

УДК 550.837.2

ВЕРТИКАЛЬНАЯ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ И ИХ СВЯЗЬ С ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ СРЕДЫ

© 2008 г. Ю. Ф. Мороз^{1,2}, Т. А. Мороз^{1,2}, С. Г. Буглова²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

²ФГУНППГП “Иркутскгеофизика”, г. Иркутск

Поступила в редакцию 11.07.2006 г.

Выполнены синхронные наблюдения электротеллурического поля со льда озера и на берегу. На озере отношение вертикального электрического поля к горизонтальному в диапазоне периодов от первых секунд до первых минут составляет сотые и тысячные доли, т.е. на уровне шума. Полученный результат свидетельствует в пользу модели плоской волны. На береговой станции вертикальное поле соизмеримо с горизонтальным, что связано с геоэлектрической неоднородностью среды. Для контроля за поведением неоднородности в спектрально-временной области использован электрический типпер. По данным мониторинга типпера выявлены аномальные изменения, связанные с землетрясениями с $K \geq 12$ на эпицентральных расстояниях до 300 км. На озере получена продольная кривая МТЗ свободная от влияния локальных геоэлектрических неоднородностей. На кривой в виде минимумов проявились глубинные проводящие слои.

Ключевые слова: вертикальное электротеллурическое поле, геоэлектрическая неоднородность, электрический типпер, магнитотеллурическое зондирование.

PACS: 91.25.Qj

При изучении неоднородных геологических сред с помощью естественного электромагнитного поля Земли большой интерес представляют вертикальные составляющие электротеллурического и геомагнитного полей. Эти составляющие поля содержат существенную информацию о геоэлектрической неоднородности среды. В лучшей мере изучена вертикальная составляющая геомагнитного поля, которая совместно с горизонтальными успешно используется в методах магнитовариационного профилирования и зондирования. Крайне мало информации о вертикальной электротеллурической компоненте, измеряемой в Земле. Следует упомянуть ряд работ, в которых проведены эксперименты с измерением вертикального электротеллурического поля [Jones, 1968; Benderitter, 1970; Владимиров, 1975а; Владимиров, 1975б; Подловилин, 1981; Чантладзе, 1975; Четаев и др., 1975]. К сожалению, по этим работам трудно судить о наличии вертикальных электрических токов в первичной электромагнитной волне. Существуют оценки, свидетельствующие о ничтожно малой части таких вертикальных токов. Так в бухтообразных возмущениях вклад электрического тока, перетекающего из ионосферы сквозь атмосферу, оценивается в десятые доли процента от общего тока в Земле [Ваньян, 1997]. Пульсации вертикального электрического поля ионосферного происхождения не пре-

вышают 0.1 В/м под источником и уменьшаются с удалением от него [Ваньян, 1980]. В работе [Бердичевский, 1971] для активных гармоник электротеллурического поля отношение вертикальной компоненты к горизонтальным на земной поверхности (со стороны Земли) по косвенным измерениям ожидается (для однородной Земли) менее 0.001.

Эти оценки основаны на том, что удельное электрическое сопротивление нижних слоев атмосферы является весьма большим и составляет $10^{12} - 10^{14}$ Ом · м. Это не дает возможности проникновения электрических токов сквозь атмосферу. Поэтому индукционный механизм возбуждения преобладает над гальваническим. Если непроводящая атмосфера исключает связь между ионосферой и Землей, то в горизонтально-слоистой среде вертикальная компонента будет равна 0. В горизонтально-неоднородной среде в результате перераспределения индуцированных электрических токов вертикальная компонента E_z будет отлична от нуля.

В то же время существует ряд работ, в которых по экспериментальным наблюдениям в воздухе пульсации E_z имеют амплитуду от 10 до 100 В/м [Тверской, 1949; Красногорская, 1973 и др.]. Следует отметить, что при измерении E_z в воздухе возникают трудности при выделении вариаций, связанных с ионосферно-магнитосферными про-

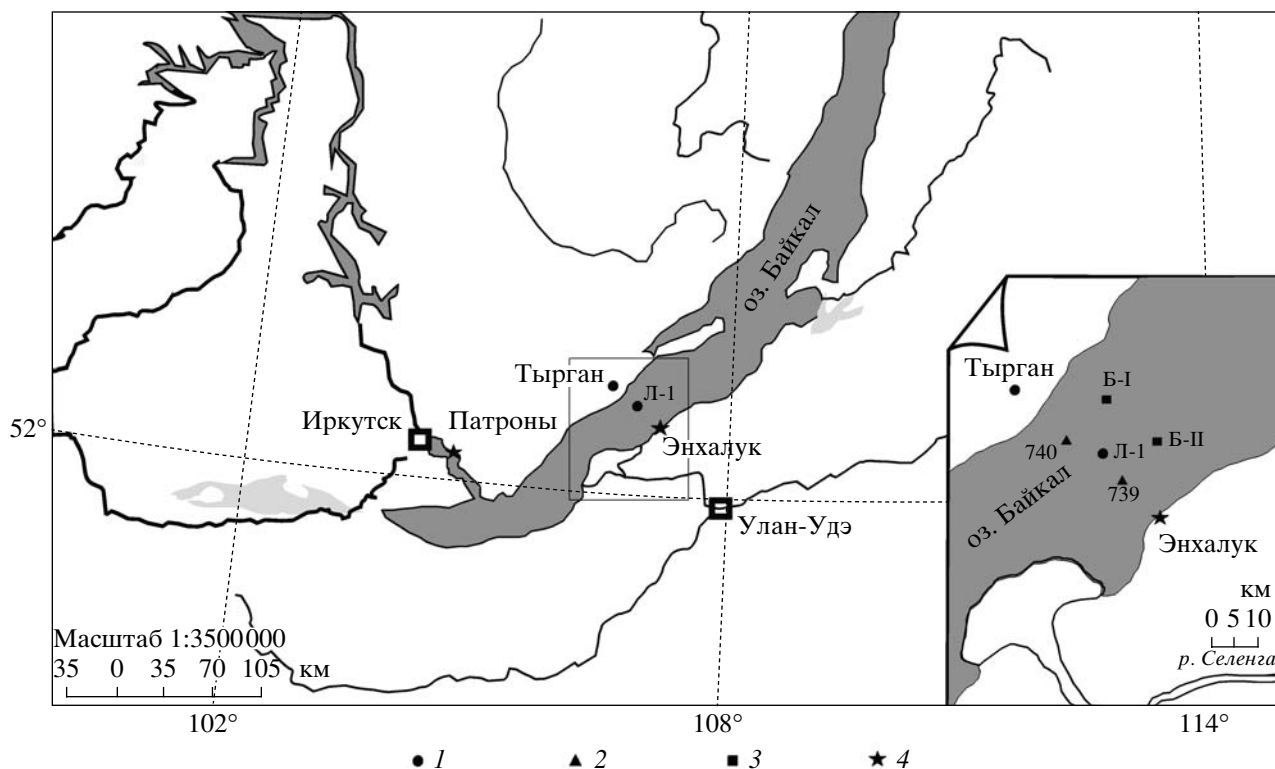


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений на оз. Байкал:

1 – пункты наблюдений электротеллурического поля – Л-1 (2006 г.) и п. Тырган (2003–2006 гг.); 2 – МТЗ 739, 740 (1983 г.); 3 – МТЗ Б-I и Б-II [Горностаев, 1979]; 4 – геомагнитные обсерватории. На вставке в более крупном масштабе показана схема расположения пунктов наблюдений электротеллурического поля и МТЗ прошлых лет.

