

УДК 550.832

ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И МАГНИТНОГО ТИППЕРА В БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЕ

© 2013 г. Ю.Ф. Мороз^{1,2}, Г.И. Татьков², Т.А. Мороз¹,
Ц.А. Тубанов², П.А. Предеин²

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

² Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Приводятся результаты анализа вековых вариаций геомагнитного поля в Байкальской рифтовой зоне за 1968–2011 гг. Рассматриваются частотные кривые магнитного типпера за этот период и его временные ряды за последние десять лет. В 2003–2011 гг. выявлены изменения среднегодовых значений геомагнитного поля, предположительно связываемые с усилением в южной части Байкальской впадины геодинамических процессов, завершившимся сильнейшим Култукским землетрясением 27.08.2008 г. ($M=6.3$).

Изучены частотные характеристики магнитных типперов, характеризующих электропроводность геологической среды. Показано, что они содержат информацию о проводящих зонах рифта. В поведении магнитных типперов на периодах 150–300 с выявлен аномальный эффект, связываемый с Култукским землетрясением. На периодах 1000–3000 с обнаружена годовая периодичность типпера.

Обсуждается возможная природа прослеженных особенностей поведения геомагнитного поля и магнитного типпера.

Ключевые слова: геомагнитное поле, вариации поля, магнитный типпер, электропроводность, землетрясение.

Введение

Вариации геомагнитного поля, связанные с внешними ионосферными, магнитосферными и внутриземными источниками, содержат информацию о геодинамических процессах, прослеживаемых в сейсмоактивных зонах. В южной части Байкальского рифта в последнее десятилетие отмечается активизация геодинамических процессов, следствием которой стало Култукское землетрясение, произошедшее 27.08.2008 г. с магнитудой 6.3. В этой связи большой интерес представляют данные мониторинга вариаций геомагнитного поля, характеризующих изменение магнитных и электрических свойств геологической среды во времени.

По данным ежегодных площадных геомагнитных наблюдений, проводимых в районе оз. Байкал Институтом нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, П.Г. Дядьковым [Дядьков и др., 1999] были выявлены тектономагнитные эффекты, связанные с геодинамическими процессами. Исследования короткопериодных вариаций геомагнитного поля, начатые нами с целью изучения динамики электропроводности литосферы, позволили проследить аномальные изменения в поведении вектора индукции, связываемые с Южно-Байкальским (Култукским) землетрясением [Мороз, Мороз, 2006].

В настоящей статье продолжено исследование вариаций геомагнитного поля внутриземного и внешнего источников, направленное на изучение геодинамических процессов и выявление аномальных эффектов в вековых вариациях и изменении электропроводности геологической среды. Предпринята попытка связать эти аномальные эффекты с Култукским землетрясением 2008 г., сильнейшим из произошедших за последние 50 лет в Байкальской впадине.

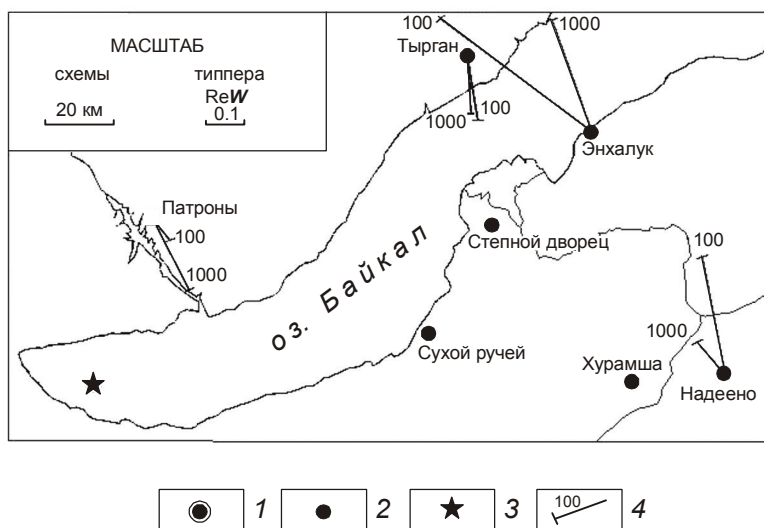


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений и векторов ReW

1 – обсерватория Патроны; 2 – пункты наблюдения с указанием их названий; 3 – эпицентр Култукского землетрясения 27.08.2008 г. ($M = 6.3$); 4 – вещественный типпер ReW; цифры возле вектора – период вариаций, с

Были использованы данные многолетнего мониторинга, проводимого в рифтовой зоне в обсерватории Патроны и шести пунктах наблюдения – Надеено, Степной дворец, Хурамша, Сухой ручей, Тырган, Энхалук (рис. 1). При анализе для сравнения привлекались данные мониторинга в обсерватории Паратунка, расположенной вблизи Петропавловска-Камчатского.

Методика наблюдений и обработки вариаций геомагнитного поля

Наблюдения вариаций геомагнитного поля в обсерватории Патроны осуществляет Институт солнечно-земной физики СО РАН. Для анализа нами были использованы полученные в последнее десятилетие временные ряды H -, D -, Z -составляющих геомагнитного поля с дискретностью 1 мин при точности наблюдений 0.1 нТл. Одновременно проведен анализ среднегодовых значений геомагнитного поля за последние 43 года.

Наблюдения вариаций геомагнитного поля в пунктах Надеено, Степной дворец, Хурамша, Сухой ручей выполняет Геологический институт СО РАН. Для мониторинга используются магнитовариационные станции МВ-01 и МВ-02. С 2001 г. регистрация осуществляется с дискретностью 2 мин; точность наблюдений – 0.1 нТл. В пункте Надеено регистрируются H -, D -, Z -компоненты и полный вектор геомагнитного поля F ; в остальных – только полный вектор F .

В 2001–2004 гг. в рамках международного проекта “Камчатка и Байкал: электромагнитный мониторинг и поиск предвестников сильных землетрясений” силами ФГУНПП “Иркутскгеофизика” в пунктах Тырган и Энхалук с применением японских станций $ATD-8E$ регистрировались вариации H -, D -, Z -компонент геомагнитного поля.

Первичная обработка данных геомагнитного мониторинга сводилась к редактированию временных рядов с помощью специальных сервисных программ, позволяющих осуществлять процедуры интерполяции, нормирования, осреднения, центрирования и т.д. Отредактированные временные ряды геомагнитного поля качественно различны и зависят от качества первичного материала; их основной недостаток – пропуски, допущенные при измерениях. Наиболее существенные пропуски отмечены в пунктах Надеено, Степной дворец, Хурамша и Сухой ручей. Из-за этих иногда весьма продолжительных пропусков не удалось в полной мере изучить поведение передаточных магнитова-

риационных функций в пункте Надеено. Сбои, имевшие место в 2003 г. в обсерватории Патроны, связаны со сменой магнитовариационных станций в ней. В связи со сказанным в пунктах со значительными пропусками рассматривались сокращенные временные ряды.

