

УДК 550.837

РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОБСЕРВАТОРИЯХ “МАГАДАН” И “ПАРАТУНКА”

© 2011 г. Ю. Ф. Мороз¹, Т. А. Мороз¹, С. Э. Смирнов²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский
E-mail morozyf@kscnet.ru

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка, Камчатской области

Поступила в редакцию 19.01.2009 г.

В 2007–2008 гг. выполнены исследования магнитного типпера и тензора в диапазоне периодов от первых минут до первых часов. Приводятся частотные характеристики, полярные диаграммы, вещественные и мнимые индукционные стрелки, характеризующие влияние геоэлектрических неоднородностей. По данным мониторинга типпера и тензора выявлены годовые вариации, которые обусловлены изменением электропроводности литосферы. В поведении магнитного типпера и тензора проявились аномальные изменения, которые могут быть связаны с землетрясениями с $M \geq 6.3$.

Вариации геомагнитного поля содержат информацию об электропроводности геологической среды, которую можно получить с помощью передаточных магнитовариационных параметров, представленных в виде магнитного типпера и магнитного тензора [Бердичевский и др., 2003; Мороз и др., 2006; Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Магнитный типпер характеризует связь вариаций вертикальной составляющей геомагнитного поля с горизонтальными составляющими геомагнитного поля в одном пункте наблюдения. Магнитный тензор дает представление о связи горизонтальных составляющих вариаций геомагнитного поля при одновременном наблюдении в двух разнесенных пунктах наблюдений. Исследования магнитного типпера и тензора выполнены по данным синхронных наблюдений вариаций геомагнитного поля с дискретностью 1 с в обсерваториях “Магадан” и “Паратунка” в 2007–2008 гг. Цель настоящих исследований – изучить закономерности изменений указанных параметров во времени и оценить возможную их связь с сильными землетрясениями. Этой проблеме и посвящена настоящая статья.

КРАТКАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА В РАЙОНЕ ОБСЕРВАТОРИЙ

Геомагнитные обсерватории “Магадан” и “Паратунка” расположены на расстоянии около 900 км (рис. 1). Обсерватория “Магадан” находится в п. Стекольном, расположенным на побережье Охотского моря, в 70 км к северу от г. Магадан (60°03' с.ш. и 151°43' в.д.). Структуры кайнозойского вулканогенного чехла имеют здесь субширотное простирание. Геоэлектрический разрез включает

кайнозойский осадочно-вулканогенный чехол с удельным электрическим сопротивлением от первых десятков до первых сотен Ом м, мощностью 1.5–2 км. В основании чехла залегают породы кристаллического фундамента с удельным электрическим сопротивлением в первые тысячи Ом м. Литосфера содержит проводящие зоны с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом м.

Обсерватория “Паратунка” расположена на побережье Тихого океана (52°58.31' с.ш. и 158°14.877' в.д.), на расстоянии 15 км от Авачинской бухты. В этом районе преобладают тектонические сооружения северо-восточного простирания, осложненные поперечными структурами. Район обсерватории приурочен к Начикинской складчатой зоне. В ее пределах выделяется ряд неотектонических структур, имеющих северо-восточное простирание. Среди них отмечается грабеновая структура долины реки Паратунка, в пределах которой находится обсерватория. Геоэлектрический разрез района по данным электромагнитных зондирований представлен в следующем виде. Верхняя часть разреза, сложенная четвертичными осадочно-вулканогенными образованиями, имеет мощность первые сотни метров, удельное электрическое сопротивление от первых десятков Ом м до тысячи и более Ом м. Ниже залегают кайнозойские вулканогенно-осадочные образования мощностью до 1.5 км с удельным электрическим сопротивлением в первые десятки Ом м. В литосфере на глубинах 20–40 км выделяется слой повышенной электропроводности. Удельное электрическое сопротивление слоя составляет первые десятки Ом м. Верхняя мантия на глубинах 100–200 км содержит астеносферный слой повышенной электропроводности.