цессами, так как присутствует перенос электрических зарядов ветром в приземном слое даже в ясную погоду. Поэтому, полученные результаты могут быть неточными.

Для оценки вертикальной компоненты электрического поля в первичной магнитной волне более эффективны измерения в водных акваториях, представляющих собой однородные изотропные среды. Такой эксперимент по измерению вертикальной составляющей электротеллурического поля в озере Байкал был выполнен Виноградовым П.А. [Виноградов, 1959]. По данным эксперимента отношение $E_z/E_{гор}$ для короткопериодных вариаций меняется от 1/10 до 1/65. При этом не указывается для каких конкретных периодов получены указанные отношения. Так как измерения электротеллурического поля производились с помощью аналоговой аппаратуры, то записи во времени были ограничены, а точность их была невысокой.

Поэтому мы вновь вернулись к измерениям вертикальной электрической компоненты в водной среде в связи с развитием систем наблюдений горизонтальных и вертикальных компонент электротеллурического поля вокруг южной части озера Байкал с целью контроля за геодинамическими процессами, протекающими в Байкальской риф-

товой зоне. Важная роль при этих исследованиях отводится вертикальной составляющей электротеллурического поля для контроля за поведением геоэлектрической неоднородности среды.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Регистрация электротеллурического поля производилась в зимний период 2006 г. одновременно на озере Байкал и на береговой станции в п. Тырган с резко выраженной геоэлектрической неоднородностью среды. На озере Байкал пункт наблюдений находился в его средней части (рис.1). Глубина озера здесь равна 1 км. Наблюдения выполнены со льда озера в период с 02.02.06 – 10.04.06 гг., когда его толщина была не менее 1 м. Для измерения горизонтальных составляющих электротеллурического поля использованы основные линии длиной 500 и дублирующие 250 м. Линии ориентированы вдоль и поперек оз. Байкал. Они были вморожены в лед. Для измерения вертикальной составляющей электротеллурического поля использована линия длиной 250 м. В качестве заземлений использованы свинцовые электроды, погруженные в воду на глубину 2 и 252 м. Регистрация вариаций электротеллурического поля производилась с помощью автоматизированного прибора IAE с цифровой регистра-

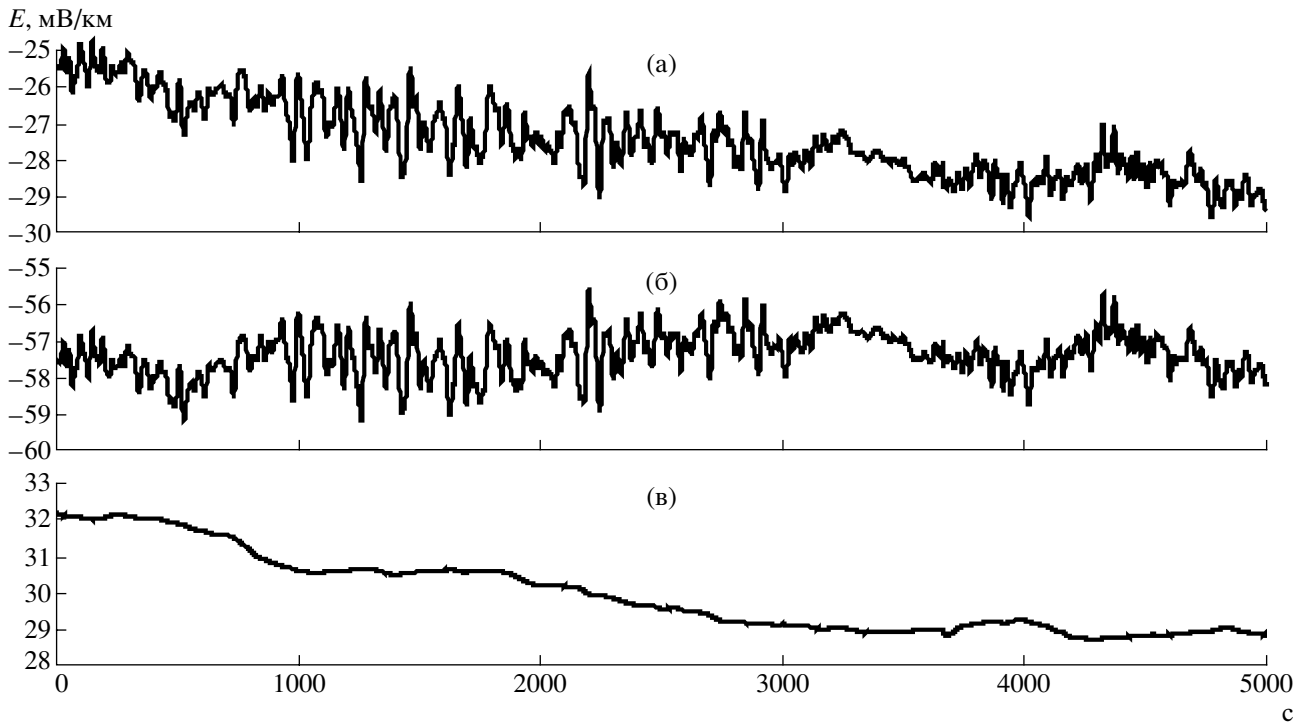


Рис. 2. Графики напряженности электротеллурического поля по направлению вдоль озера Байкал: (а) и (б) – графики для основной и дублирующей линий; (в) – график разности между (а) и (б). Время наблюдений: 12.03.06 г. (7ч : 26 м : 25 с – 8 ч : 49 м : 45 с).

цией с дискретностью 1 секунда. Прибор размещен в углублении льда. Оно было перекрыто изоляционным материалом и сверху ледовым покрывалом. Температура в приборе поддерживалась +4°C. На дневную поверхность были выведены провода для снятия информации, которая производилась один раз в десять дней.

