

Методика и результаты мониторинга естественного электрического поля Земли в Байкальской рифтовой зоне

© 2006 г. Ю.Ф. Мороз^{1,2}, Т.А. Мороз^{1,2}, Т. Моги³

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

² *ФГУПП «Иркутскгеофизика», Министерство природных ресурсов, г. Иркутск*

³ *Институт сейсмологии и вулканологии, Университет Хоккайдо, Япония*

Изучены вариации горизонтальных и вертикальных составляющих электрического поля Земли в диапазоне периодов от первых десятков секунд до суточных вариаций и более. Вариации, вызванные внешним ионосферным источником, использованы для изучения геоэлектрической неоднородности среды. Для этого по аналогии с геомагнитным полем вводится электрический типпер. Рассмотрена его частотная характеристика. Наряду с ним изучен магнитотеллурический импеданс с привлечением удаленных геомагнитных обсерваторий. По данным мониторинга электрического типпера и магнитотеллурического импеданса выявлены аномальные эффекты, которые могут быть связаны с землетрясениями с $K \geq 12$. Разработана методика выделения аномалий электрического поля, вызванных внутриземными электрическими источниками.

Ключевые слова: электрический типпер, импеданс, мониторинг, электрическое поле Земли, геоэлектрическая неоднородность.

В геофизических полях, используемых для изучения геодинамических процессов, важное место занимает электромагнитное поле Земли, связанное с внешними (ионосферным, магнитосферным) и внутриземными источниками. Внешние электрические токи индуцируют в Земле магнитотеллурическое (МТ) поле различной частоты и интенсивности. Наблюдая на земной поверхности составляющие этого поля, можно контролировать во времени изменение электропроводности литосферы на различных глубинах. Наряду с магнитотеллурическим полем в Земле могут возникать электрические поля, вызванные внутриземными источниками, связанными с электрокинетическими, электрохимическими, пьезоэлектрическими и другими явлениями, которые отражают геодинамику литосферы.

Настоящая статья посвящена изучению электропроводности среды в Байкальской рифтовой зоне. Здесь в последние годы ведётся активная работа по созданию системы наблюдений электромагнитного поля вокруг южной части оз. Байкал. Важной частью этой системы является регистрация вариаций горизонтальных составляющих электрического поля на земной поверхности и его вертикальной составляющей в скважинах. Это дает возможность получить достаточно полную информацию о поведении электрического поля Земли в пространстве и во времени и его возможной связи с геодинамическими процессами в Байкальской рифтовой зоне. К настоящему времени накоплен большой объем информации в двух пунктах создаваемой сети: в пп. Узур и Тырган. На основе этих данных рассмотрены результаты изучения электрического поля Земли.

Методика наблюдений

Пункт Узур находится на острове Ольхон, а пункт Тырган на западном побережье оз. Байкал (рис.1). Расстояние между ними около 115 км. Пункты мониторинга электрического поля выбраны по данным предварительных наблюдений. Важно было, чтобы на них не было технических помех и геоэлектрическая среда являлась резко неоднородной. По результатам первоначальных наблюдений определены направления осей геоэлектрической неоднородности среды. Они ориентированы вдоль и вкrest простираения береговых линий острова Ольхон и озера Байкал. По этим направлениям ориентированы измерительные линии (рис.2). Длина основных диполей в пп. Тырган и Узур - 240 м и 250 м (01, 02, 03, 04), дополнительных - 120 м и 125 м (05, 06, 07, 08), соответственно. В качестве заземлений использованы свинцовые электроды, опущенные на глубину 4 м. Наряду с горизонтальными компонентами электрического поля на обоих пунктах осуществляется регистрация вертикальной компоненты в скважинах, затампонированных глиной. Глубина скважин 44 м. Длина вертикальных диполей 40 м. Регистрация вариаций электрического поля производится современной японской аппаратурой (DATAMARK) в цифровом виде, с дискретностью 10 с. Кроме этого на

удаленных обсерваториях Энхалук и Патроны регистрируются компоненты геомагнитного поля H , D и Z в цифровом виде с дискретностью 1 мин. (рис.1).