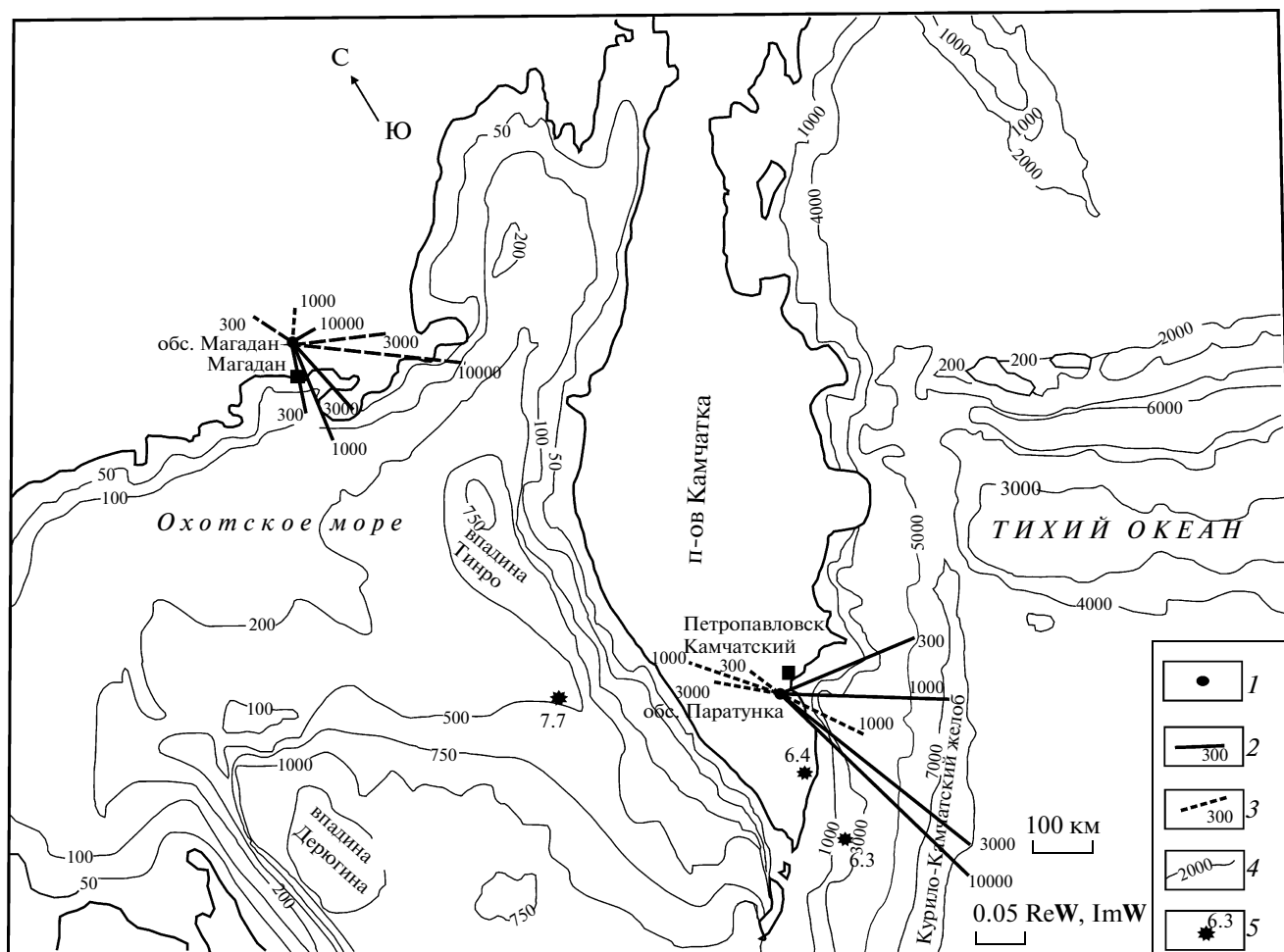


Рис. 1. Схема расположения геомагнитных обсерваторий и индукционных стрелок на различных периодах вариаций: 1 – обсерватории; 2 и 3 – вещественные и мнимые индукционные стрелки (цифрами у стрелок обозначены периоды вариаций в секундах); 4 – изобаты; 5 – эпицентры землетрясений с обозначением магнитуды.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В обсерваториях “Паратунка” и “Магадан” измерения вариаций геомагнитного поля производятся с помощью феррозондовых магнитометров FRG–601 G. Регистрация компонент H , D , Z осуществляется с дискретностью 1 с в автоматическом режиме. В обсерватории Магадан регистрация вариаций с такой дискретностью производится непрерывно только с 01.10.2006 г. Для привязки меток времени используется GPS приемник. Точность измерений вариаций геомагнитного поля составляет 0.01 нТ. Для изучения передаточных магнитовариационных функций использованы синхронные временные ряды вариаций геомагнитного поля в обсерваториях за 2007–2008 гг. Первичная обработка временных рядов компонент H , D , Z сводилась к редакции данных, выявлению технических сбоев, интерполяции, осреднению, масштабированию и т.д. В результате обработки сформирован банк данных, который содержит временные ряды H , D , Z с дискретностью 1 с