В пункте Тырган одновременно осуществлялась регистрация горизонтальных и вертикальной составляющих электротеллурического поля. Горизонтальные составляющие ориентированы по направлению осей геоэлектрической неоднородности среды. Для регистрации вертикальной составляющей использована скважина глубиной 44 м, затемпонирующая глиной. В качестве электродов также использованы свинцовые электроды, погруженные в Землю на глубины 4 и 44 м. Регистрация электротеллурического поля производилась с дискретностью 10 с. Наряду с этим регистрировались вариации геомагнитного поля компонент H, D и Z в обсерваториях Энхалук с дискретностью 1 мин и Патроны с дискретностью 1 сек (рис. 1).

КРАТКАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Озеро Байкал в первом приближении представляет собой квазидвумерную неоднородность, вытянутую на 636 км, при средней ширине около 50 км. Удельное электрическое сопротивление

воды 200–300 Ом · м. На дне озера залегают низкоомные отложения со средним продольным сопротивлением в первые единицы Ом · м. Мощность этих отложений по предварительным оценкам составляет первые тысячи метров. Предполагается, что осадки подстилаются породами кристаллического фундамента сопротивлением в первые тысячи Ом · м. Фундамент может быть разбит разломами на крупные блоки. Бортовые части Байкальской впадины сложены дислоцированными и метаморфическими породами сопротивлением от первых сотен до первых тысяч Ом · м. Северо-западный борт впадины более крутой, чем юго-восточный. Впадина озера ограничена крупными разломами протяженностью в первые сотни – тысячи километров. Ширина зон разломов оценивается в первые десятки – сотни метров и более. Предполагается, что литосфера под Байкалом содержит проводящие слои, связанные с повышенным содержанием жидких флюидов.

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ

При регистрации электрического поля Земли с помощью электродов, находящихся в воде, возможны различные приэлектродные эффекты, которые могут исказить вариации электротеллурического поля. Для проверки возможных искажений мы воспользовались данными регистрации электрического поля по основному и дублирующему

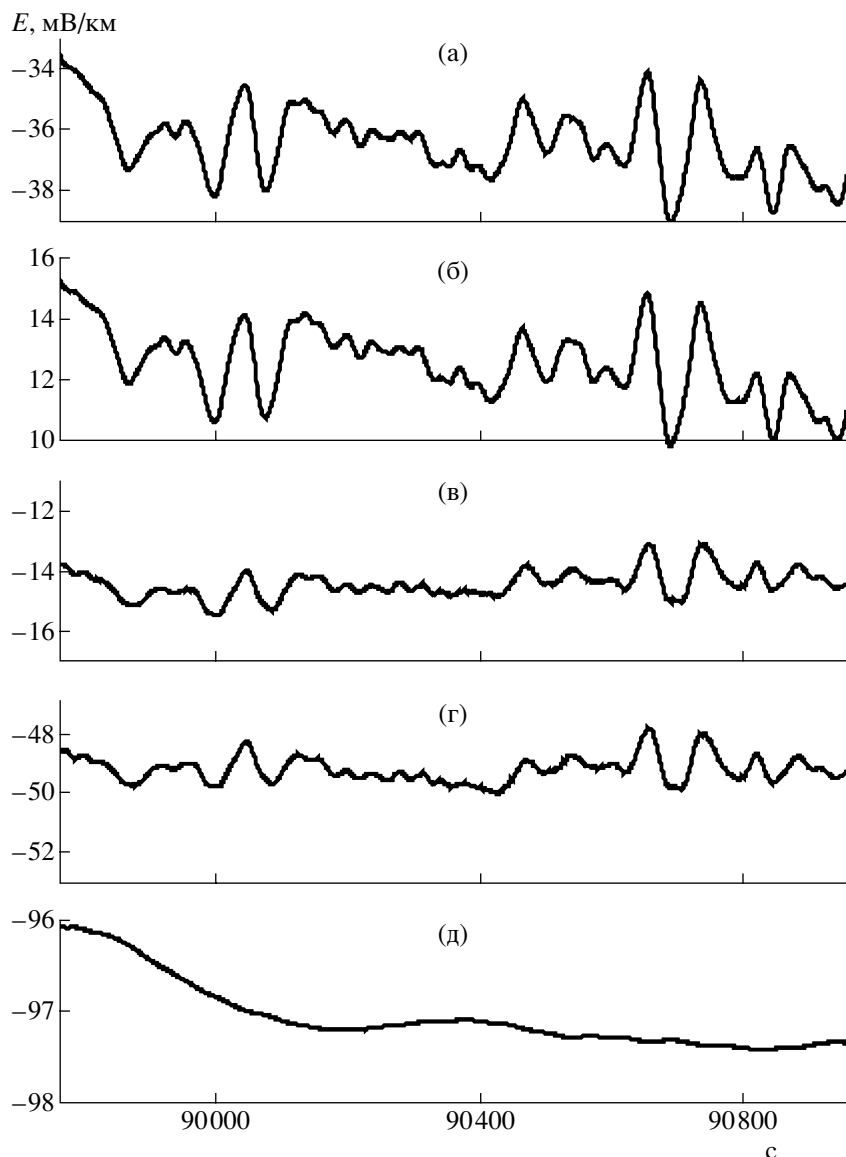


Рис. 3. Графики напряженности электротеллурического поля: (а) и (б) – продольные горизонтальные составляющие поля для линии – 500 и 250 м; (в) и (г) – поперечные горизонтальные составляющие поля для линий длиной – 500 и 250 м; (д) – вертикальная составляющая поля для линии – 250 м. Время наблюдений: 13.03.06 г. (01 ч : 01 м : 00 с – 01 ч : 06 м : 00 с).

щему каналам, ориентированным вдоль оз. Байкал. График разницы между временными рядами напряженности поля, приведенный на рис. 2, свидетельствует об отсутствии высокочастотных вариаций, индуцированных внешним источником. В поведении остаточного графика отмечаются лишь изменения напряженности электрического поля, которые могут быть связаны с внутренними источниками. Таким образом, можно полагать, что вариации, индуцируемые внешним источником, регистрируются с помощью электродов, помещенных в водную среду оз. Байкал без каких-либо искажений на основном и дублирующем каналах. Следовательно, с помощью данных электродов можно регистрировать индуцированные

вариации электротеллурического поля интенсивностью в первые единицы мВ/км, что достаточно для дальнейшего анализа.