В качестве примера на рис.3 приведены суточные временные ряды электрического поля с дискретностью 10 с в пп. Узур и Тырган. Электротеллурические вариации выражены на графиках в виде «шума». Интенсивность этих вариаций в п. Тырган в 20 раз выше, чем в п. Узур, что связано с различным геологическим строением. Также следует обратить внимание, что в обоих пунктах интенсивность вертикального электрического поля заметно выше горизонтального. Это как будет показано ниже, связано с влиянием геоэлектрической неоднородности среды.

Интерпретация данных мониторинга электротеллурического поля

В основе электротеллурических исследований лежит допущение, что первичное поле можно представить полем плоской волны, нормально падающей на границу земля-воздух [Бердичевский, 1960; 1981]. В рамках этого приближения в горизонтально-однородных средах компонента E_z равна нулю. В средах, содержащих геоэлектрические неоднородности, компонента E_z отлична от нуля. Мониторинг вертикальной и горизонтальных компонент электрического поля дает информацию о геоэлектрических неоднородностях среды.

По аналогии с геомагнитным полем [Бердичевский, 1981; Schmucker, 1970; Parkinson, 1973; Wiese, 1965] связь между вертикальной и горизонтальными составляющими электротеллурического поля в частотной области можно представить в следующем виде:

$$E_z = \hat{P} \mathbf{E}_{\text{гор}},$$

$$\text{где } \hat{P} = \begin{bmatrix} P_{zx} & P_{zy} \end{bmatrix}$$

$$E_z = P_{zx} E_x + P_{zy} E_y,$$

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

Матрицу \hat{P} мы назовем электрическим типпером, по аналогии с магнитным типпером (tipper), введенным К.Возоффом [Vozoff,1972]. Как и магнитный типпер, электрический типпер представляет собой матрицу опрокидывания, преобразуя горизонтальную составляющую в вертикальную.

Инварианты матрицы \hat{P} записываются в следующем виде:

$$P = \sqrt{P_{zx}^2 + P_{zy}^2}, \quad \|\hat{P}\| = \sqrt{|P_{zx}|^2 + |P_{zy}|^2},$$

где $\|\hat{P}\|$ – норма матрицы.

Как и магнитный типпер [Бердичевский,1981; Schmucker, 1970; Parkinson, 1973; Wiese, 1965], электрический типпер можно изобразить графически в виде полярной диаграммы, вещественных и мнимых стрелок, электрического вектора.

Уравнение электрической полярной диаграммы имеет вид:

$$|P_{zy}(\alpha)| = \sqrt{P_{zx} \cos^2 \alpha + P_{zy} \sin^2 \alpha + 2\operatorname{Re} P_{zx} \bar{P}_{zy} \sin \alpha \cdot \cos \alpha},$$

где горизонтальная черта означает комплексную сопряженность.

Полярная диаграмма представляет собой симметричный овал или двухлепестковую кривую с взаимно перпендикулярными главными осями. В двумерной модели она имеет вид восьмерки с лепестками, вытянутыми в направлении перпендикулярном к оси однородности среды. Также выглядит диаграмма в осесимметричной модели. В этом случае лепестки вытянуты в радиальном направлении.

Электрический типпер может быть представлен в виде вещественной и мнимой стрелок:

$$\mathbf{ReP} = \operatorname{Re} P_{zx} \mathbf{I}_x + \operatorname{Re} P_{zy} \mathbf{I}_y$$

$$\mathbf{ImP} = \operatorname{Im} P_{zx} \mathbf{I}_x + \operatorname{Im} P_{zy} \mathbf{I}_y$$

Вектор **ReP** характеризует влияние активных избыточных токов, находящихся в фазе с горизонтальным электрическим полем. Вектор **ImP** отражает влияние реактивных избыточных токов, фаза которых отличается от фазы горизонтального электрического поля на $\pi/2$. В двумерной модели вещественные и мнимые стрелки коллинеарны.