Для анализа вариаций геомагнитного поля в разных частотных диапазонах исходные ряды пересчитывались в среднечасовые, среднесуточные и среднегодовые. Обработка вариаций геомагнитного поля при изучении динамики магнитного типпера выполнялась с помощью специальных программ, которые рассматриваются ниже в соответствующих разделах.

Изменения геомагнитного поля

Инструментальные наблюдения вариаций геомагнитного поля в обсерватории Патроны проводятся с 1968 г., благодаря чему мы имеем возможность по данным мониторинга получить представление о вековых вариациях H -, D - и Z -компонент геомагнитного поля. Графики названных компонент поля за 43 года (до 2011 г.) представлены на рис. 2. Можно видеть, что за это время напряженность H -компоненты уменьшилась на 800 нТл, склонение (D -компонента) – на 60 мин; напряженность Z -компоненты уменьшилась на 600 нТл с 1968 по 1985 г.

По существующим представлениям [Яновский, 1978; Паркинсон, 1986], вековые вариации представляют собой небольшую часть постоянных флуктуаций величины и направления главного магнитного поля Земли с периодами от десятков до тысяч лет. Природа вариаций связывается с гидромагнитными волнами в ядре; не исключается также влияние движения вещества внутри ядра.

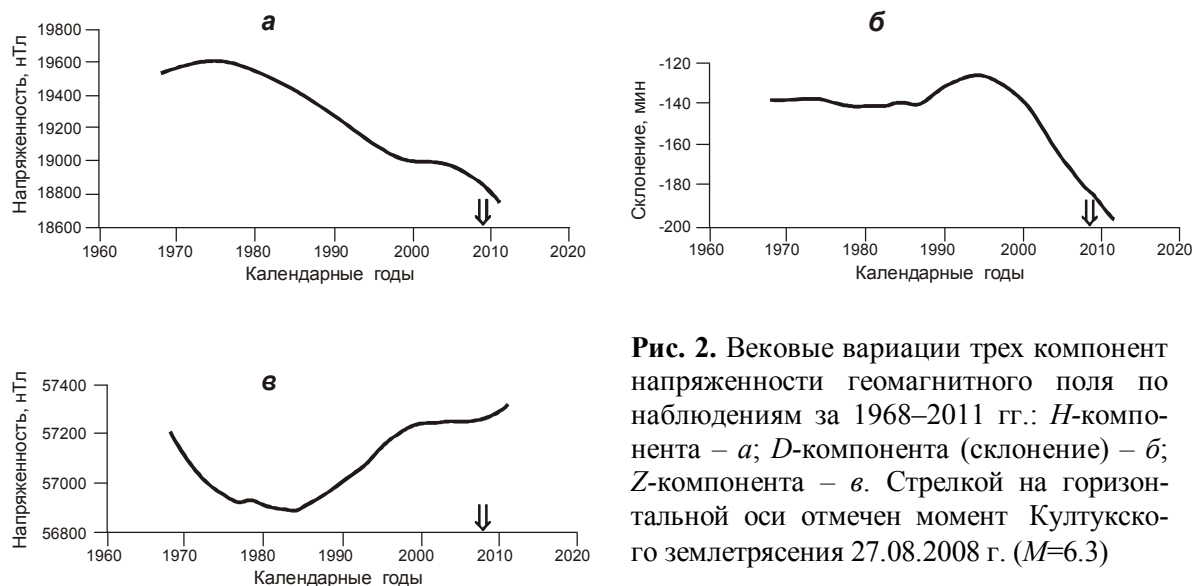


Рис. 2. Вековые вариации трех компонент напряженности геомагнитного поля по наблюдениям за 1968–2011 гг.: H -компонента – *а*; D -компонента (склонение) – *б*; Z -компонента – *в*. Стрелкой на горизонтальной оси отмечен момент Култукского землетрясения 27.08.2008 г. ($M=6.3$)

Важно отметить, что величина векового хода зависит от геологического строения исследуемого региона. Впервые это было обнаружено при повторных магнитных измерениях в районе Памира [Орлов, 1958]. Позже на оз. Байкал это обстоятельство было использовано для выявления тектономагнитных эффектов при повторных ежегодных наблюдениях геомагнитного поля [Дядьков и др., 1999].

На представленных графиках H -, D -, Z -компонент отображены вариации, имеющие период в первые десятки лет, которые могут содержать информацию о геоэлектрической среде. Обратимся к Z -компоненте, в большей мере характеризующей наличие геоэлектрических неоднородностей в Земле. Можно видеть (см. рис. 2, *в*), что с 1968 г.

по 1983 г. напряженность поля понижается от 57200 нТл до 57000 нТл; минимум графика приурочен к 1980–1985 гг. В течение последующих 15 лет наблюдается нарастание напряженности геомагнитного поля почти на 150 нТл. С 2000 г. по 2008 г. интенсивность поля остается практически неизменной, но в 2009 г. ее рост возобновляется.

Рассмотрим возможную связь аномального изменения геомагнитного поля в 2000–2008 гг. с Култукским землетрясением 27.08.2008 г. ($M=6.3$), сильнейшим из произошедших в Байкальской впадине за последние 50 лет. Землетрясение ощущалось на значительной территории Сибири; его гипоцентр располагался на глубине около 16 км; эпицентр находился в 55 км от обсерватории Патроны (см. рис. 1).

На графике Z -компонеты (см. рис. 2, в) видно, что до момента Култукского землетрясения происходит замедление роста интенсивности (напряженности) вертикального магнитного поля. Это также хорошо прослеживается и на рис. 3, где приведено сопоставление вековых вариаций вертикальных составляющих в обсерваториях Патроны и Паратунка (последняя расположена вблизи г. Петропавловска-Камчатского).

Графики Z -компонент в обеих обсерваториях остаются подобными на протяжении почти 31 года, т.е. вплоть до 1998 г., когда началось их заметное расхождение, связанное с появлением вариации в обсерватории Патроны. Важно отметить, что это произошло за 10 лет до Култукского землетрясения.