Обратимся к данным совместной регистрации вертикальной и горизонтальных составляющих электрического поля на оз. Байкал, приведенных в качестве примера на (рис. 3). В поведении горизонтальных составляющих электротеллурического поля проявились короткопериодные колебания ($T = 30\text{--}40$ сек). Интенсивность продольного электротеллурического поля больше поперечного в несколько раз. Это, по-видимому, связано с поляризацией поля из-за влияния геоэлектрической неоднородности, создаваемой вытянутой впадиной озера. Следует отметить, что данные

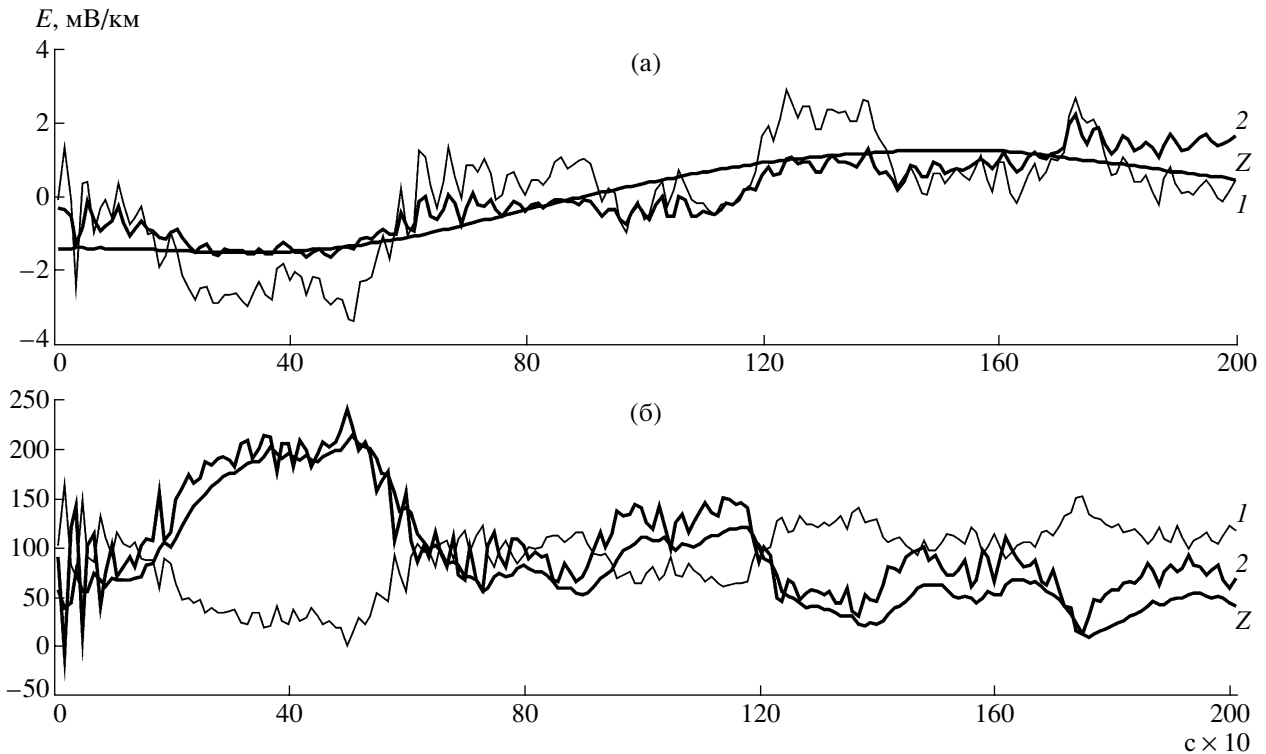


Рис. 4. Сопоставление графиков напряженности электротеллурического поля на оз. Байкал (а) и в п. Тырган (б): 1 и 2 – продольные и поперечные составляющие поля для линии – 250 м. Z – вертикальные составляющие поля для линии – 250 м на озере (а) и 40 м в п. Тырган (б). Время наблюдений: 11.03.06 г. (1 ч : 26 м : 25 с – 1 ч : 59 м : 45 с).

вариации не выражены в вертикальной составляющей поля (рис. 5д).

Рассмотрим сопоставление составляющих электротеллурического поля, зарегистрированных одновременно на оз. Байкал и в п. Тырган. Графики на рис. 4 приведены с дискретностью 10 с. С такой дискретностью осуществляется регистрация поля в п. Тырган. На рис. 4 видно, что вариации с периодами в первые минуты хорошо выражены в горизонтальных составляющих на оз. Байкал и во всех составляющих в п. Тырган. В вертикальной составляющей поля на оз. Байкал данные вариации отсутствуют. В то же время на обоих пунктах как в горизонтальных, так и в вертикальных составляющих поля проявилась длиннопериодная вариация. Полупериод этой вариации в вертикальной компоненте на оз. Байкал равен примерно 10 мин. Это свидетельствует о зависимости интенсивности вариаций вертикального поля от их периода. Оценки показывают, что на оз. Байкал отношение вертикальной составляющей поля к горизонтальным в зависимости от периода выглядит следующим образом. На периодах от первых секунд до первых десятков секунд это соотношение составляет тысячные и сотые доли единицы. При увеличении периодов до первых минут данное соотношение не превышает 0.1 и только на перио-

дах от первых десятков минут до 1 часа оно возрастает до 0.5–1.

Таким образом, выполненный анализ свидетельствует, что в средней части озера вариации с периодами от первых секунд до первых минут практически отсутствуют в вертикальном электротеллурическом поле. Это можно объяснить тем, что водная толща и подстилающие ее низкоомные осадки в первом приближении представляют собой однородную среду, в которой длина электромагнитной волны на коротких периодах соизмерима с шириной оз. Байкал. В такой однородной среде вертикальные электрические токи близки к нулю. Полученный результат свидетельствует в пользу модели плоской волны. Он согласуется с приближенными оценками, приводимыми в работах [Бердичевский, 1971; Ваньян, 1997].

Появление в вертикальной компоненте электротеллурического поля вариаций с периодами от первых десятков до часа и возможно более связано, по-видимому, с влиянием геоэлектрической неоднородности за счет бортов Байкальской впадины. Оценки показывают, что длина электромагнитной волны на указанных периодах существенно превышает ширину оз. Байкал.

Представление о поведении низкочастотного электрического поля дают графики среднечасо-