По аналогии с магнитовариационным вектором [Бердичевский, 1991], электрический типпер можно изобразить в виде электрического вектора **V**, направленного по большой оси эллипса поляризации квазипоперечного горизонтального электрического поля и имеющего величину равную $\|\hat{P}\|$. Фаза вектора определяется как аргумент инварианта P .

$$\varphi = \arg P = \arg \sqrt{P_{zx}^2 + P_{zy}^2}.$$

Электрическая фаза не зависит от направления координатных осей. Она отражает вклад активных и реактивных токов. При φ близком к 0 или π , в E_z преобладает вклад активных токов, а при приближении φ к $\pi/2$ - вклад реактивных токов. Электрические полярные диаграммы, вещественные и мнимые стрелки, электрический вектор характеризуют геоэлектрическую неоднородность среды.

Обратимся к экспериментальным данным в п.Тырган, где мы располагаем более длинным временным рядом вертикальной и горизонтальных компонент электрического поля. Здесь наблюдения осуществляются с 2003 года. Для получения типпера использована программа [Larsen,1996;1997]. С ее помощью определены компоненты типпера P_{zx} , P_{zy} , вещественные (**ReP**) и мнимые стрелки (**ImP**), электрический вектор **V**, полярные диаграммы $P_{zx}(\alpha)$

В начале рассмотрим частотные характеристики электрического типпера. Они получены по данным трехмесячной непрерывной регистрации электрического поля с дискретностью 10 с. На рис.4а,б,в представлены частотные кривые вещественных и мнимых стрелок (**ReP** и **ImP**) электрического вектора (**V**) и максимальной компоненты типпера ($\max P_{zx}$).

Обратимся к вещественным и мнимым стрелкам (рис.4а). Модуль вещественной стрелки возрастает с увеличением периода вариаций, что свидетельствует об увеличении вклада активных токов в вертикальную электрическую компоненту. Мнимая стрелка в области низких частот в несколько раз меньше вещественной. Это характеризует слабый вклад реактивных токов в вертикальную компоненту. Лишь на периодах 100 и 800 с выражены максимумы \mathbf{ImP} , отражающие незначительный вклад реактивных токов. Вещественные и мнимые стрелки коллинеарны в диапазоне периодов от 20 до 1000 с, что характеризует двумерно-неоднородный геоэлектрический разрез. Они ориентированы поперек глубинного разлома в районе п.Тырган.(рис.1) При увеличении периодов (1000 – 10000 с) стрелки становятся ортогональными, что отражает трехмерность геоэлектрической среды. Следует отметить, что на периоде 1000 с слабо выраженному максимуму кривой $|\mathbf{ReP}|$ отвечает минимум кривой $|\mathbf{ImP}|$. На этом же периоде происходит изменение азимутов мнимой стрелки. Можно предполагать, что в длиннопериодном диапазоне на поведение стрелок скорее всего оказывают влияние северные и южные фланги рифтовой зоны, за счет которых неоднородность отличается от двумерной. Это отражается в поведении стрелок, которые становятся почти ортогональными, что характерно для проводящих зон сложной формы.

Обратимся к частотной характеристике электрического вектора (рис.4б). Норма вектора имеет максимум на периодах 500 - 1000 с. На этих периодах фаза вектора приближается к нулю, что отражает преобладающий вклад активных токов, насыщающих проводящую зону.

Частотная кривая $\max|P_{zx}|$ (рис.4в) подобна кривой $|\mathbf{ReP}|$. Это обусловлено тем, что основной вклад в вертикальное электрическое поле дают активные электрические токи. Азимут $\max|P_{zx}|$ в диапазоне периодов от 20 до 1000 с почти не меняется и равен около 130° , т.е. вкост простирания разлома. На периодах более 1000 с азимут уменьшается до 80° , что обусловлено трехмерной неоднородностью среды.

Представление о влиянии геоэлектрических неоднородностей на различных периодах дают также электрические полярные диаграммы (рис.5). На них хорошо видна сходимость лепестков в начале координат на периодах от 50 до 1000 с. Это свидетельствует о двумерности геоэлектрической среды. Оси лепестков направлены вкост простирания разлома. Расходимость этих лепестков на периоде 7200 с указывает на влияние трехмерных неоднородностей. При увеличении периода от 50 до 7200 азимут уменьшается на 30° .

