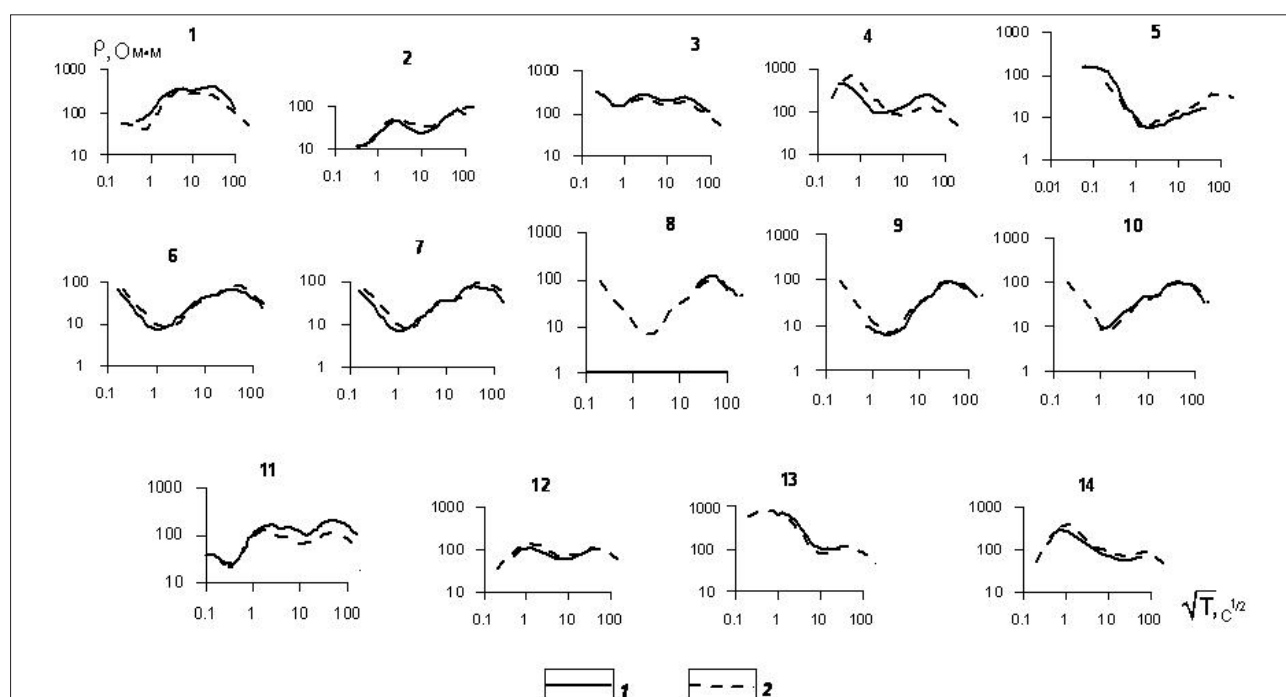


Рис. 9. Сопоставление экспериментальных и модельных кривых. 1 и 2 – экспериментальные и модельные кривые МТЗ, цифрами обозначены номера кривых (см. рис. 2).

ность уменьшается с юго-запада на северо-восток от 1.5 км до 0.5 км. При этом сопротивление чехла возрастает от 4 Ом·м до 20 Ом·м. Предполагается, что земная кора впадины озера содержит слой пониженного электрического сопротивления на глубинах 10-20 км. Однако, этот слой под Байкальской впадиной, на кривых МТЗ не выражен в явном виде, что может быть связано с экранирующим влиянием осадочного чехла. Данные моделирования свидетельствуют, что если этот слой присутствует в земной коре под Байкальской впадиной, то его проводимость будет меньше или соизмерима с проводимостью осадочного чехла. В Забайкалье, где сокращается проводимость осадочного чехла, коровый слой хорошо выражен на кривых МТЗ. Здесь, по данным моделирования, удельное электрическое сопротивление слоя составляет 50 Ом·м. Литосфера Байкальского рифта содержит слой повышенной электропроводности на глубинах 35-50 км. Этот слой, несмотря на сильное экранирующее влияние осадочного чехла впадины озера, отразился на продольных кривых МТЗ в виде слабовыраженного минимума. Слой продолжен в Забайкалье. Удельное электрическое сопротивление слоя 10 Ом·м.