01.01.2007 г. по 31.12.2008 г. по месяцам и суткам. Этот банк данных был положен в основу обработки и анализа. На рис. 2, в качестве примера, приведено сопоставление графиков H , D , Z в обсерватории “Паратунка” и “Магадан” на временных интервалах равных 5000 с и 14160 мин. Это дает возможность получить представление о качественном соответствии вариаций компонент геомагнитного поля в различных частотных диапазонах. На рисунке видно, что одноименные вариации по своей морфологии близки между собой. Однако, существуют и заметные различия. Так на рис. 2а, где хорошо выражены вариации с периодом примерно 600 с, амплитуда компонент H и D в обсерватории “Магадан” заметно превышает соответствующие амплитуды компоненты H и D в обсерватории “Паратунка”. В то же время амплитуда H_Z в обсерватории “Магадан” в несколько раз меньше H_Z в обсерватории “Паратунка”. Обратимся к рис. 2б, где проявились суточные вариации геомагнитного поля. Здесь одноименные вариации H , D в обсерваториях “Ма-

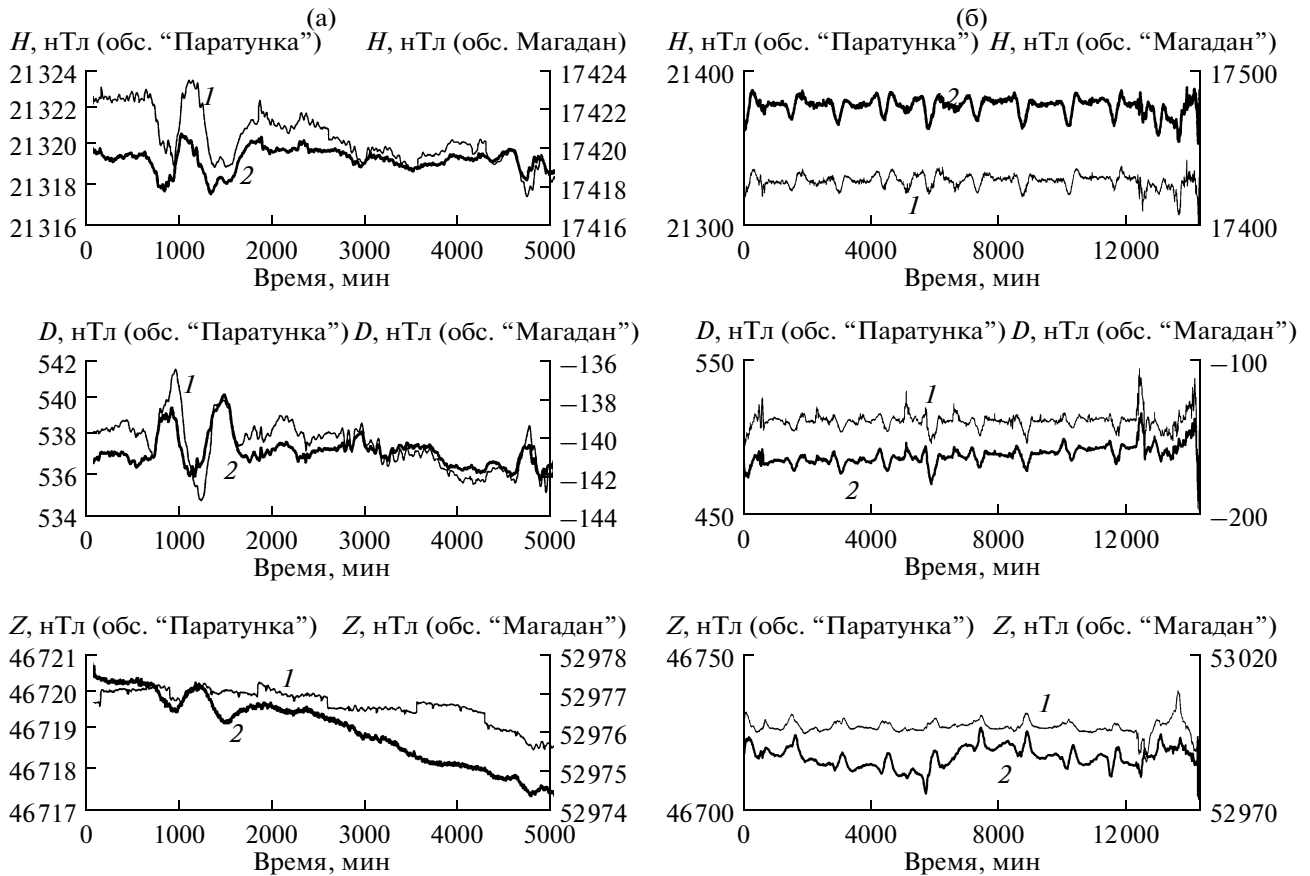


Рис. 2. Сопоставление графиков напряженности вариаций составляющих геомагнитного поля в обс. “Магадан” и “Паратунка” на временных интервалах 5000 с (а) и 14160 мин (б). H , D , Z – меридиональная, долготная и вертикальная составляющие геомагнитного поля. Цифрами 1 и 2 обозначены графики в обс. “Магадан” и “Паратунка” соответственно. Периоды регистраций: (а) – 01.03.2007 (20:49:59–22:13:19); (б) – 01.12.2007–10.12.2007.