Рассмотрим частотные характеристики электрического типпера и их изменение во времени. Компоненты типпера определены из соотношения: $E_z = P_{zx}E_x + P_{zy}E_y$.

Точность определения компонент типпера зависит от длины временного интервала и когерентности между вертикальной и горизонтальными составляющими электрического поля. Поэтому предварительно выбраны оптимальные условия, при которых компоненты типпера определяются устойчиво в диапазоне периодов от первых минут до первых часов. Анализ показал, что при регистрации с дискретностью 10 с временной интервал должен быть не менее 3 суток, а когерентность не менее 0.8. Для обработки создана специальная программа, позволяющая из поступающего массива цифровых данных формировать временные интервалы необходимой длины и определять компоненты типпера в широком диапазоне периодов. В результате обработки данных получены временные ряды параметров типпера на периодах от 70 с до 12000с. Сравнительный анализ временных рядов в указанном диапазоне периодов показывает, что аномальные изменения типпера в связи с землетрясениями выражены более контрастно на периодах 100-1000 с. На более длинных периодах аномальные возмущения затухают. На периоде 12000 с они практически уже не выражены. Сопоставление временных рядов модуля вещественной стрелки, нормы и модуля максимальной компоненты типпера свидетельствует, что они даже в деталях подобны между собой. Это обусловлено тем, что среда является близкой к двумерно-неоднородной и основной вклад в вертикальную компоненту вносят активные

электрические токи, за счет которых вещественная часть типпера почти на порядок больше мнимой.

На рис.6 мы в качестве примера привели 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 параметров сопоставлены с моментами сильных землетрясений с $K \geq 12.4$, происшедших за рассматриваемый период на эпицентральных расстояниях до 300 км. В графиках $|\mathbf{ReP}|$ видны аномальные изменения, которые могут быть связаны с землетрясениями. Эти аномалии проявляются следующим образом. Перед землетрясениями с $K \geq 12.4$ во временных рядах указанных параметрах выделяется 1,5 – месячный интервал с увеличенной дисперсией. В его начале изменяется фаза электрического вектора. За 9 суток перед обоими землетрясениями с $K=12$ и $K=12.4$ параметры $|\mathbf{ReP}|, \|\hat{P}\|, \max|P_{zx}|$ возрастают в несколько раз. Такой эффект обнаружен впервые. Также следует обратить внимание на изменение параметра $|\mathbf{ReP}|$ в конце марта. Его можно увязать с землетрясениями $K=11$, но эта работа требует специальных исследований и выходит за рамки настоящей статьи.

Какова природа выявленных аномальных изменений? По-видимому, на поведение типпера могут влиять локальные геоэлектрические неоднородности верхних частей земной коры, вызывающие гальванические аномалии электрического поля. Одной из таких неоднородностей может оказаться разлом северо-восточного простирания в районе п.Тырган. При геодинамических процессах, связанных с подготовкой землетрясения, возможно изменение степени обводненности и минерализации вод в зоне разлома, что может соответственно изменить вклад активных токов в вертикальную компоненту электрического поля.

Анализ данных магнитотеллурического мониторинга

Пульсации и бухтообразные вариации магнитотеллурического поля в средних и низких широтах допускают их аппроксимацию плоской волной. В рамках этой модели

существует связь между горизонтальными векторами электрического и магнитного полей на земной поверхности [Бердичевский,1991].

$$\mathbf{E}_{\text{гор.}} = \hat{Z} \mathbf{H}_{\text{гор.}}, \quad \text{где } \hat{Z} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

или в развернутом виде:

$$E_x = Z_{xx} H_x + Z_{xy} H_y$$

$$E_y = Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y$$

где \hat{Z} - тензор импеданса; Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy} - комплексные компоненты тензора импеданса, зависящие от частоты, распределения удельных электрических сопротивлений в Земле и ориентации координатных осей.

Тензор импеданса характеризует геоэлектрическую неоднородность среды. Информацию о ней можно получить с помощью импедансных полярных диаграмм, а также параметров неоднородности и параметров асимметрии, характеризующих степень отклонения среды от двумерно-неоднородной или осесимметричной.