В верхней мантии на глубинах 170-230 км выделен проводящий слой с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м. Основанием для его выделения являются лишь кривые МТЗ во впадине озера. На них нисходящие низкочастотные ветви кривых не сливаются со стандарт-

ной кривой, а располагаются левее. На отдельных кривых в области нисходящей асимптотической ветви проявился слабовыраженный минимум. Все это свидетельствует в пользу присутствия астеносферного проводящего слоя. Однако, в Забайкалье, за пределами впадины озера Байкал, где кривые МТЗ ограничены со стороны низких частот, трудно судить о продолжении этого слоя. В то же время при инверсии кривых для лучшего согласования продольной и экспериментальных кривых пришлось вывести проводящий слой за пределы впадины. Однако, следует отметить, что однозначно судить о наличии этого слоя только по отдельным кривым на оз. Байкал нельзя. Необходимы дополнительные глубинные магнитотеллурические и магнитовариационные зондирования.

Таким образом, в полученной геоэлектрической модели Байкальской впадины однозначно определен лишь проводящий слой под озером Байкал в верхней мантии на глубинах 35-50 км. Важно отметить, что он находит отражение в виде зоны пониженных скоростей по данным сейсмических исследований (Крылов и др., 1981).

Какова возможная природа проводящих слоев в земной коре и верхней мантии рифтовой зоны? По существующим представлениям (Ваньян, 1997) природа корового слоя на глубине 10-20 км может быть связана с наличием высокоминерализованных растворов. Повышенная электропроводность слоя на глубинах 35-50 км обусловлена, по-видимому, как наличием

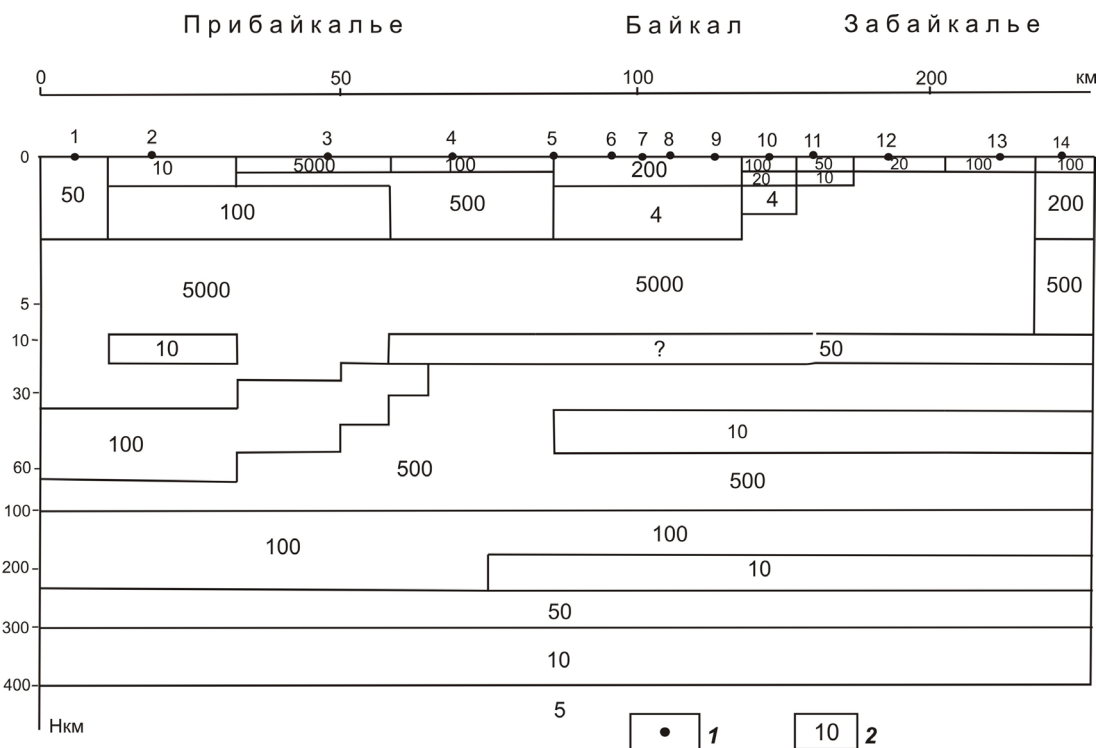


Рис. 10. Геоэлектрический разрез Байкальской рифтовой зоны: 1 – пункты МТЗ; 2 – удельное электрическое сопротивление в Ом·м.