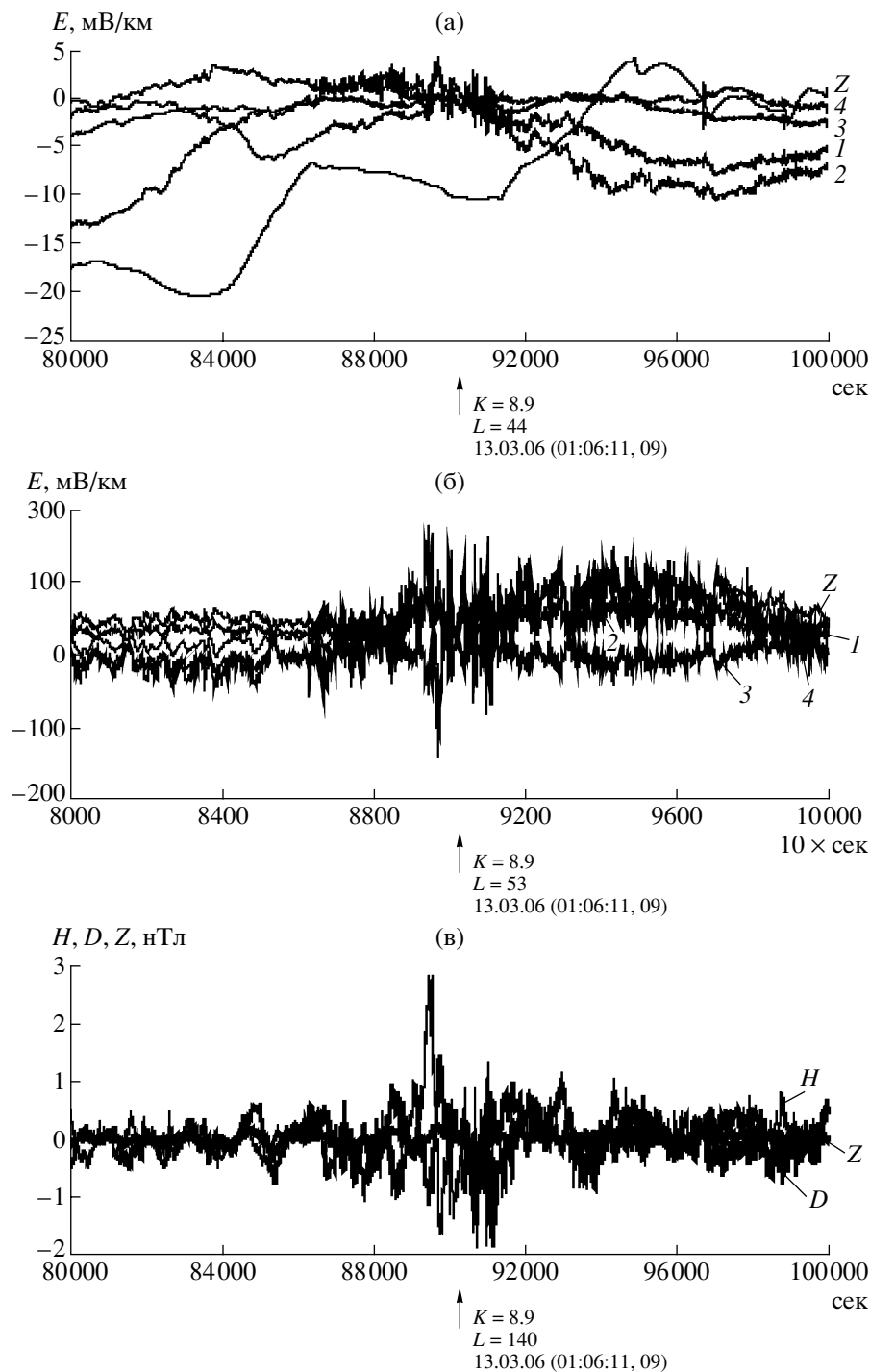


Рис. 5. Сопоставление вариаций электротеллурического поля на оз. Байкал (а), в п. Тырган (б) и геомагнитного поля в обсерватории Патроны (в): 1, 2 и 3, 4 – продольные и поперечные составляющие электротеллурического поля, соответственно. Z – вертикальные составляющие электротеллурического и магнитного полей; H, D – горизонтальные составляющие геомагнитного поля. На временной оси указан момент землетрясения с $K = 8.9$ на эпицентральных расстояниях L от пунктов наблюдений.

вых значений напряженности. Анализ показывает, что графики различаются между собой на основных и дублирующих линиях. Это обусловлено тем, что длиннопериодные вариации поля с пери-

одом более 1 суток могут быть связаны с влиянием внутренних электрических источников за счет электрохимических, электрокинетических, биоэлектрических и других эффектов.

**АНОМАЛЬНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ
В ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Во время наблюдений на оз. Байкал в электротеллурическом поле проявились аномальные высокочастотные возмущения, которые выражены только в горизонтальных составляющих поля (рис. 5а). Подобные возмущения проявились также и на прибрежной станции в п. Тырган (рис. 5б). Здесь они выражены также в вертикальной составляющей электротеллурического поля. Для лучшей наглядности сопоставление E_z на оз. Байкал и в п. Тырган приведено на рис. 6. Интенсивные вариации в п. Тырган связаны с низкой электропроводностью верхних частей земной коры и сильной геоэлектрической неоднородностью среды. Ко времени возмущений электротеллурического поля приурочен момент землетрясения с $K = 8.9$. Эпицентр его находится под дном Байкала на расстоянии 53 км от п. Тырган и на расстоянии 44 км от пункта наблюдений на оз. Байкал. Интенсивные возмущения поля начались за 15 минут до землетрясения. Начало возмущений выражено интенсивными вариациями напряженности поля в 4 мВ/км на оз. Байкал и 300 мВ/км в п. Тырган.

Графики электротеллурического поля сопоставлены с геомагнитными наблюдениями в обсерватории Патроны, где вариации поля зарегистрированы с дискретностью 1 с (рис. 5в). Анализ показал, что вариации геомагнитного поля подобны вариациям электротеллурического поля. Можно полагать, что аномальные возмущения в электротеллурическом поле скорее всего вызваны внешним источником электромагнитного поля. Они не находят отражение в вертикальной составляющей электротеллурического поля на оз. Байкал. Имеют ли эти возмущения связь с землетрясением? На этот вопрос ответить трудно. Следует отметить, что существуют представления о литосферно-ионосферных связях, в рамках которых возможны возмущения ионосферных токов за счет электромагнитных полей в литосфере в связи с землетрясением.

Таким образом, данные экспериментальных наблюдений свидетельствуют, что вертикальные электрические токи практически отсутствуют в первичном электромагнитном поле. Вариации вертикальной составляющей электрического поля, регистрируемые в скважинах, связаны с геоэлектрической неоднородностью среды. Это дает возможность с помощью вертикальной составляющей поля контролировать поведение геоэлектрической неоднородности среды во времени. С этой целью можно, по аналогии с геомагнитным полем [Бердичевский, 1981; Schmuker, 1970; Parkinson, 1973; Wiese, 1965], использовать соотношение между вертикальной и горизонтальными состав-

ляющими электротеллурического поля в следующем виде:

$$E_z = \hat{P} \vec{E}_{гор}, \quad \text{где} \quad \hat{P} = |P_{zx}P_{zy}|$$

$E_z = P_{zx}E_x + P_{zy}E_y$, где E_z, E_x, E_y – составляющие наблюдаемого электрического поля, P_{zx}, P_{zy} – компоненты матрицы, зависящие от частоты, распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей.