Импедансная полярная диаграмма представляет собой годограф, описываемый концом вектора $|Z_{xx}| \mathbf{1}_x$ при повороте $\mathbf{1}_x$ на 2π . В случае горизонтально-однородной среды диаграмма $|Z_{xy}|$ имеет вид окружности, а диаграмма $|Z_{yx}|$ стянута в точку. Двумерно-неоднородные среды представлены овальными диаграммами $|Z_{xy}|$ и четырехлепестковыми диаграммами $|Z_{xx}|$.

По полярным диаграммам импеданса $|Z_{xy}|$ определяют его максимальные и минимальные значения, отношения которых характеризуют степень геоэлектрической неоднородности среды.

Важной характеристикой тензора импеданса являются его главные направления и главные значения. Последние определяются по формуле [Eggers,1982]:

$$Z_p^{\pm} = Z_1 / 2 \pm \sqrt{Z_1^2 / 4 - Z_{\text{эф.}}^2},$$

$$\text{где } Z_1 = Z_{xy} - Z_{yx}, \quad Z_{\text{эф.}} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}.$$

Главные направления тензора $\hat{\mathbf{Z}}$ находятся по формуле:

$$\Theta^{\pm} = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\operatorname{Re}\gamma^{\pm}}{1 - |\gamma^{\pm}|^2},$$

где $\gamma^{\pm} = (Z_{xy} - Z_p^{\pm}) / Z_{xx}$.

Обратимся к данным мониторинга. Для получения импеданса необходимы на каждом пункте синхронные записи составляющих электрического и магнитного полей. Однако на Байкальском полигоне, как мы уже отмечали, регистрация составляющих геомагнитного поля осуществляется только в обсерваториях «Энхалук» и «Патроны». Расстояние от пунктов Узур и Тырган, где ведутся наблюдения электротеллурического поля, до обсерватории «Энхалук» составляет 100 и 70 км, а от обсерватории «Патроны» - 260 и 150 км, соответственно. Возникает вопрос, имеем ли мы право использовать геомагнитные данные упомянутых обсерваторий для магнитотеллурического мониторинга? Для решения этого вопроса выполнена совместная синхронная обработка электротеллурических вариаций в пп. Узур и Тырган с геомагнитными вариациями обеих обсерваторий. В основу обработки положена непрерывная трехмесячная запись электротеллурического и геомагнитного полей с дискретностью 1 мин.

Для определения тензора импеданса использована программа, алгоритм которой основан на робастной методике, разработанной Дж.Ларсеном [Larsen,1996]. Эта методика позволяет подавлять влияние электромагнитных полей не магнитотеллурического происхождения (солнечно-суточные и приливные гармоники, промышленные шумы и др.).

В результате обработки в пп. Узур и Тырган получены тензоры импедансов в диапазоне периодов от первых минут до первых часов для линий 0 – 1 и 0 – 3, 0 – 2 и 0 – 4, 0 – 6 и 0 – 7, 0 – 6 и 0 – 8. Магнитотеллурические параметры сопоставлены между собой.

На рис.7 в качестве примера приведены диаграммы основного и дополнительного импедансов на периодах 1000, 3300 и 7200 с. Диаграммы, полученные с использованием

данных обсерваторий «Энхалук» и «Патроны», различаются между собой в пределах первых процентов лишь на периоде 1000 с. Это различие уменьшается с увеличением периода вариаций.

Рассмотрим поперечные импедансы и фазы по направлению вкрест простирания структур в пп. Тырган и Узур. Результаты сопоставления приведены на рис.8. Амплитудные кривые совпадают между собой в пределах первых процентов. В п.Тырган фазовые кривые также близки. В п.Узур фазовые значения в диапазоне периодов от 200 до 50000 с различаются между собой не более чем на 5 градусов.

Таким образом, мы приходим к выводу, что использование горизонтальных компонент магнитного поля, наблюдаемого на обсерваториях «Патроны» и «Энхалук», дает практически одинаковый результат в МТ-зондированиях. Очевидно, что для МТ-мониторинга можно использовать данные обсерваторий «Патроны» или «Энхалук».