высокоминерализованных растворов, так и магматических расплавов. Нижний слой высокой электропроводности, расположенный в верхней мантии на глубинах 170–230, может быть связан с частичным плавлением ультраосновных пород.

Следует отметить, что мы только вкратце затронули вопрос о природе выявленных зон повышенной проводимости. В дальнейшем предполагается выполнить комплексную интерпретацию геоэлектрической модели совместно с данными сейсмологии, гравиметрии, теплового потока и другой имеющейся геолого-геофизической информацией. Это даст возможность создать геофизическую модель впадины и получить более полное представление о природе глубинных геоэлектрических неоднородностей и их возможной связи с землетрясениями. Этим вопросам будет посвящена отдельная публикация.

ВЫВОДЫ

Выявлены основные особенности поведения кривых МТЗ по профилю, пересекающему Прибайкалье, Байкальскую впадину и Забайкалье. В Байкальской впадине продольные и поперечные кривые МТЗ в низкочастотной области расходятся по уровню сопротивлений до 3–4 порядков. Значения кажущихся электрических сопротивлений составляют десятые и сотые доли Ом·м. Это является одним из характерных признаков Байкальской впадины. Низкие значения поперечных сопротивлений связаны с действием искажающих эффектов, вызванных высокой проводимостью осадочного чехла и более глубоких частей разреза под Байкальской впадиной. По сильному расхождению низкочастотных ветвей продольных и поперечных кривых МТЗ установлено, что юго-восточная граница Байкальской впадины в районе профиля приурочена не к берегу оз. Байкал, а проходит по суше на расстоянии примерно 17 км от берега.

Важно отметить, что продольные кривые, полученные со льда озера, не искажены влиянием приповерхностных геоэлектрических неоднородностей, так как водная толща является практически однородной средой по электрическим свойствам. Поэтому продольные кривые МТЗ в своей правой части на периодах 10000–30000 с, удовлетворительно согласуются со стандартной кривой кажущегося электрического сопротивления. Это дает возможность продольные кривые МТЗ использовать в качестве основных для изучения глубинной электропроводности. Продольные кривые МТЗ также использованы на суше для исследования глубинного геоэлектрического разреза.

С помощью трехмерного и двумерного численного моделирования изучены кривые МТЗ в пробных моделях впадины. Установлено, что в первом приближении средняя часть Байкальской впадины может быть аппроксимирована двумерно-неоднородной моделью. Продольные кривые МТЗ во впадине являются близкими к локально-нормальным кривым. Поперечные кривые в сильной мере затронуты эффектом «S». За счет этого эффекта поперечные кривые имеют аномально-низкие сопротивления в низкочастотной области, которые не характеризуют глубинную электропроводность. Основной вклад в эффект «S» вносит осадочный чехол впадины. Глубинные проводящие слои усиливают данный эффект. Осадочный чехол экранирует коровый проводящий слой. Последний находит отражение в видимой форме на кривой МТЗ, если его проводимость в 1.5–2 раза и более превышает проводимость осадочного чехла.

В результате инверсии продольных кривых МТЗ с помощью численного двумерного моделирования создана глубинная геоэлектрическая модель Байкальской впадины. При этом использовались данные по поперечным кривым МТЗ и другая априорная геолого-геофизическая информация. Установлено, что осадочный чехол впадины имеет ассиметричное строение. Его мощность уменьшается с северо-запада на юго-восток от 1.5 км до 0.5 км. При этом удельное электрическое сопротивление чехла возрастает от 4 до 200 Ом·м. Земная кора и верхняя мантия содержат проводящие слои. Коровый слой уверенно выделяется в Прибайкалье и Забайкалье на глубинах 10–20 км с удельным электрическим сопротивлением 50 Ом·м. В Байкальской впадине этот слой не выделен, по-видимому, из-за экранирующего влияния осадочного чехла. Более однозначно выявлен проводящий слой на глубинах 35–50 км с удельным электрическим сопротивлением 10 Ом·м. Он имеет продолжение в Забайкалье. Природа глубинных проводящих слоев связывается с наличием жидких флюидов.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-05-00043а).