Матрица \hat{P} представляет собой электрический типпер, преобразующий горизонтальные составляющие в вертикальную. Электрический типпер может быть представлен в следующем виде:

$$\overline{ReP} = ReP_{zx}\bar{I}_x + ReP_{zy}\bar{I}_y,$$

$$\overline{ImP} = ImP_{zx}\bar{I}_x + ImP_{zy}\bar{I}_y.$$

Векторы \overline{ReP} и \overline{ImP} называются вещественными и мнимыми электрическими стрелками. На рис. 7 в качестве примера приведены модули вещественных и мнимых стрелок на периоде 330 с за время наблюдений с 01.08.2003 г. по 06.02.2006 г. Временные ряды указанных стрелок сопоставлены с моментами сильных землетрясений с $K \geq 12.4$, происшедших за рассматриваемый период на эпицентральных расстояниях до 300 км. В поведении модуля вещественной стрелки проявились аномальные изменения, которые могут быть связаны с землетрясениями. Пункт наблюдений расположен в зоне разлома. Поэтому аномальные изменения типпера можно объяснить процессами, протекающими в зоне разлома в связи с землетрясениями. Процессы могут быть выражены изменением обводненности и минерализации вод в зоне разлома, а также другими причинами, в результате которых меняется вклад активных токов в вертикальную компоненту электротеллурического поля, что находит отражение в аномальном поведении типпера.

**МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОЕ
ЗОНДИРОВАНИЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Полученные со льда озера двухмесячные непрерывные ряды напряженности электротеллурического поля по основным и дублирующим линиям использованы для магнитотеллурического зондирования. В качестве горизонтальных компонент геомагнитного поля приняты данные обсерватории Энхалук, расположенной в 20 км от пункта наблюдений. Регистрация вариаций магнитного поля осуществляется в обсерватории с дискретностью 1 мин. Поэтому временные ряды электротеллурического поля, полученные с дискретностью 1 секунда, пересчитаны с дискретностью 1 мин.

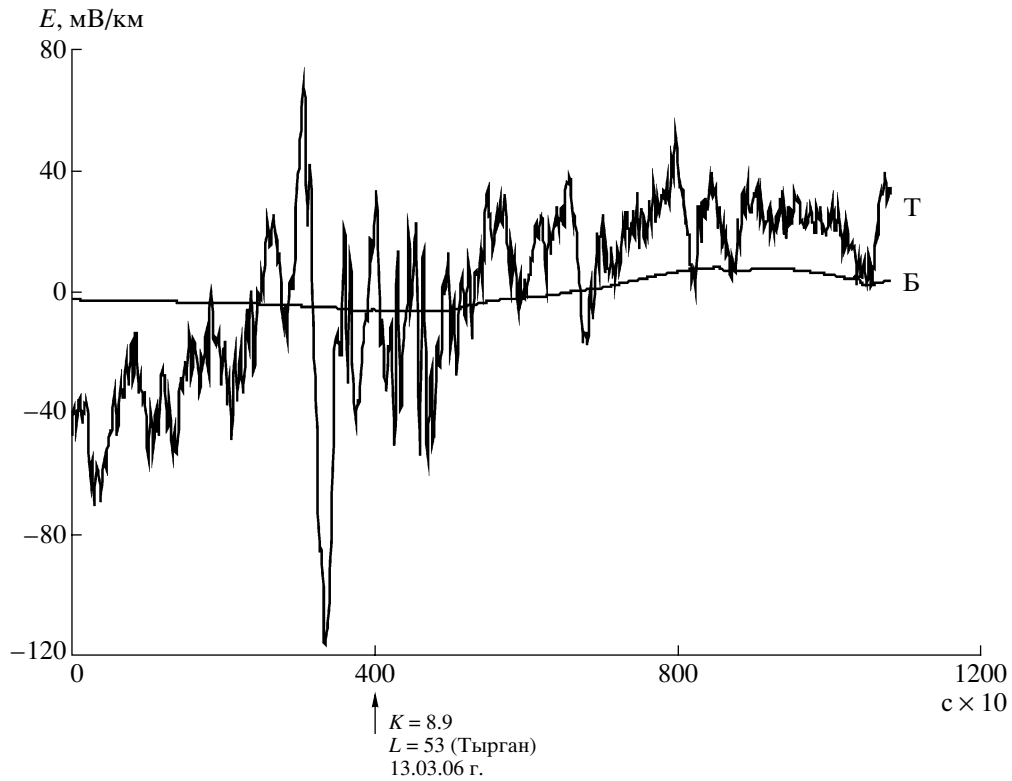


Рис. 6. Сопоставление графиков напряженности вертикального электротеллурического поля на оз. Байкал (Б) и в Тырган (Т).

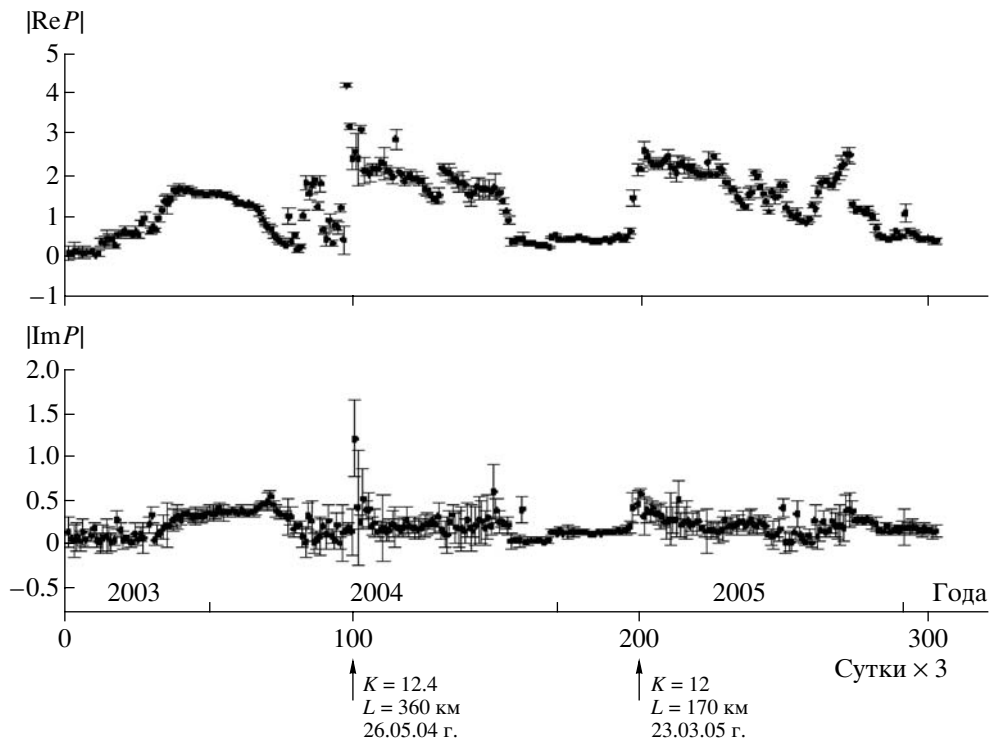


Рис. 7. Графики модулей вещественных и мнимых электрических стрелок на периоде 330 с в п. Тырган. Время наблюдений: 01.08.03 – 06.02.06 гг. На временной оси показаны моменты землетрясений с $K \geq 12$ на эпицентральных расстояниях до 360 км.