Мы уже отмечали, что магнитотеллурическое поле содержит информацию о геоэлектрической неоднородности среды. Известно, что электрические составляющие МТ-поля подвержены сильным приповерхностным искажениям. Горизонтальные составляющие геомагнитного поля слабо реагируют на геоэлектрические неоднородности среды. На рис.9 представлены поперечные кривые МТЗ в пп. Тырган и Узур, полученные на различных приемных линиях. Характерно, что амплитудные кривые расходятся между собой по уровню сопротивлений. При этом фазовые кривые практически совпадают. Эта особенность свидетельствует о том, что влияние локальных геоэлектрических неоднородностей связано с гальваническими эффектами. Действие этих эффектов проявляется в большей мере в п. Тырган, что обусловлено особенностью геоэлектрического разреза.

О влиянии геоэлектрических неоднородностей свидетельствует также рис.10, где амплитудные кривые сопоставлены с нормальной кривой кажущегося сопротивления. Амплитудные кривые в области низких частот располагаются по уровню сопротивлений

выше или ниже нормальной кривой. Таким образом, мы имеем дело с сильным влиянием геоэлектрических неоднородностей в пп. наблюдений Тырган и Узур. Можно полагать, что МТ-мониторинг в диапазоне периодов от первых минут до первых часов даст возможность контролировать как электропроводность литосферы, так и влияние геоэлектрических неоднородностей среды.

Обратимся к данным мониторинга. Изменение электропроводности геологической среды во времени изучено с помощью поперечного импеданса. Он по сравнению с продольным импедансом определяется более устойчиво. Диапазон периодов, в котором можно получить импедансы, зависит от длины временного интервала (массива данных) используемого для обработки. От величины этого интервала зависит также точность оценки импедансов. Они изучены для временных интервалов 1,2,3,4,5 и 10 суток. Анализ показал, что минимальный временной интервал, в котором импедансы вычисляются с погрешностью в первые проценты, равен 5 суткам. На данном временном интервале импеданс определяется в диапазоне периодов от первых минут до первых часов. Минимальной дисперсией характеризуется поперечный импеданс на периоде 3300 с.

Рассмотрим результаты мониторинга электропроводности геологической среды на указанном периоде. На рис.11 приведены временные ряды поперечного импеданса и фазы для линий 01-03 в пп. Тырган и Узур, полученные с использованием данных обсерватории «Энхалук». Во временных рядах имеются пропуски, связанные с техническими причинами. Следует обратить внимание, что на обоих пунктах практически одновременно проявились аномальные изменения импеданса в виде ступени. Эти изменения имеют величину около 35% в п.Тырган и 20% в п. Узур. При этом фаза импеданса практически не изменилась. Можно лишь отметить ее незначительное отклонение в п. Узур, которое не превышает 5° . Аномальные изменения импеданса могут быть связаны с сильным землетрясением с $K=12$, произошедшим за рассматриваемый

период. Аномалии проявились примерно за месяц до землетрясения и прекратились через 10 суток после землетрясения.

Возникает вопрос о природе аномальных изменений импеданса. Период 3300 с, на котором проводился мониторинг поперечного импеданса, приурочен на поперечных кривых к максимуму, предваряющему нисходящую ветвь, связанную, по-видимому, с астеносферным проводящим слоем под Байкальским рифтом. Приближенные оценки показывают, что глубина проникновения электромагнитной волны на указанном периоде не менее 100 км. Вряд ли можно предположить, что уменьшение на периоде 3300 с связано с увеличенной электропроводностью на магнитных глубинах. Фаза импеданса во времени, практически, не меняется. Это, как мы уже указывали, свидетельствует об изменении импеданса за счет гальванического эффекта, связанного с влиянием геоэлектрической неоднородности среды. Данное влияние в большей мере проявилось в п. Тырган. Здесь продольные и поперечные кривые в большей мере различаются между собой. Они расходятся по уровню сопротивлений почти на 3 порядка. Максимуму одной кривой отвечает минимум другой. Такое различие кривых МТЗ по уровню сопротивлений и форме является аномальным для профиля, пересекающего Байкальскую рифтовую зону. Оно скорее всего связано с разломом в районе п. Тырган, т.е. вблизи пункта. Влиянием разлома также можно объяснить различие продольной и поперечной кривых МТЗ в п. Узур.