Список литературы

- Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Кошурников А.В.* Магнитотеллурические зондирования в Байкальской рифтовой зоне // *Физика Земли*. 1999. № 10. С. 3–25.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. 677 с.
- Ваньян Л.Л.* Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 219 с.

- Горностаев В.П.* О глубинной геоэлектрической модели Байкальской области // Геология и геофизика. 1972. № 6. С. 67-77.
- Жирова Н.В., Мандельбаум М.М., Морозова Г.М. и др.* Геоэлектрическая характеристика сейсмологических структур Байкальского прогностического полигона // Геология и геофизика. 1993. № 1. С. 133-144.
- Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П. и др.* Недра Байкала. Под редакцией Н.Н. Пузырева. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1981. 105 с.
- Кузьминых Ю.В.* Глубинное геоэлектрическое строение Южного Забайкалья по данным магнитотеллурических зондирований Диссертация канд. геол. - мин. наук. Иркутск: Институт земной коры., 1994. С. 175.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. и др.* Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 250 с.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Буглова С.Г.* Вертикальная и горизонтальная составляющие электротеллурического поля на озере Байкал и их связь с электропроводностью среды // Физика Земли. 2008. № 3. С. 73-83.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Моги Т.* Методика и результат мониторинга естественного электрического поля Земли в Байкальской рифтовой зоне // Физика Земли. 2007. № 11. С. 37-49.
- Морозова Г.М., Дашевский Ю.А., Неведрова Н.Н., Грехов И.О.* Глубинное распределение электропроводности и поле напряжений в земной коре Байкальского прогностического полигона // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 332-345.
- Поспеев В.И., Михалевский В.И.* Исследование на юге Сибирской платформы и в Байкальской рифтовой зоне // Исследования теплового и электромагнитного полей в СССР. М.: Наука, 1976. С. 97-106.
- Поспеев А.В.* Геоэлектрика континентальной тектоносферы. Автореферат диссертации докт. геол.-мин. наук. Иркутский технический университет, 1998. 34 с.
- Ротанова Н.М., Пушков А.Н.* Глубинная электропроводность Земли. М.: Наука, 1982. С. 332-345.
- Сейсмотектоника, глубинное строение и сейсмичность северо-востока Байкальской рифтовой зоны. Отв. ред. В.П. Солоненко. Новосибирск: Наука, СО. 1975. 104 с.
- Bahr K.* Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // J. Geophysics. 1988. 62. P. 119-127.
- Mackie K.L., Smith J.T., Madden T.R.* Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations: the magnetotelluric example // Radio Science. 1994. V. 29. P. 923-935.
- Moroz Yu.F., Pospiev A.V.* Deep electrical conductivity of East Siberia and Far East of Russia // Tectonophysics. 1995. V. 245. P. 85-92
- Popov A.M.* A Deep Geophysical Study in the Baikal Region // PAGEOPH. 1990. V. 134. № 4. P. 575- 587.
- Swift C.M.* A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the Southwestern United States. Ph. D. Dissertation, M/T. Cambridge. 1967. 252 p.
- Wannamaker P.E., Stodt J.A., Rijo L.A.* A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling // Geophys. J.R. Astr. Soc. 1987. V. 88. P. 277-296.

DEEP GEOELECTRIC SECTION OF THE BAIKAL RIFT

Yu.F. Moroz^{1, 2}, T.A. Moroz¹

¹The Institute of Volcanology and Seismology (IVS) RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky

²Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude

The paper considers magnetotelluric profile, which crosses the Baikal rift zone. Special attention is given to the analysis of magnetotelluric profile data obtained from the Baikal Lake ice. Key features of the magnetotelluric profile were determined. They were studied in the hollow test model using 3-D and 2-D modeling. The interpretation was based on magnetotelluric curves, which were directed along and across the hollow. Within the hollow, longitudinal and lateral MT curves in low-frequency region vary greatly in the level of conductivity. This is a characteristic feature of the lake hollow. The south-eastern boundary of the hollow in the Baikal Lake was determined using data on bimodal interpretation of MT curves. Inversion of curves resulted in creation of geoelectric section of the Baikal rift zone. The section contains deep conductive layers. The possible origin of the conductive layers is provided.

Keywords: magnetotelluric sounding, geoelectric section, rift zone, deep electrical conductivity.