

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЗЕМЛЕ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

RESEARCH OF VERTICAL ELECTRIC FIELD OF THE EARTH FOR EARTHQUAKES' PREDICTION

Ю.Ф. Мороз, Т.А. Мороз

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

The vertical component of the Earth's electric field contains prominent information about the medium's geoelectric heterogeneity. This component equals zero in the horizontal-homogeneous media. In heterogeneous media it differs from zero. It gives an opportunity to use it to control the behavior of geoelectric heterogeneity of the medium that characterizes geodynamic processes. Electric tipper is going to be used for that. It represents a transmission function between vertical and horizontal components of electric field in the frequent-time area.

Electric tipper has been already studied at the Lake Baikal where seismic activity is really high. An observational net has been made around the lake. Holes up to 100m deep are used to measure the vertical component. The horizontal components of the field are registered in the directions of the geoelectric heterogeneity medium's axes. The discontinuity of measures is 10sec. Based on the electrotelluric field monitoring time rows of the electric tipper were made. In their behavior anomalous changes which precede earthquakes with $K \geq 12$ are expressed on the epicentric distances up to 300km. Anomalous effects appear 9-30 days before the earthquakes. It's likely that the effects appear due to the changes or emerge of electric heterogeneity of the media because of tectonic violations, their watering, water mineralization and some other reasons which precede serious earthquakes.

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

Важным является не только регистрация вариаций горизонтальных составляющих электрического поля на земной поверхности, но 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. К настоящему времени накоплен большой объем такой информации на оз. Байкал в п.п. 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).

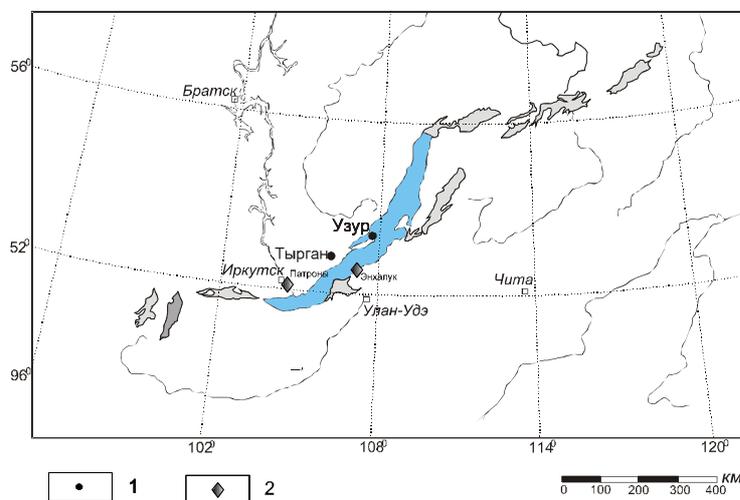


Рис.1. Схема расположения пунктов наблюдений электрического поля Земли; 1-пункты наблюдений электрического поля; 2-обсерватории геомагнитного поля;

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 вкрест простирания береговых линий острова Ольхон и озера Байкал. По этим направлениям ориентированы измерительные линии (рис.2).

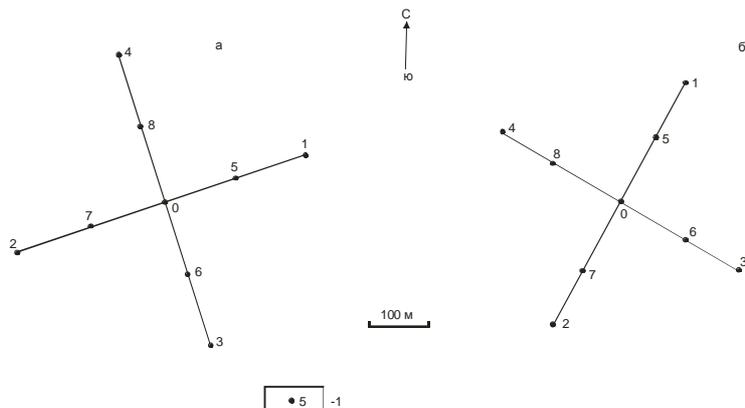


Рис.2.Схема расположения измерительных линий в пп. Узур (а) и Тырган (б). Цифрами обозначены номера электродов. Вертикальный канал в центре установки. Масштаб приведен для измерительных линий

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.