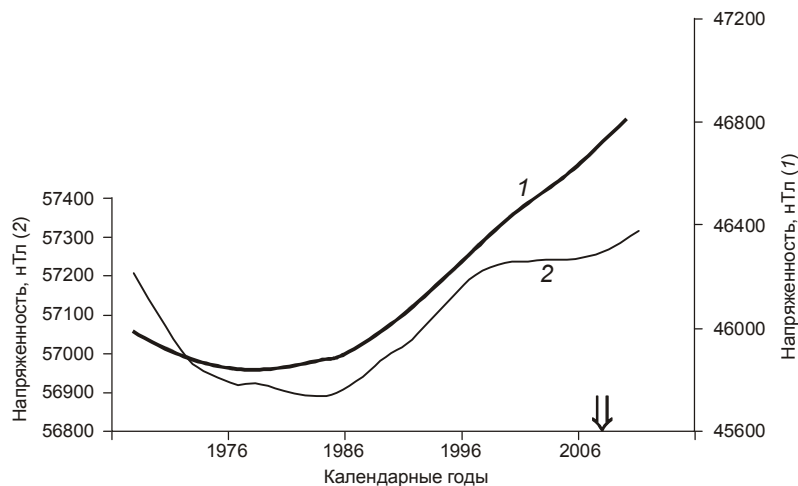


Рис. 3. Сопоставление графиков вековых вариаций напряженности вертикального геомагнитного поля в обсерваториях Паратунка (1, правая вертикальная шкала) и Патроны (2, левая вертикальная шкала). Стрелкой на горизонтальной оси отмечен момент Култукского землетрясения 27.08.2008 г. ($M=6.3$)

Вариация, появившаяся в обсерватории Патроны за 10 лет до сильнейшего землетрясения, выражена и в поведении полного вектора напряженности геомагнитного поля F , график среднегодовых значений которого представлен на рис. 4. На графике

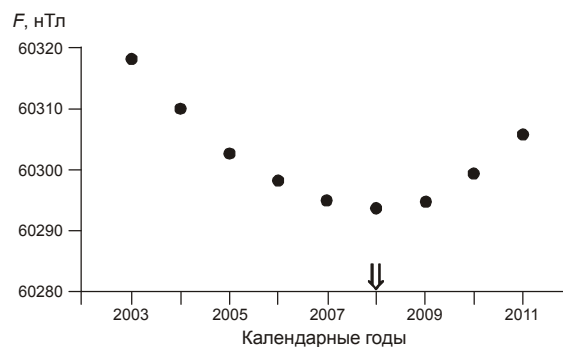


Рис. 4. Обсерватория Патроны. График среднегодовых значений напряженности полного вектора геомагнитного поля F за период 2003–2011 гг. Стрелкой на горизонтальной оси отмечен момент Култукского землетрясения 27.08.2008 г. ($M=6.3$)

хорошо видно, что минимум вариации приурочен к моменту землетрясения. Не исключено, что в определенной мере вариация может быть связана с глубинными процессами в Байкальской рифтовой зоне, результатом которых и стало Култукское землетрясение в южной части оз. Байкал. В этой связи представляет интерес рассмотрение изменения напряженности вариации геомагнитного поля по профилю, проходящему вкост простирания Байкальского рифта.

Были проанализированы среднегодовые значения напряженности геомагнитного поля в обсерватории Патроны и пунктах Сухой ручей, Хурамша и Надеено (рис. 5). Можно видеть, что все четыре приведенных графика подобны. Однако вариации различны по амплитуде, которая меняется при удалении от эпицентра землетрясения. Это указывает на региональный характер аномалии, проявившейся на значительной территории южной части Байкальской рифтовой зоны.

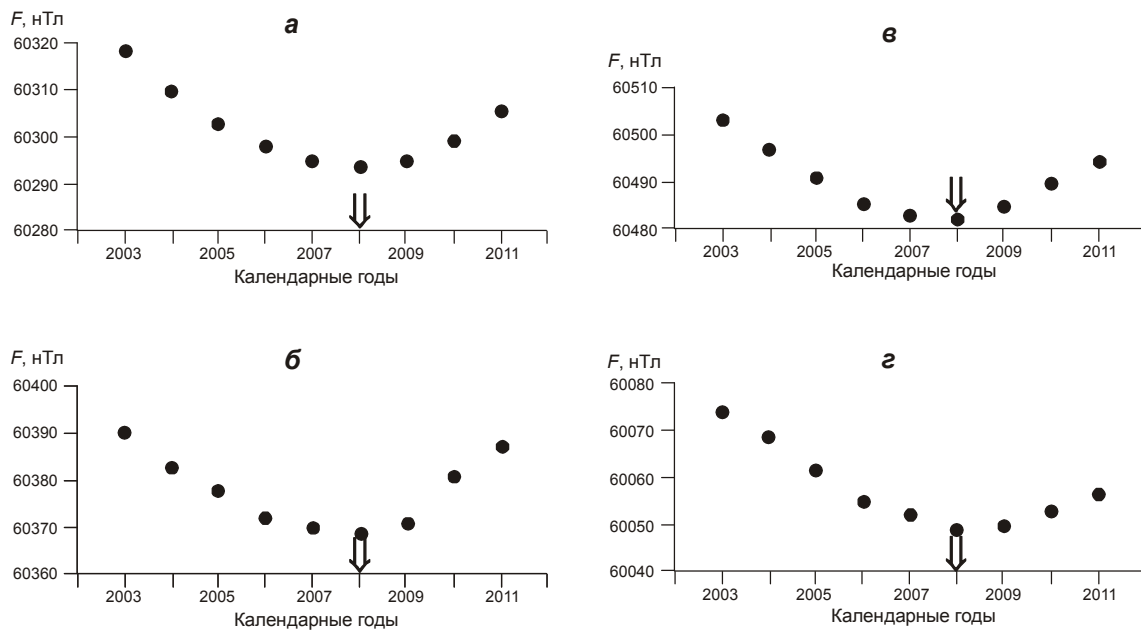


Рис. 5. Графики среднегодовых значений напряженности полного вектора геомагнитного поля F в обсерватории Патроны (*a*), пунктах Сухой ручей (*б*), Хурамша (*в*), Надеено (*г*)

Рассмотрим, как меняется амплитуда вариаций вкост простирания рифтовой зоны. По данным за последние девять лет наблюдений были вычислены разности среднегодовых значений напряженности геомагнитного поля между пунктами Надеено, Хурамша, Сухой ручей и обсерваторией Патроны, принятой в качестве базового пункта (рис. 6).

Изменение напряженности геомагнитного поля возрастает вкост простирания рифта в направлении от обсерватории Патроны к пункту Надеено. Так, с 2003 по 2008 гг. изменение напряженности геомагнитного поля в пункте Сухой ручей составило примерно 2 нТл, в пункте Хурамша – 6 нТл, в пункте Надеено – 8 нТл.