Таким образом, на основании качественного анализа кривых МТЗ можно предположить, что аномалии поперечного импеданса, по данным мониторинга, связаны с изменением электропроводности приповерхностных частей земной коры в зонах разломов. Эти изменения возможны при геодинамических процессах, связанных с землетрясениями в Байкальской рифтовой зоне. Такие процессы, как известно, часто приводят к изменению плотности и обводненности пород и минерализации подземных вод. Наиболее заметно они могут быть выражены в зоне существующих разломов.

Выделение и анализ вариаций электрического поля от внутриземных источников

Как мы отмечали ранее, внутриземные источники электрического поля связаны с электрохимическими, электрокинетическими, пьезоэлектрическими и другими процессами, протекающими в литосфере сейсмоактивных областей. Для выделения вариаций электрического поля внутриземных источников обратимся к низкочастотному диапазону.

Представление о низкочастотных вариациях электротеллурического поля дают временные ряды среднечасовых значений разности потенциалов. Эти ряды могут содержать вариации поля, генерируемые внешними и внутренними источниками. К вариациям поля внешнего источника относятся мировые магнитные бури, солнечно-суточные вариации, бухтообразные возмущения, пульсации. Кроме этого, естественное электромагнитное поле Земли содержит 27 дневные вариации и их гармоники с периодами 13,5 и 9 дней, а также годовые и полугодовые вариации [Мороз, 2005; Serson, 1973]. Рассмотрим временные ряды напряженности электрического поля в интервале периодов от 50 часов до 1000 часов, где поле внешних источников имеет сравнительно низкую интенсивность.

Обратимся к данным мониторинга в п. Тырган, где мы располагаем наиболее длинными рядами, суммированных среднечасовых значений для линий 01+02 и 03+04. Из этих временных рядов удалены высокочастотные вариации путем фильтрации с окном 50 часов. Наряду с этим отфильтрованы также низкочастотные годовые вариации с окном 1000 часов. Полученные таким путем временные ряды напряженности электрического поля изображены на рис.12. Интенсивность вариаций меняется от первых десятков до первых сотен мВ/км. Можно думать, что выявленные вариации электрического поля, связаны с источниками внутри Земли.

Полученные временные ряды напряженности электрического поля в п. Тырган мы сопоставили с моментами землетрясений с $K \geq 12$ на эпицентральных расстояниях до 400 км. Таких землетрясений за рассматриваемый период было всего три ($K=13.1$ - 19.01.04 г.; $K=12.4$ – 26.05.04 г.; $K=12$ – 23.03.05 г.). На рисунке видно, что моменты землетрясений приурочены к аномальным возмущениям электрического поля интенсивностью в первые сотни мВ/км. Более высокой интенсивностью отличается возмущение, в связи с землетрясением с $K=12.4$. Аномалии возникают примерно за 1-1,5 месяца до землетрясения и через такое же время затухают после землетрясения.

Предполагается, что эти возмущения могут быть обусловлены электрохимическими, электрокинетическими и другими процессами, возникающими при изменении тектонических напряжений земной коры в связи с землетрясениями.

Выводы

1. Мониторинг вертикальной и горизонтальной составляющих электрического поля земли в частотно-временной области даёт возможность получить информацию о состоянии геологической среды в связи с геодинамическими процессами в Байкальской рифтовой зоне. Для извлечения этой информации предлагается (по аналогии с геомагнитным полем) ввести электрический типпер, связывающий вертикальную и горизонтальные составляющие электротеллурического поля. Типпер отражает распределение электрических токов в районе геоэлектрической неоднородности. Представление типпера в виде вещественных и мнимых электрических стрелок и электрического вектора позволяет оценить характер геоэлектрической неоднородности и вклад активных и реактивных токов в вертикальную составляющую электротеллурического поля. Особенно информативным является электрический типпер при изучении трёхмерных геоэлектрических неоднородностей.