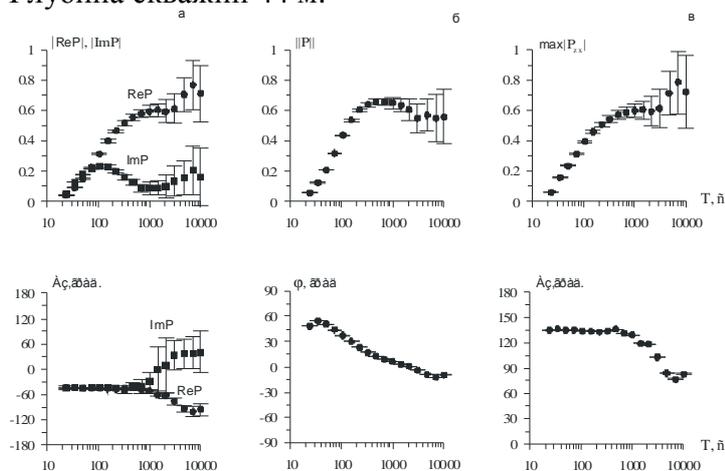


Рис.3. Частотные кривые параметров электрического типпера. а-модули вещественных и мнимых электрических стрелок и их азимуты; б-норма и фаза электрического вектора; в-модуль максимальной компоненты электрического типпера и ее азимут.

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). Интенсивность электротеллурических 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 [1,2]. 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 [2,6,7,9] связь между вертикальной и горизонтальными составляющими электротеллурического поля в частотной области можно представить в следующем виде:

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

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

$E_z = P_{zx} E_x + P_{zy} E_y$, 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 [8]. Как и магнитный типпер, электрический типпер представляет собой матрицу опрокидывания, преобразуя горизонтальную составляющую в вертикальную.

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

$$C = \sqrt{C_{zx}^2 + C_{zy}^2}, \quad \hat{P} = \sqrt{|C_{zx}|^2 + |C_{zy}|^2}, \quad \text{где } \left\| \hat{C} \right\| - \text{норма матрицы.}$$

Как и магнитный типпер [2,6,7,9], электрический типпер можно изобразить графически в виде полярной диаграммы, вещественных и мнимых стрелок, электрического вектора.

Уравнение электрической полярной диаграммы имеет вид:

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

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

По аналогии с магнитовариационным вектором [3], электрический типпер можно изобразить в виде электрического вектора \mathbf{V} , направленного по большой оси эллипса поляризации квазипоперечного горизонтального электрического поля и имеющего величину равную $\left\| \hat{C} \right\|$. Фаза вектора определяется как аргумент инварианта P .

$$\varphi = \arg C = \arg \sqrt{C_{zx}^2 + C_{zy}^2}.$$

Электрическая фаза не зависит от направления координатных осей. Она отражает вклад активных и реактивных токов. При j близком к 0 или p , в E_z преобладает вклад

активных токов, а при приближении j к $p/2$ - 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 [5]. С ее помощью определены компоненты типпера C_{zx} , C_{zy} , вещественные (**ReC**) и мнимые стрелки (**ImC**), 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.3а,б,в представлены частотные кривые вещественных и мнимых стрелок (**ReC** и **ImC**) электрического вектора (**V**) и максимальной компоненты типпера ($maxP_{zx}$).