По существующим представлениям, изменение напряженности геомагнитного поля в течение длительного времени может происходить вследствие изменения намагниченности пород в земной коре под влиянием упругих напряжений [Яновский, 1978], механизм которого основан на пьезомагнитном эффекте. По данным о горных давлениях, упругие напряжения в земной коре достигают сотен килограммов на квадратный сантиметр. Грубые оценки показывают, что при таких давлениях возможно появление аномалий магнитного поля интенсивностью в несколько нТл.

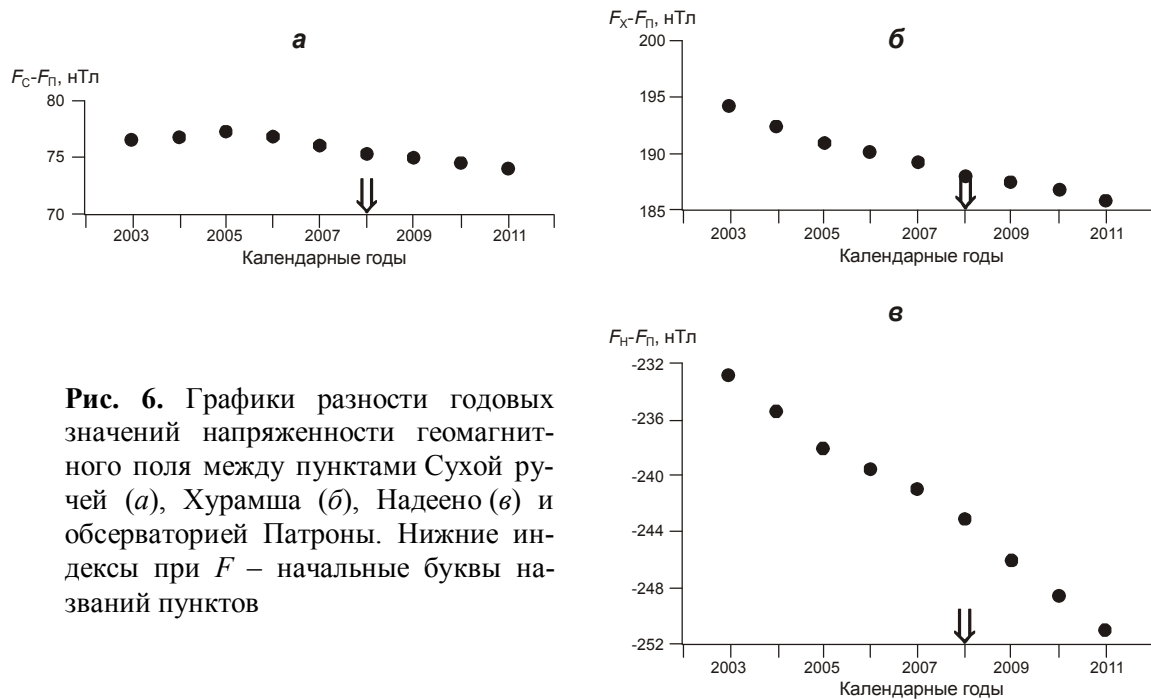


Рис. 6. Графики разности годовых значений напряженности геомагнитного поля между пунктами Сухой ручей (а), Хурамша (б), Надеено (в) и обсерваторией Патроны. Нижние индексы при F – начальные буквы названий пунктов

В связи с вышесказанным значительная доля выявленных изменений разности среднегодовых значений напряженности геомагнитного поля между пунктами наблюдений и обсерваторией Патроны может быть связана с усилением геодинамических процессов в южной части Байкальского рифта, приведшим в 2008 г. к сильнейшему землетрясению. Однако, это утверждение нельзя считать однозначным, поскольку подобные изменения могут объясняться и ходом вековых вариаций геомагнитного поля в рассматриваемый временной период.

Частотные характеристики магнитных типперов

Вариации геомагнитного поля внешнего источника содержат информацию об электропроводности земной коры и верхней мантии. Она может быть получена из соотношения Визе–Паркинсона, определяющего связь между вертикальной и горизонтальными составляющими геомагнитного поля [Паркинсон, 1986; Wiese, 1965]:

$$H_z = W_{zx}H_x + W_{zy}H_y,$$

где H_z, H_x, H_y – составляющие наблюдаемого геомагнитного поля; W_{zx}, W_{zy} – коэффициенты, зависящие от частоты, распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей.

Приведенное соотношение в матричных обозначениях имеет вид [Бердичевский, Дмитриев, 2009] $H_z = [\mathbf{W}] \mathbf{H}_{\text{гор}}$, где $[\mathbf{W}] = [W_{zx}, W_{zy}]$; $\mathbf{H}_{\text{гор}} = [H_x, H_y]$. Матрица $[\mathbf{W}]$, называемая матрицей Визе–Паркинсона, может быть представлена в векторной форме:

$$\mathbf{W} = W_{zx}\mathbf{1}_x + W_{zy}\mathbf{1}_y.$$

Эта матрица, названная типпером [Vozoff, 1972], преобразует горизонтальные составляющие геомагнитного поля H_x, H_y в вертикальную H_z .

Комплексный вектор \mathbf{W} , который принято называть типпером Визе–Паркинсона или индукционной стрелкой Визе–Паркинсона, состоит из двух типперов – вещественного ($\text{Re}\mathbf{W}$) и мнимого ($\text{Im}\mathbf{W}$) (вещественная и мнимая индукционные стрелки):

$$\mathbf{W} = \text{Re}\mathbf{W} + i\text{Im}\mathbf{W},$$

где $\text{Re}\mathbf{W} = \text{Re}W_{zx}\mathbf{1}_x + \text{Re}W_{zy}\mathbf{1}_y$; $\text{Im}\mathbf{W} = \text{Im}W_{zx}\mathbf{1}_x + \text{Im}W_{zy}\mathbf{1}_y$.

Компоненты индукционной матрицы (типпера) W_{zx} , W_{zy} отражают распределение электропроводности геологической среды по горизонтали и вертикали. Индукционные стрелки характеризуют наличие зон повышенной электропроводности на разных глубинах. При наличии вытянутых проводящих зон вещественные индукционные стрелки ориентированы в их сторону; при этом мнимые стрелки коллинеарны с вещественными. Векторное произведение стрелок равно 0. Коллинеарность вещественных и мнимых стрелок (типперов) наблюдается и в осесимметричной трехмерной модели (векторы $Re\mathbf{W}$ и $Im\mathbf{W}$ ориентированы в радиальном направлении). В трехмерных моделях коллинеарность индукционных стрелок нарушается.