гадан” и “Паратунка” по своей интенсивности соизмеримы. Однако, интенсивность компоненты Z в обсерватории “Магадан” также в несколько раз меньше компоненты Z в обсерватории “Паратунка”. Эти особенности в поведении вариаций геомагнитного поля в различных частотных диапазонах, как будет показано ниже, в значительной мере зависят от контраста электропроводности суши и моря и глубинной электропроводности в районах обсерваторий “Паратунка” и “Магадан”.

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ТИППЕРА

По вариациям компонент H , D , Z имеется возможность изучить передаточную функцию в частотной области, которая получила название магнитного типпера. В основе получения типпера лежит предположение о существовании линейного соотношения вида [Бердичевский, Жданов, 1981; Бердичевский и др., 2003; Бердичевский, Дмитриев, 2009]:

$$H_z = [W] H_{\text{гор.}}, \text{ где } [W] = |W_{zx}W_{zy}| \text{ или}$$

$H_z = W_{zx}H_x + W_{zy}H_y$, где H_z , H_x , H_y – составляющие наблюдаемого магнитного поля, W_{zx} , W_{zy} – компоненты индукционной матрицы (типпера), зависящие от частоты, распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей. По компонентам индукционной матрицы определяются индукционные стрелки [Schmucker, 1970]

$$\text{Re } W = \text{Re } W_{zx}i + \text{Re } W_{zy}j,$$

$$\text{Im } W = \text{Im } W_{zx}i + \text{Im } W_{zy}j.$$

Определение компонент матрицы и индукционных стрелок производилось с помощью программы, алгоритм которой основан на известной робастной методике, разработанной Дж. Ларсеном [Larsen et al., 1996; Larsen, 1997]. Данная робастная методика спектральной обработки разработана для вычисления переходных функций по электромагнитным полям, содержащим поля различного происхождения. Они позволяют не только определить переходные функции, но и эффективно подавлять влияние электромагнитных полей не магнитотеллурического происхождения (солнечно-суточные и приливные гармоники,