2. Мониторинг электрического типпера с 2003 по 2005г.г. выполнен в п. Тырган. По данным частотно-временного анализа выявлены аномальные изменения в параметрах электрического типпера на периодах от 100 до 1000с, которые могут быть связаны с землетрясениями с $K = 12$ и $K = 12,4$. Аномалии проявляются в увеличении вещественного типпера в несколько раз примерно за 9 суток до землетрясения. Они вызваны перераспределением активных электрических токов в районе разлома, где возможны изменения уровня и минерализации вод перед землетрясением.

3. В п.п. Узур и Тырган выполнен мониторинг магнитотеллурического импеданса. Анализ показал, что в южной части Байкальского рифта для определения мониторинга импеданса можно воспользоваться наблюдениями геомагнитного поля на удалённых обсерваториях «Энхалук» и «Патроны». Для получения устойчивых значений импеданса в диапазоне периодов от первых десятков секунд до первых часов необходимы регистрации длительностью не менее 5 суток. Импеданс содержит информацию о локальных и региональных геоэлектрических неоднородностях. Региональные неоднородности связаны с глубинными разломами Байкальского рифта. Их состояние контролируется с помощью импедансного мониторинга.

4. В п.п. Тырган и Узур по результатам мониторинга магнитотеллурического импеданса на периоде 1000 с выявлены аномалии в виде ступеней, величина которых исчисляется десятками процентов. При этом фаза импеданса практически не меняется. Эти аномалии приурочены к землетрясению с $K = 12$. Они возникли примерно за месяц до землетрясения и прекратились через 10 суток после землетрясения. Аномалии импеданса вызваны изменением плотности и обводнённости пород, изменением минерализации подземных вод, а также другими причинами, возможными при геодинамических процессах.

5. Для выделения вариаций электрического поля, связанных с внутриземными источниками, проведена фильтрация временных рядов среднечасовых значений

напряжённости электрического поля с окнами, равными 50 и 1000 часам. Получены низкочастотные вариации интенсивностью в первые сотни мВ/км. В п. Тырган эти вариации приурочены к землетрясениям с $K \geq 12$. Выявленные вариации электрического поля могут быть связаны с электрохимическими, электрокинетическими, пьезоэлектрическими и другими процессами, возникающими при землетрясениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевский М.М. Электрическая разведка методом теллурических токов. М. Гостоптехиздат. 1960. 231 с.
- Бердичевский М.М., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электрического поля Земли. М.; Недра. 1981. 327 с.
- Бердичевский М.М. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра. 1968. 255 с.
- Бердичевский М.М., Нгуен Тхань Ван. Магнитовариационный вектор. Физика Земли. 1991. С. 52-62.
- Мороз Ю.Ф., Назарец В.П., Мороз Т.А. Сравнительная характеристика вариаций геомагнитного поля на Камчатке и оз. Байкал // Физика Земли. 2005. № 9. С. 36-45.
- Солоненко В.П. Хилько С.Д. Павлов О.В. Сейсмотектоника// Сейсмотектоника сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья.//М.:Наука.1968.С.123-143
- Eggers D.E.* An eigens table formulation of the magnetotelluric impedance tensor //Geophys. 1982. V. 47. P. 1204-1214.
- Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiodelisi A. and Rieven S.* Robust smooth magnetotelluric transfer functions// Geophysical Journal International. 1996.V.124.P.801-819.
- Larsen I.C.* Noise reduction in electromagnetic time series to improve detection of seismicinduced signals //Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. V.49. P. 1257-1265.

Parkinson W.D. Direction of rapid geomagnetic fluctuation // *Geophys.J.* 1959. V.2. P. 1-14.

Serson P.H. Instrumentation for induction studies on land. – *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1973. 7. p.313-322.

Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the South-Western United States. Berkeley 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.

Wiese H. *Geomagnetische Tiefentellurik.* Berlin: Deutsche Akad . Wiss. 1965. 146 p.