Обратимся к экспериментальным данным. Ряды H -, D -, Z -составляющих геомагнитного поля, зарегистрированные в обсерватории Патроны и пунктах Тырган, Энхалук, Надеено, были использованы для определения компонент индукционной матрицы Визе–Паркинсона с помощью программы Ларсена [Larsen *et al.*, 1996]. Расчеты выполнены по временным массивам длительностью 3 мес с дискретностью 1 мин. В результате расчетов для обсерватории Патроны и трех названных пунктов были получены вещественные и мнимые типперы, частотные характеристики модулей и азимутов которых представлены на рис. 7.

На периодах 100–1000 с вещественные типперы направлены в сторону Байкальской впадины (см. рис. 1). На разных периодах они имеют различную длину и по-разному ориентированы, что свидетельствует о влиянии вытянутых проводящих зон, залегающих на разных глубинах. Более полное представление о влиянии геоэлектрических неоднородностей дают частотные характеристики типперов. Обратимся к их поведению в обсерватории Патроны (рис. 7, *a*). Следует отметить, что типперы в обсерватории Патроны и в пункте Энхалук были рассмотрены нами ранее в работе [Мороз, Мороз, 2006]. Здесь же мы отметим лишь основные особенности их поведения в зависимости от периода вариаций геомагнитного поля.

В обсерватории Патроны типпер $Re\mathbf{W}$ имеет максимум на периоде 1000 с, которому отвечает минимум типпера $Im\mathbf{W}$. При этом азимут типпера $Im\mathbf{W}$ меняется на 180° . В диапазоне периодов 100–1000 с типперы $Re\mathbf{W}$ и $Im\mathbf{W}$ коллинеарны. Эти особенности в поведении типперов характерны для вытянутой проводящей зоны. Максимум кривой $Re\mathbf{W}$ связан с насыщением электрическим током проводящей зоны. Грубые оценки показывают, что на периоде 1000 с электромагнитная волна распространяется на расстояние более 100 км. Можно полагать, что поведение векторов индукции в рассматриваемом диапазоне периодов связано с рифтовой зоной. По максимуму частотной кривой можно оценить интегральную продольную проводимость сечения зоны [Роки-тянский, 1975] – она составляет около $2 \cdot 10^8$ Ом·м.

Характерно, что в низкочастотном диапазоне типперы $Re\mathbf{W}$ и $Im\mathbf{W}$ примерно ортогональны. Второй максимум типпера $Re\mathbf{W}$, отмечаемый на периоде 50000 с, заметно меньше второго максимума $Im\mathbf{W}$ (см. рис. 7, *a*). Эти особенности свидетельствуют о влиянии трехмерной проводящей зоны, которая в обобщенном виде может быть представлена как рифтовая зона, состоящая из трех крупных вытянутых разно ориентированных фрагментов.

Рассмотрим типперы в пункте Тырган (см. рис. 7, *b*). Вещественный типпер имеет максимальные значения на периоде 100 с; мнимый типпер на этом периоде близок к нулю. Угол между вещественным и мнимым типперами составляет около 40 – 50° , что свидетельствует о влиянии трехмерной геоэлектрической неоднородности на высоких частотах. С понижением частоты отмечается возрастание типпера $Im\mathbf{W}$ и уменьшение типпера $Re\mathbf{W}$.

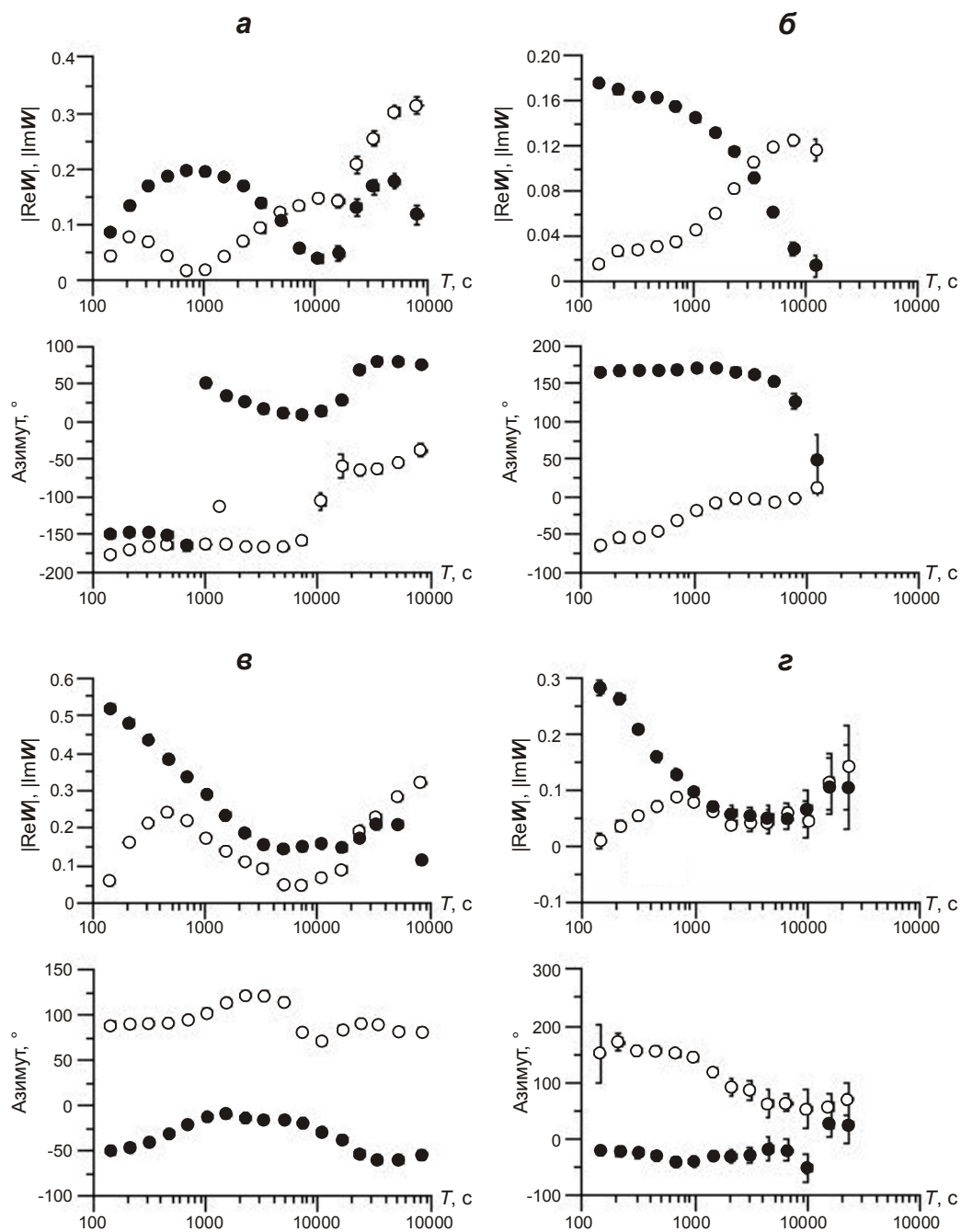


Рис. 7. Частотные характеристики магнитного типпера (модулей и азимутов вещественной и мнимой индукционных стрелок) в обсерватории Патроны (а) и пунктах Тырган (б), Энхалук (в), Надеено (г). Вертикальные отрезки на графиках означают доверительные интервалы

При этом типперы становятся коллинеарными, что указывает на влияние проводящей вытянутой зоны. Представляется, что в районе пункта Тырган верхняя часть земной коры содержит трехмерную геоэлектрическую неоднородность, влияние которой проявляется в виде трехмерного эффекта в поведении типперов. О трехмерном характере локальной геоэлектрической неоднородности свидетельствуют также данные магнитотеллурического зондирования [Мороз и др., 2007]. С понижением частоты на поведение типперов оказывает влияние проводящая зона Байкальской впадины.