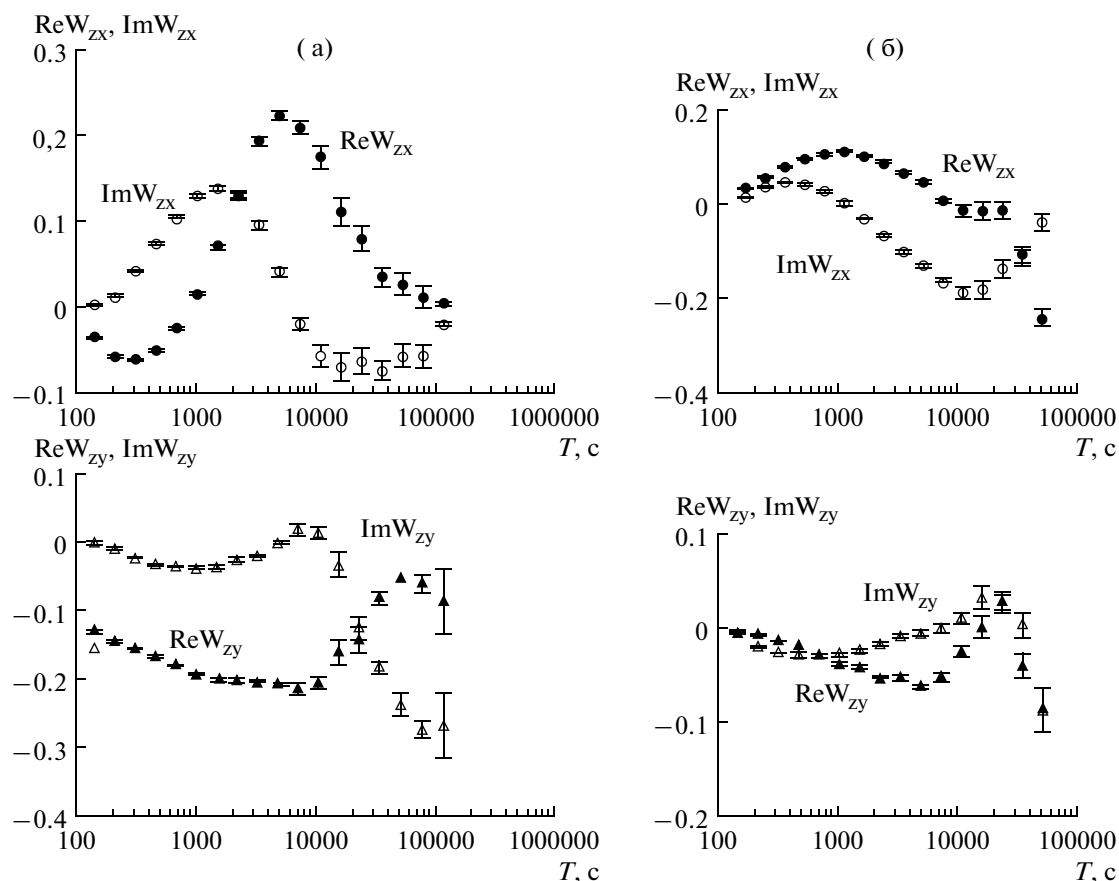


Рис. 3. Частотные характеристики вещественной и мнимой компонент типпера в обс. “Паратунка” (а) и “Магадан” (б). Период наблюдений: 01.01.2007–30.06.2007.

промышленные шумы и пр.). В основе определения магнитовариационных параметров лежит использование когерентных вариаций составляющих геомагнитного поля. При когерентности вариаций 0.8 и более магнитовариационные параметры определяются с точностью в первые проценты.

Рассмотрим частотные характеристики магнитного типпера в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан”. Они получены по данным непрерывных синхронных регистраций за 6 месяцев. На рис. 3 представлены частотные кривые действительных и мнимых компонент типпера. Изменение указанных компонент в зависимости от периода свидетельствует о латеральных и вертикальных геоэлектрических неоднородностях среды в районах расположения обсерваторий “Паратунка” и “Магадан”. Представление о влиянии геоэлектрических неоднородностей на различных частотах можно получить из магнитных полярных диаграмм, представленных на рис. 4. Схождение лепестков в начале координат свидетельствует в пользу двумерности геологической среды. Расхождение этих лепестков указывает на влияние трехмерных неоднородностей. Так в обс. “Паратунка” форма и ориентировка полярной диаграммы на периоде 150 с обусловлена влиянием

Авачинской бухты, создающей трехмерный эффект в геомагнитном поле. На периоде 300–3000 с диаграммы ориентированы вкrest простирания Курило-Камчатского желоба, представляющего собой двумерную геоэлектрическую неоднородность. В пользу этого свидетельствует схождение лепестков диаграммы в начале координат. На $T = 10000$ с полярная диаграмма меняет свою ориентировку почти на 45° . Лепестки в начале координат заметно расходятся, что указывает на трехмерную неоднородность среды, связанную, по-видимому, с южным замыканием Камчатки и влиянием Алеутской островной дуги.

Рассмотрим магнитные полярные диаграммы в обсерватории “Магадан”. На периодах 300 и 1000 с диаграммы отражают трехмерную геоэлектрическую неоднородность, связанную с влиянием бухты Нагаево и залива Шелехова. С увеличением периода вариаций полярные магнитные диаграммы характеризуют геоэлектрическую неоднородность близкую к двумерной. Большие оси диаграмм ориентированы вкrest береговой линии Охотского моря. Предполагается, что на периодах 3000–10000 с и более на поведение диаграмм влияют электрические токи,