Обратимся к вещественным и мнимым стрелкам (рис.3а). 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 **ImC**, 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 **|ReC|** отвечает минимум кривой **|ImC|**. 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.3б). 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 $max|C_{zx}|$ (рис.4в) подобна кривой **|ReC|**. Это обусловлено тем, что основной вклад в вертикальное электрическое поле дают активные электрические токи. Азимут $max|C_{zx}|$ в диапазоне периодов от 20 до 1000 с почти не меняется и равен около 130^0 , т.е. вкост простирания разлома. На периодах более 1000 с азимут уменьшается до 80^0 , что обусловлено трехмерной неоднородностью среды.

Представление о влиянии геоэлектрических неоднородностей на различных периодах дают также электрические полярные диаграммы. 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 30^0 .

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.4 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 $|\text{Re}C|$ 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 $|\text{Re}C|$, $\|\vec{C}\|$, $\max|C_{zj}|$ возрастают в несколько раз. Такой эффект обнаружен впервые. Также следует обратить внимание на изменение параметра $|\text{Re}C|$ в конце марта. Его можно увязать с землетрясениями $K=11$, но эта работа требует специальных исследований и выходит за рамки настоящей статьи.

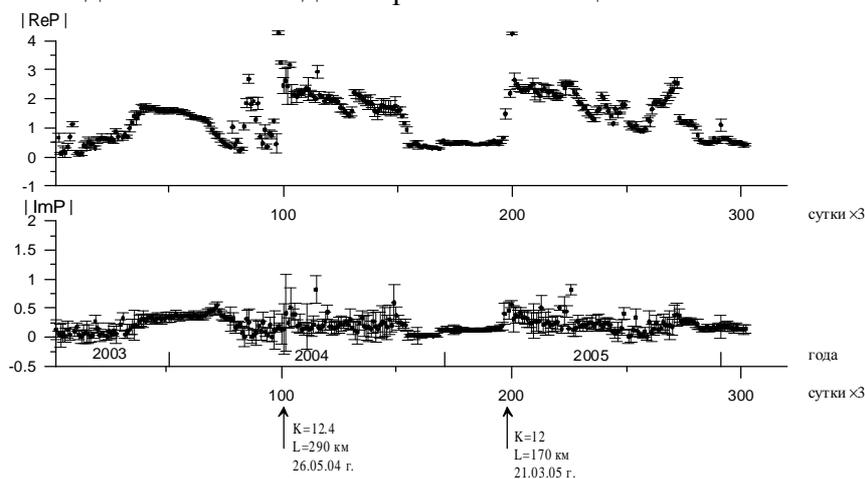


Рис.4. Графики модулей вещественных и мнимых электрических стрелок на периоде 330 с в п. Тырган. Период наблюдений: 01.08.2003-06.02.06 гг. На временной оси показаны моменты землетрясений с $K \geq 12$ на эпицентральных расстояниях (L) до 360 км.

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.

Выводы

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.

Мониторинг электрического типпера с 2003 по 2005 гг. 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.

Список литературы

1. Бердичевский М.М. Электрическая разведка методом теллурических токов. –М. Гостоптехиздат. 1960. – 231 с.
2. Бердичевский М.М., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электрического поля Земли. – М.; Недра. 1981. –327 с.
3. Бердичевский М.М., Нгуен Тхань Ван. Магнитовариационный вектор // Физика Земли. 1991. С. 52-62.
4. Солоненко В.П. Хилько С.Д. Павлов О.В. Сейсмоструктура // Сейсмоструктура и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья.//М.:Наука.1968.С.123-143
5. Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiedelisi A. and Rieven S. Robust smooth magnetotelluric transfer functions// Geophysical Journal International. 1996.V.124.P.801-819.
6. Parkinson W.D. Direction of rapid geomagnetic fluctuation // Geophys. J. 1959. V.2. P. 1-14.
7. Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the South-Western United States. Berkley Los – Angeles – London: Univ. California Press. 1970. 165 p.
8. Vozoff K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // Geophysics. 1972. V. 37. P. 98-141.
9. Wiese H. Geomagnetische Tiefentelluric. Berlin: Deutsche Akad. Wiss. 1965. 146 p.