В пункте Энхалук (см. рис. 7, в) вещественный типпер имеет максимум на периоде 150 с и ориентирован в сторону рифта. Максимум мнимого типпера отмечен

на периоде 500 с. Угол между векторами ReW и ImW составляет около 140° , что свидетельствует о присутствии вытянутой проводящей геоэлектрической неоднородности. Оценки показывают, что влияние скин-слоя на периоде 150 с составляет первые десятки километров, в связи с чем проводящую зону можно связать с Байкальской впадиной. Важно отметить, что вещественный типпер имеет здесь максимальное по сравнению с другими пунктами и обсерваторией Патроны значение, составляющее около 0.5. Не исключено, что такое значение типпера обусловлено вкладом глубинного проводящего разлома в береговой части оз. Байкал. Второй максимум ReW , как и в обсерватории Патроны, отмечается на периоде 50000 с. Векторы ReW и ImW почти ортогональны, что свидетельствует о наличии трехмерной проводящей геоэлектрической неоднородности. Поскольку величина скин-слоя на периоде 50000 с оценивается в первые сотни километров, эта проводящая неоднородность может быть связана с Байкальской рифтовой зоной, представляющей собой в региональном плане крупную трехмерную неоднородность, состоящую из трех вытянутых фрагментов различной ориентировки.

В пункте Надеено, находящемся на расстоянии около 80 км от оз. Байкал, максимум вещественного типпера имеет значение 0.3 на периоде 120 с; азимут типпера – 330° . Максимум мнимого типпера отмечен на периоде примерно 700 с. Вещественный и мнимый типперы почти коллинеарны в высокочастотной области, что указывает на наличие вытянутой проводящей зоны. На периодах более 1000 с коллинеарность типперов нарушается, отражая трехмерность геоэлектрической среды. Следует отметить, что частотные характеристики вещественного и мнимого типперов в пунктах Надеено и Энхалук подобны, следовательно, возможна связь типперов в пункте Надеено с проводящей зоной в районе оз. Байкал.

Выявленные особенности частотных характеристик типперов в рассмотренных пунктах мы попытались проверить с помощью численного моделирования магнитотеллурического поля в пробных моделях. Первоначально была рассмотрена трехмерная модель Байкальской впадины, геоэлектрические параметры которой приняты по данным батиметрии и электромагнитных исследований [Жирова и др., 1993; Мац и др., 2001; Мороз и др., 2007; Мороз, Мороз, 2011]. Впадина содержит водную толщу с удельным электрическим сопротивлением 200 Ом·м и осадочный чехол с удельным электрическим сопротивлением 4 Ом·м. Мощность осадочного чехла меняется из-за рельефа нижней поверхности водной толщи; средняя мощность – около 2 км. Нижняя поверхность осадочной толщи принята плоской из-за отсутствия данных.

В результате расчетов получены частотные кривые типпера, заметно отличающиеся от экспериментальных кривых. Так, в обсерватории Патроны модельная кривая вещественного типпера имеет максимум на периоде 100 с, а экспериментальная – на периоде 1000 с; в пункте Энхалук вещественный типпер – на периоде 100 с равен 0.9, а экспериментальный – 0.5. Различия отмечаются также в пунктах Тырган и Надеено. Все это свидетельствует о том, что экспериментальные кривые типпера нельзя объяснить наличием только проводящего осадочного чехла. Можно полагать, что на типпер оказывают влияние и геоэлектрические неоднородности в земной коре и верхней мантии рифта. Попытаемся учесть эти неоднородности.

Анализ магнитотеллурического поля для предварительной трехмерной модели Байкальской впадины [Мороз и др., 2007; Мороз, Мороз, 2011] показывает, что в первом приближении геоэлектрическая модель впадины можно рассматриваться как двумерная. Поэтому для объяснения кривых типпера воспользуемся полученной по данным МТЗ глубинной геоэлектрической моделью по профилю, пересекающему оз. Байкал. Эта модель включает толщу воды, осадочный чехол, коровый и верхнемантийный проводящие слои и астеносферный слой пониженного электрического сопротивления. Коровый и верхнемантийный слои располагаются под озером и в Забайкалье.

Кривые вещественного типпера для такой модели качественно согласуются с экспериментальными данными в обсерватории Патроны и пунктах Тырган, Надеено. Однако в пункте Энхалук модельные и экспериментальные кривые различны – экспериментальные данные превышают модельные почти в 2 раза. Для устранения этого различия была выполнена коррекция модели. В исходную глубинную геоэлектрическую модель в прибрежной зоне (в районе пункта Энхалук) был добавлен глубинный проводящий разлом, выделяемый по геологогеофизическим. Благодаря этому было достигнуто качественное согласие экспериментальной и модельной кривых для глубинного разлома с шириной в первые сотни метров и глубиной проникновения от 2 до 10 км при удельном электрическом сопротивлении в первые единицы Ом·м.

Результаты мониторинга магнитного типпера

Многолетние наблюдения H -, D -, Z -составляющих вариаций геомагнитного поля дают возможность изучить изменение магнитного типпера во времени и получить представление о динамике электропроводности геологической среды на разных глубинах. Для этого нами были использованы вариации геомагнитного поля в диапазоне периодов от первых минут до первых десятков тысяч секунд за время наблюдений с 01.01.2001–31.12.2011 гг. Предварительно выбирался временной интервал, на котором типпер определяется наиболее устойчиво, для чего был выполнен анализ для интервалов 1, 2, 3, 4, 5, 10 сут. Результаты показали, что наиболее устойчиво типперы определяются для минимального временного интервала, равного 5 сут, на котором когерентность между вариациями геомагнитного поля должна быть не менее 0.8.