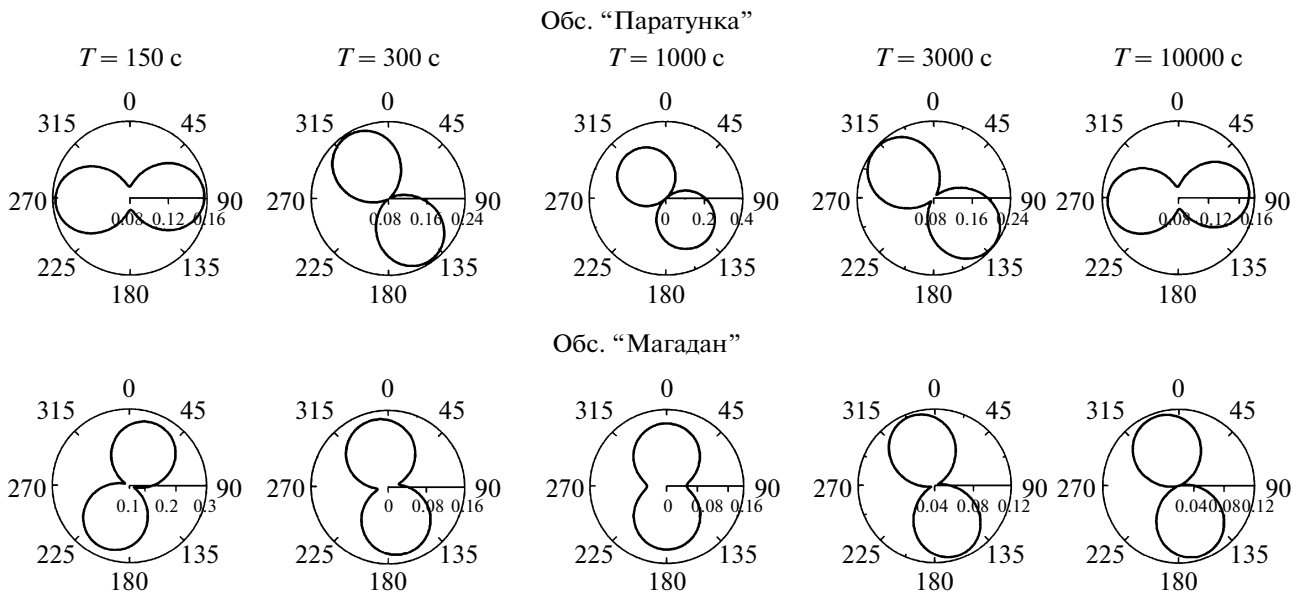


Рис. 4. Полярные диаграммы магнитного параметра W_{zx} в обс. “Паратунка” и “Магадан”. Диаграммы приведены для периодов вариаций 150, 300, 1000, 3000 и 10000 с. Время наблюдений: 01.01.2007–30.06.2007.

концентрирующиеся в глубоководных частях Охотского моря (впадина Дерюгина).

Более наглядное представление о распределении электропроводности среды в районах обсерваторий дают частотные кривые модулей вещественных и мнимых стрелок и их азимутов, изображенных на рис. 5. В обсерватории “Паратунка” модуль вещественной индукционной стрелки достигает максимальных значений на периоде около 6000 с. При этом мнимая индукционная стрелка минимальна, а азимут ее меняется на 180° . Азимут действительной части индукционной стрелки равен 130° . Ее направление определяется индукцией в глубоководном желобе. На этом периоде происходит максимальное насыщение глубоководного желоба электрическим током. В области коротких периодов азимуты вещественной и мнимой стрелок отличаются примерно на 60° , что обусловлено влиянием сложных очертаний береговой линии и другими геоэлектрическими неоднородностями среды. В области длинных периодов возрастает мнимая индукционная стрелка и уменьшается вещественная. При этом угол между ними составляет около 100° . Это свидетельствует о влиянии трехмерной геоэлектрической неоднородности, возможно, вызванной совместным влиянием Курило-Камчатского и Алеутского желобов. Важно отметить, что максимумы мнимой индукционной стрелки отмечаются на периодах 1000–1500 с и 15000–20000 с. Этим максимумам отвечают слабо выраженные минимумы модуля вещественной стрелки. Как будет показано ниже, по данным МТЗ

на указанных периодах проявляются коровый и астеносферный проводящие слои.

Рассмотрим частотные кривые типпера в обсерватории “Магадан” (рис. 5). Максимум вещественной стрелки отмечается на периоде 1000 с. Максимуму отвечает минимум мнимой стрелки, азимут которой меняется почти на 150° . Такое поведение стрелок свидетельствует о береговом эффекте, вызванном концентрацией электрических токов в глубоководной части Охотского моря. В поведении мнимой индукционной стрелки выражены максимумы на периодах 300–400 с и 10000–12000 с. Последнему максимуму отвечает минимум вещественной стрелки. Максимумы мнимых стрелок здесь также связаны с коровым и астеносферным проводящими слоями, выраженными на кривой МТЗ.

Выявленные особенности магнитного типпера хорошо иллюстрируются рис. 1, где изображены вещественные и мнимые индукционные стрелки в одном масштабе в обсерваториях “Магадан” и “Паратунка”. Данный рисунок дает возможность сравнить степень проявления берегового эффекта в обсерваториях. Вещественные индукционные стрелки в обс. “Паратунка” почти в 2 раза больше чем в обс. “Магадан”, что связано с увеличенной интегральной проводимостью толщи морской воды в районе Камчатки. Здесь расположен глубоководный желоб с глубиной морского дна около 7 км. Проводимость толщи морской воды в желобе составляет 28000 Сим, во впадине – Дерюгина – 6000 Сим. Этим можно объяснить повышенную интенсивность суточных вариаций вертикальной