Обработка выполнена с помощью программы, алгоритм которой основан на известной робастной методике, разработанной Дж. Ларсеном [Larsen, 1996]. Данная программа позволяет определить передаточные магнитотеллурические функции и при этом эффективно подавлять влияние электромагнитных полей не магнитотеллурического происхождения (солнечно-суточные и приливные гармоники, промышленные шумы и др.).

В результате обработки удалось получить устойчивые значения импедансов только по направлению вдоль оз. Байкал. Поперечные импедансы определены с большим разбросом. Они имеют значения сотые и тысячные доли Ом · м. С чем это связано, установить не удалось. Возможно из-за низкой интенсивности поля в поперечном направлении и влияния высокоомных крутых бортов впадины озера.

Полученные продольные кривые кажущихся сопротивлений в диапазоне периодов от 400 с до 20000 с по основным и дублирующим линиям приведены на рис. 8. Кривые практически совпадают между собой. Это свидетельствует, что водная среда является однородной и не содержит локальных геоэлектрических неоднородностей. В то же время необходимо учитывать, что на низких частотах кривая МТЗ может быть затронута влиянием высокоомных бортов впадины.

Следует отметить, что в предшествующие годы со льда озера выполнено несколько магнитотеллурических зондирований. Два МТЗ получены с помощью аналоговой аппаратуры [Горностаев, 1979] и два получены в 1983 г. с использованием цифровой аппаратуры. На рис. 8 низкочастотные кривые, полученные нами, совмещены с другими кривыми в высокочастотной области для глубоководной части озера. Кривые МТЗ приведены в совмещении со стандартной кривой кажущегося электрического сопротивления. Важно отметить, что кривые МТЗ, полученные в разные годы с различной аппаратурой, удовлетворительно согласуются по уровню сопротивлений с низкочастотными кривыми, которые увязываются со стандартной кривой кажущегося сопротивления.

На обобщенной продольной кривой МТЗ выражены минимумы в диапазоне периодов 0.8–4 с; 400–900 с и 5000–8000 с. Первый минимум связан с осадочным чехлом в озере, второй и третий – отражают, по-видимому, наличие глубинных проводящих слоев. Для инверсии кривой МТЗ мы использовали численное моделирование. Байкальский рифт в первом приближении может быть аппроксимирован двумерно-неоднородной геоэлектрической моделью. Поэтому для решения обратной задачи использовано двумерное численное моделирование по программе [Wannamaker, 1987]. Подбор параметров модели осуществлялся интуитивно с учетом априорных геолого-геофизи-

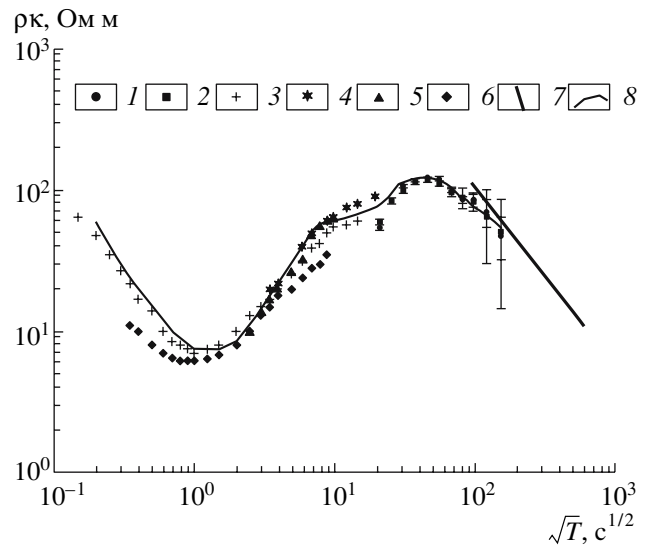


Рис. 8. Совмещенные продольные кривые МТЗ, полученные на озере Байкал. 1 и 2 – МТЗ (Л-1) для основных и дублирующих линий (2006 г.); 3–4 – МТЗ 740 и 739 (1983 г.); 5 и 6 – МТЗ Б-1 и Б-2 [Горностаев, 1979]; 7 – стандартная кривая кажущихся электрических сопротивлений; 8 – модельная продольная кривая МТЗ.

ческих данных. Был рассчитан ряд вариантов. Только на пятнадцатом варианте было достигнуто удовлетворительное согласие экспериментальной и модельной кривых в низкочастотной области, где выделяются минимумы, отражающие глубинные проводящие слои. В этой области для лучшего согласования кривых пришлось увеличить ширину нижнего глубинного проводящего слоя, т.е. вывести его за пределы Байкальской впадины. Это не противоречит существующим представлениям о глубинной электропроводности Прибайкалья и Забайкалья. В короткопериодной части кривой вряд ли имеет смысл добиваться лучшего согласия модельной и экспериментальных кривых, так как здесь отмечается увеличенная дисперсия кажущихся электрических сопротивлений экспериментальных кривых, полученных в различных районах озера Байкал.

На рис. 9 приведен геоэлектрический разрез, полученный по данным инверсии продольной кривой МТЗ в пункте Л-1. На нем видно, что в литосфере озера Байкал выделяются проводящие слои на глубинах 30–50 км и 170–230 км с удельными электрическими сопротивлениями 15 и 10 Ом · м.

В настоящей статье, по-видимому, нет смысла в дальнейшем обсуждать глубинную структуру электропроводности под озером Байкал в связи с ограниченным числом кривых МТЗ на озере. В ближайшее время в связи с развитием систем электромагнитного мониторинга будут получены МТЗ вокруг и со льда озера. Это даст возмож-

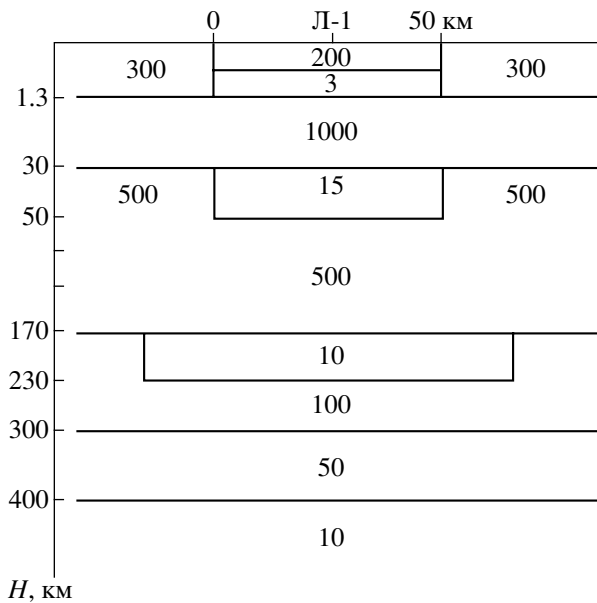


Рис. 9. Глубинная геоэлектрическая модель озера Байкал. Л-1 – место расположения пункта, в котором рассчитана модельная кривая МТЗ. Цифрами обозначены удельные электрические сопротивления в Ом·м.