Затем была создана специальная программа для формирования из банка данных 5-суточных массивов синхронных вариаций геомагнитного поля. В каждом массиве с помощью программы Ларсена [*Larsen et al.*, 1996] определялись вещественные типперы для периодов от 150 до 22000 с. В результате были получены временные ряды на периодах 150, 200, 300, 450, 670, 1000, 1500, 2000, 3000, 6600, 10000, 16000, 22000 с. В поведении вещественных типперов на периодах 150, 200 и 300 с проявились аномальные возмущения, превышающие средний уровень в несколько раз. В качестве примера на рис. 8 приведены временные ряды для периодов 150 с (рис. 8, а) и 1000 с (рис. 8, б).

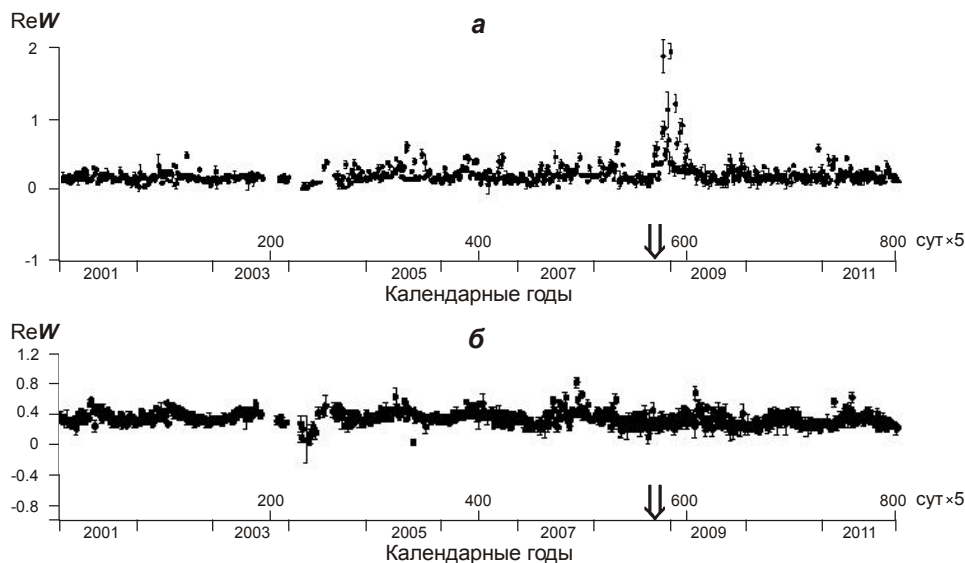


Рис. 8. Временные ряды вещественного типпера для периодов 150 с (а) и 1000 с (б). Стрелкой отмечен момент Култукского землетрясения 27.08.2008 г. ($M=6.3$). Вертикальные отрезки – доверительные интервалы (бары). Над горизонтальной осью – календарные годы; под ней – количество использованных для мониторинга временных массивов, сут×5

На рис. 8, *a* видно, что начало аномалии длительностью около 2 мес приурочено к моменту сильного Култукского землетрясения. В связи с этим возникает вопрос о возможной природе аномального возмущения типпера. Можно предположить, что оно связано с возникновением в результате землетрясения геоэлектрической проводящей неоднородности, что и привело к увеличению типпера в несколько раз.

Рассмотрим, в какой мере и каким образом должны измениться геоэлектрические параметры среды, чтобы типпер увеличился в несколько раз. Попробуем решить эту задачу с помощью численного двумерного моделирования магнитотеллурического поля. В качестве исходной примем двумерно неоднородную модель Байкальской рифтовой зоны [Мороз, Мороз, 2011]. Следует отметить, что аномальное возмущение проявилось только на коротких периодах 150–300 с; с увеличением периода вариаций возмущение затухает. По приближенным оценкам горизонтального и вертикального скин-эффекта на указанных периодах геоэлектрическая неоднородность могла возникнуть в верхних частях земной коры.

Изменяя электропроводность верхних частей земной коры, в частности, вводя в модель проводящие вертикальные зоны, имитирующие разломы, мы выполнили несколько вариантов расчетов. Результаты показали, что магнитный типпер возрастает до единицы при уменьшении удельного электрического сопротивления разломов в 30–40 раз. Такое уменьшение сопротивления до десятых долей Ом·м возможно при насыщении верхних частей земной коры высокоминерализованными растворами. Оценки показывают, что достаточно десятых и даже сотых долей процента высокоминерализованной воды в связанном состоянии, чтобы уменьшить удельное электрическое сопротивление на порядки [Ваньян, Хайдман, 1996].

Таким образом, можно предположить, что в результате землетрясения произошло проникновение высокоминерализованных растворов в верхние слои земной коры. Это привело к резкому уменьшению удельного электрического сопротивления, что проявилось увеличением магнитного типпера. Аномальное увеличение электропроводности сохранялось в течение нескольких месяцев, после чего аномалия электропроводности постепенно исчезла в связи с уменьшением минерализации насыщающих растворов осадочного чехла. Наряду с этой версией следует также принять во внимание вероятность появления в результате землетрясения литосферно-ионосферных связей. Этот эффект может привести к аномальным изменениям в вариациях геомагнитного поля, выраженным возмущением магнитного типпера.

Анализ временных рядов типперов за многолетний период свидетельствует, что в поведении ReW в диапазоне периодов от 600 до 3000 с выражены годовые вариации, характеризующие электропроводность геологической среды. На рис. 8, *b* приведен временной ряд вещественного типпера на периоде 1000 с, на котором он определяется более устойчиво. Годовые вариации в поведении мнимого типпера практически не выражены.

Следует отметить, что по данным МТЗ на указанных периодах проявились проводящие зоны в литосфере рифтовой зоны, связываемые с глубинными разломами [Мороз, Мороз, 2012]. Есть основание полагать, что годовые вариации магнитного типпера связаны с электропроводностью глубинных разломов. О возможной природе такого изменения проводимости однозначно пока судить трудно. Можно предположить, что годовые вариации проводимости разломов могут быть вызваны обращением Земли вокруг Солнца, в результате которого проявляется годовая цикличность в изменении трещиноватости литосферы, степени насыщенности гидротермальными растворами и степени их минерализации.

Выводы

По данным многолетних наблюдений геомагнитного поля по сети пунктов в Байкальской рифтовой зоне изучены вековые вариации геомагнитного поля. Выявлены изменения разности среднегодовых значений полного вектора геомагнитного поля с 2003 по 2011 гг. между шестью пунктами наблюдений и обсерваторией Патроны, расположенными в рифтовой зоне. Можно предположить, что прослеженные изменения связаны с активизацией геодинамических процессов, проявившихся сильнейшим Култукским землетрясением. Однако однозначно судить об этом трудно, так как подобные изменения могут быть обусловлены ходом вековых вариаций геомагнитного поля в рассматриваемый период.