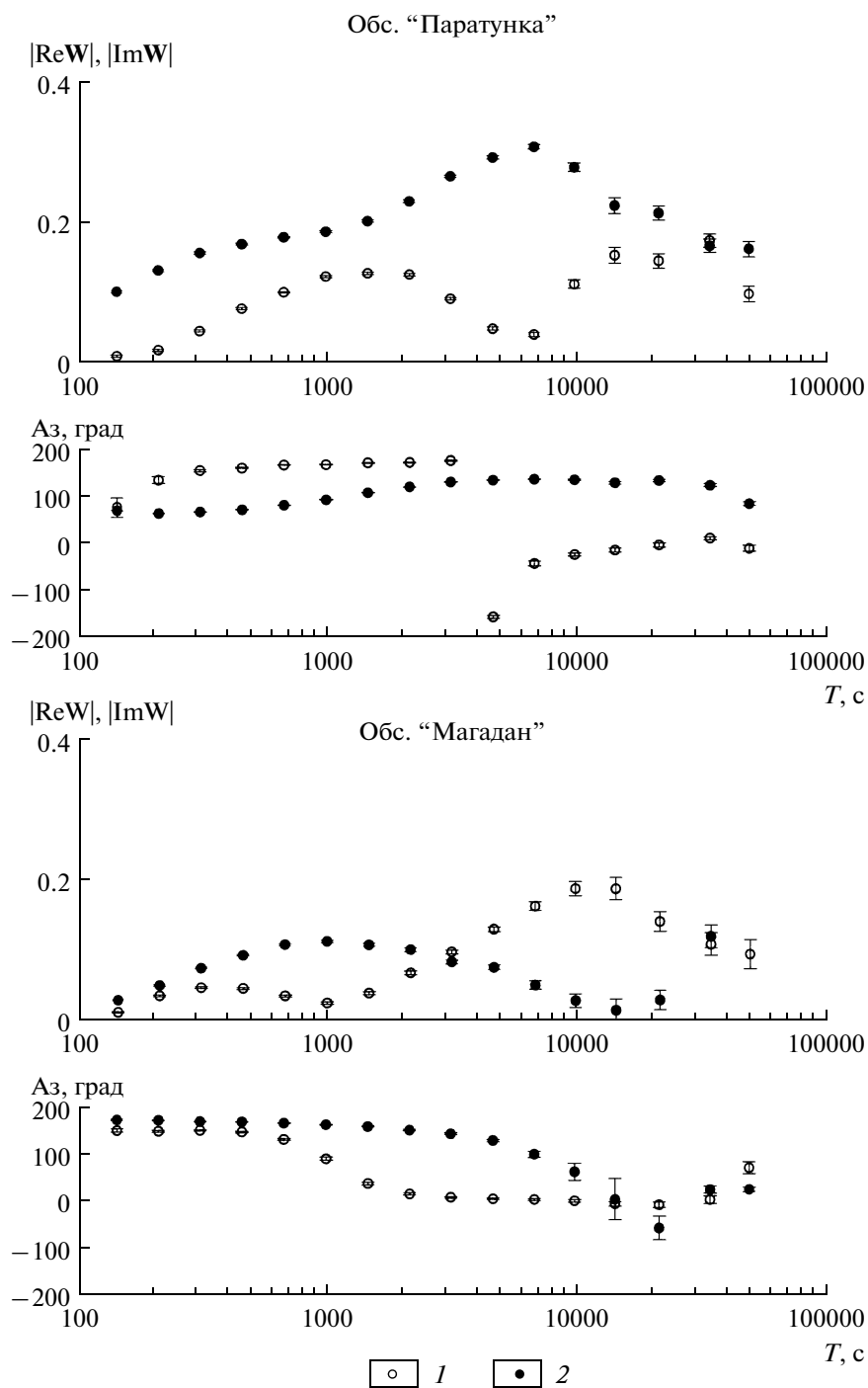


Рис. 5. Частотные характеристики индукционных стрелок: 1 и 2 – вещественные и мнимые индукционные стрелки. Период наблюдений: 01.01.2007–30.06.2007.

компоненты в обсерватории "Паратунка" по сравнению с обсерваторией "Магадан" (рис. 2б). Важно отметить, что величина индукционных стрелок определяется не только контрастом проводимости суши и морской воды, но и глубинной электропроводностью в районе обсерваторий, которую можно изучить с помощью берегового эффекта.

ГЛУБИННАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ В РАЙОНАХ ОБСЕРВАТОРИЙ "МАГАДАН" И "ПАРАТУНКА"

Электрические токи индуцированные в Курило-Камчатском глубоководном желобе и глубоководной части Охотского моря представляют собой электрические источники, вызывающие береговые