ность более обоснованно исследовать глубинную электропроводность озера Байкал.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные наблюдения электротеллурического поля на оз. Байкал свидетельствуют, что отношение вертикальной составляющей поля к горизонтальным в диапазоне периодов от первых секунд до первых минут составляет сотые-тысячные доли, т.е. на уровне шума. Это связано с тем, что водная толща и подстилающие ее осадки в озере представляют собой практически однородную среду. Полученный результат свидетельствует в пользу модели плоской волны, в рамках которой в однородной среде отсутствуют вертикальные электрические токи. Появление в вертикальной компоненте электрического поля вариации с периодом в первые десятки минут и более связано, по-видимому, с влиянием геоэлектрической неоднородности за счет бортов Байкальской впадины.

2. В электротеллурическом поле выявлено аномальное возмущение, предвещающее землетрясение примерно за 15 минут. Возмущение не проявилось в вертикальной составляющей электротеллурического поля на оз. Байкал. Природа этого возмущения не установлена. Предполагается, что оно вызвано внешним источником электромагнитного поля.

3. Вариации вертикального электрического поля, регистрируемые в скважине, связаны с гео-

электрической неоднородностью среды. Это дает возможность с помощью вертикальной и горизонтальных составляющих электрического поля контролировать поведение геоэлектрической неоднородности во времени. Данная задача решена с использованием электрического типпера. В п. Тырган по данным мониторинга типпера выявлены аномальные изменения, которые могут быть связаны с землетрясениями с $K \geq 12.4$ на эпицентральных расстояниях до 300 км. Аномалии типпера, по-видимому, вызваны изменением обводненности пород и минерализацией вод в связи с землетрясениями, а также другими геолого-геофизическими явлениями.

4. По данным наблюдений горизонтальных составляющих электротеллурического поля на оз. Байкал и вариаций геомагнитного поля в обсерватории Энхалук получены продольные кривые МТЗ в диапазоне периодов от 400 с до 20000 с для основных и дублирующих линий. Данные кривые совпадают между собой и удовлетворительно согласуются с короткопериодными кривыми прошлых лет и со стандартной кривой кажущегося сопротивления. Это свидетельствует, что продольные кривые слабо затронуты влиянием геоэлектрических неоднородностей. На кривых проявились глубинные проводящие слои. По данным численного двумерного моделирования они находятся на глубинах 30–50 км и 170–230 км с удельным электрическим сопротивлением 15 и 10 Ом·м. Результаты являются предварительными. Они будут уточняться в ближайшие годы с получением МТЗ на берегу и со льда озера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Дмитриев В.И.* О возможности пренебрежения вертикальными токами при магнитотеллурическом зондировании // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1971. № 5. С. 69–78.
- Бердичевский М.М., Жданов М.С.* Интерпретация аномалий переменного электрического поля Земли. М.: Недра. 1981. 327 с.
- Ваньян Л.Л., Бутковская А.И.* Магнитотеллурические зондирования слоистых сред. М.: Недра. 1980. С. 227.
- Ваньян Л.Л.* Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир. 1997. 218 с.
- Виноградов П.А.* Измерение вертикальной составляющей электротеллурического поля в оз. Байкал // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1959. № 1. С. 83–86.
- Владимиров Н.П., Ан В.А., Вишнев В.С., Краснобаева А.Г. и др.* Характеристика вертикальных компонент земных токов на Тукейском прогностическом массиве // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1975а. № 3. С. 91–94.
- Владимиров Н.П., Ан В.А., Краснобаева А.Г. и др.* Характеристика вертикальных земных токов на Жукейском кристаллическом массиве // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1975б. № 3. С. 91–94.

- Горностаев В.П.* Магнитотеллурические исследования впадины оз. Байкал // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 6. С. 99–101.
- Красногорская Н.В., Ремизов В.П.* О некоторых результатах измерения вариаций электрического поля // Докл. АН СССР. 1973. 212. № 2. С. 345–348.
- Подловиллин Е.С., Габлин Н.С., Карюгин П.Ф., Кораблев Л.В.* Вертикальное теллурическое профилирование в глубоких скважинах. VI Всесоюзная школа-семинар по электромагнитным зондированиям. Тезисы докладов. М. 1981. С. 34.
- Тверской П.Н.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометиздат. 1949. С. 60, 61, 68.
- Чантладзе И.К.* Исследования структуры поля геомагнитных пульсаций на кристаллических массивах. Автореф. канд. дис. М. 1975.
- Четаев Д.Н., Моргунов В.А., Чантладзе И.К., Шаманин С.В., Алексеев Б.М., Папушина Л.Б.* Некоторые экспериментальные результаты исследования естественного электромагнитного поля Земли в диапазоне 0.1–0.01 Гц. Тезисы докладов на XI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн, ч. III. Казань. 1975.
- Benderitter J., Burear J., Dupis A., Geinlean B.* Enregistrement de la composante du champ tellurique, normale a la surface du sol. C.r. Acad. Sci. 1970. 271. V. 9. P. 498–500.
- Jones F.W., Geldart L.P.* Vertical telluric currents at separated locations // Earth and Planet, Sci, Lett. 1967. № 2. V. 3. P. 174–176.
- Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiodelisi A., Rieven S.* Robust smooth magnetotelluric transfer functions // Geophysical Journal International. 1996. V. 124. P. 801–819.
- Parkinson W.D.* Direction of rapid geomagnetic fluctuation // Geophys. J. 1959. V. 2. P. 1–14.
- Schmucker U.* Anomalies of geomagnetic variations in the South-Western United States. Berkley – Los Angeles – London: Univ. California Press. 1970. 165 p.
- Vozoff K.* The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // Geophysics. 1972. V. 37. P. 98–141.
- Wannamaker P.E., Stodt J.A., Rijo L.* A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modeling // Geophys.J.R. Astr. Soc. 1987. V. 88. P. 277–296.
- Wiese H.* Geomagnetische Tiefentelluric. Berlin: Deutsche Akad. Wiss. 1965. 146 p.