По вариациям геомагнитного поля в диапазоне периодов от первых минут до первых часов построены частотные кривые магнитного типпера в обсерватории Патроны, пунктах Энхалук, Тырган, Надеено. Интерпретация этих кривых выполнена с привлечением трех- и двумерного численного моделирования. Экспериментальные кривые типперов нельзя объяснить наличием только проводящего осадочного чехла в Байкальской впадине. Удовлетворительное согласие экспериментальных и модельных частотных кривых получено для обобщенной двумерной модели, содержащей глубинные проводящие слои. При этом в районе пункта Энхалук модель на глубинах 2–10 км содержит разлом шириной в первые сотни метров с удельным электрическим сопротивлением в первые единицы Ом·м.

Обсерваторией Патроны получены многолетние временные ряды магнитных типперов с периодами в диапазоне от 150 до 22000 с. В поведении вещественных типперов на периодах 150–300 с прослежено аномальное возмущение, которое может быть связано с Култукским землетрясением 2008 г. Приближенные оценки, выполненные с помощью численного моделирования магнитотеллурического поля, свидетельствуют, что для подобного изменения вещественного типпера на периоде 150 с необходимо увеличение электропроводности верхних частей земной коры южной части впадины в первые десятки раз. Возможно, что в результате землетрясения в указанные части разреза проникли высокоминерализованные растворы. С течением времени минерализация растворов уменьшилась, вследствие чего аномалия исчезла. Нельзя исключить также влияния появившихся в результате землетрясения литосферно-ионосферных связей, что могло привести к аномальным возмущениям магнитного типпера.

В обсерватории Патроны в поведении вещественного типпера в диапазоне периодов от 600 до 3000 с выражены годовые вариации, характеризующие электропроводность геологической среды. Годовые вариации магнитного типпера, возможно, отражают изменение электропроводности разломных зон. Предполагается, что годовые вариации магнитного типпера могут быть вызваны обращением Земли вокруг Солнца, в результате которого проявляется годовая цикличность в изменении трещиноватости литосферы, степени насыщенности гидротермальными растворами и степени их минерализации.

Литература

- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2009. 680 с.
- Ваньян Л.Л., Хайдман Р.Д.* О природе электропроводности консолидированной коры // *Физика Земли.* 1996. № 4. С.5–11.
- Дядьков П.Г., Мандельбаум М.М., Татьков Г.И., Ларионов В.А., Жирова Н.В., Михеев О.А., Низамутдинов Р.С., Чебаков Г.И.* Особенности развития сейсмотектонического процесса и процессов подготовки землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой зоны по результатам тектономагнитных исследований // *Геология и геофизика.* 1999. Т. 40, № 3. С.346–359.

- Жирова Н.В., Мандельбаум М.М., Морозова Г.М., Эпов М.И. Геоэлектрическая характеристика сейсмологических структур Байкальского прогностического полигона // Геология и геофизика. 1993. № 1. С.133–144.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакишин А.М., Поспеев А.В., Шимарев М.Н., Хлыстов О.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины. Строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 250 с.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Магнитовариационные исследования в районе озера Байкал // Физика Земли. 2006. № 11. С.93–98.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Магнитотеллурическое зондирование Байкальского рифта // Электромагнитное зондирование Земли. СПб.: Изд-во СПТГУ, 2011. С.265–268.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал // Физика Земли. 2012. № 5. С.64–76.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Моги Т. Методика и результаты мониторинга естественного электрического поля Земли в Байкальской рифтовой зоне // Физика Земли. 2007. № 11. С.37–49.
- Орлов В.П. Магнитные аномалии векового хода в Средней Азии // Изв. АН СССР. Сер. Геофизика. 1958. № 10. С.1245–1247.
- Рокитянский И.И. Исследования аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев: Наук. думка, 1975. 279 с.
- Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986. 528 с.
- Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 578 с.
- Larsen I.C., Mackie R.L., Manzella A., Fiodelisi A., Rieven S. Robust smooth magnetotelluric transfer functions // Geophys. J. Inter. 1996. V. 124. P.801–819.
- Vozoff K. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins // Geophysics. 1972. V. 37. P.98–141.
- Wiese H. Geomagnetische Tiefentelluric. Berlin: Deutsche Akad. Wiss, 1965. 146 p.

Сведения об авторах

МОРОЗ Юрий Федорович – доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: (4152) 29-78-82. E-mail: morozyf@kscnet.ru

ТАТЬКОВ Геннадий Иванович – доктор геолого-минералогических наук, директор Геологического института СО РАН. 670047, Улан-Удэ, Сахьяновой ул., д. 6а. Тел.: (3012) 43-49-21. E-mail: tatkovgeo@gmail.com

МОРОЗ Тамара Алексеевна – научный сотрудник, Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. 683006 Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, д. 9. Тел.: (4152) 29-78-82. E-mail: morozyf@kscnet.ru

ТУБАНОВ Цырен Алексеевич – научный сотрудник, Геологический институт СО РАН. 670047, Улан-Удэ, Сахьяновой ул., д. 6а. Тел.: (3012) 43-32-11. E-mail: siren65@mail.ru

ПРЕДЕИН Петр Алексеевич – лаборант, Геологический институт СО РАН. 670047, Улан-Удэ, Сахьяновой ул., д. 6а. Тел.: (3012) 43-32-11. E-mail: crmpeter@gmail.com

CHANGES IN THE GEOMAGNETIC FIELD AND MAGNETIC TIPPER IN THE BAIKAL RIFT ZONE

Y.F. Moroz^{1,2}, G.I. Tatkov², T.A. Moroz¹, Z.A. Tubanov², P.A. Predein²

¹ Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

² Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Abstract. The paper considers results of the study of secular variations of geomagnetic field from 1968 through 2011 and frequency curves of magnetic tipper and its time series for the last 10 years. It was revealed that average annual values of the geomagnetic field changed from 2003 through 2011. It is presumably associated with the increase of geodynamic processes in the southern part of the Baikal Rift related to the large Kultuck earthquake of 27.08.2008 г. ($M=6.3$).

Frequency parameters of magnetic tippers are attributed to the electro-conductivity of geological environment. It was shown that the tippers contain information about conductive zones of the rift. The behavior of magnetic tippers at 150–300 sec revealed an anomalous effect related to the Kultuck earthquake. The annual periodicity of magnetic tipper was observed at 1000–3000 sec. The possible origin of observed features in the behavior of the geomagnetic field and magnetic tippers is considered.

Keywords: geomagnetic field, field variations, magnetic tipper, electroconductivity, earthquakes.