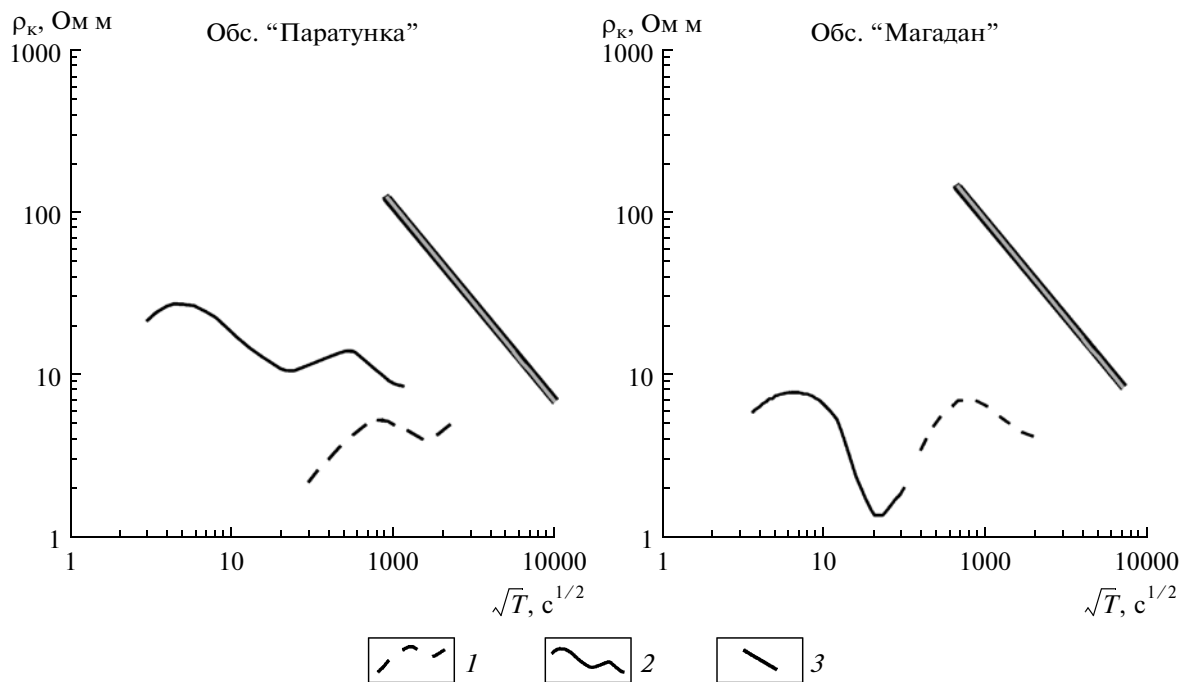


Рис. 6. Кривые МТЗ и МВЗ в обс. “Паратунка” и “Магадан”: 1 – кривые МВЗ по данным берегового эффекта; 2 – кривые МТЗ; 3 – стандартная кривая кажущегося электрического сопротивления.

эффекты в вариациях геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан”. Данные эффекты могут быть использованы для магнитовариационного зондирования [Мардельфельд, 1977]. Для этой цели использованы частотные характеристики модуля компоненты W_{zx} в обсерватории “Паратунка” по направлению на Курило-Камчатский глубоководный желоб и в обсерватории “Магадан” по направлению на впадину Дерюгина. Они трансформированы в кривые кажущегося сопротивления по формуле:

$$\rho_T = \frac{5 \times 10^6 T |W_{zx}|^2}{\sigma^2 h_1^2 \left(\ln \frac{L_0}{y} + 4 \right)^2};$$

где L_0 – величина, характеризующая эффективные размеры ответственной за береговой эффект области с электрическим током,

$$L_0 = 5 \times 10^3 \sqrt{10 \rho T};$$

W_{zx} – модуль компоненты индукционной матрицы по направлению к электрическому источнику; y – расстояние от пункта наблюдения до изобаты – средней глубины между берегом и электрическим источником; h_1 – глубина моря; T – анализируемый период; σ и ρ – проводимость и сопротивление морской воды.

Полученные таким путем кривые кажущегося сопротивления в обсерватории “Паратунка” и “Магадан” приведены на рис. 6. Кривая кажущегося со-

противления в обсерватории “Паратунка” получена была нами ранее. Она опубликована в работе [Мороз и др., 2006]. Кривая кажущегося электрического сопротивления сопоставлена с обобщенной кривой МТЗ района и стандартной кривой. По кривым МВЗ и МТЗ выделяются коровый и астеносферный проводящие слои примерно на глубинах 20 и 100 км.

Обратимся к кривой кажущегося сопротивления, полученной в обсерватории “Магадан”. Она также сопоставлена с кривой МТЗ в данном районе и стандартной кривой. На кривых зондирования проявляется минимум на периодах 500–1500 с и нисходящая ветвь на периодах более 10000 с, которые связываются с коровым и астеносферным проводящими слоями. По данным формальной интерпретации глубина залегания слоев оценивается примерно в 10 и 130 км.

По данным наблюдений вариаций геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан” изучена динамика магнитного типпера в 2007–2008 гг. Анализ показал, что типперы определяются более устойчиво на временном интервале не менее 5 суток. При этом когерентность между вертикальной и горизонтальными составляющими должна быть не менее 0.8. Для получения временных рядов магнитного типпера создана специальная программа, с помощью которой из банка вариаций геомагнитного поля формируются массивы заданной продолжительностью 5 суток. Для каждого массива определены магнитные типперы в диапазоне периодов от 300 до 10000 с. На рис. 7 представлены временные ряды

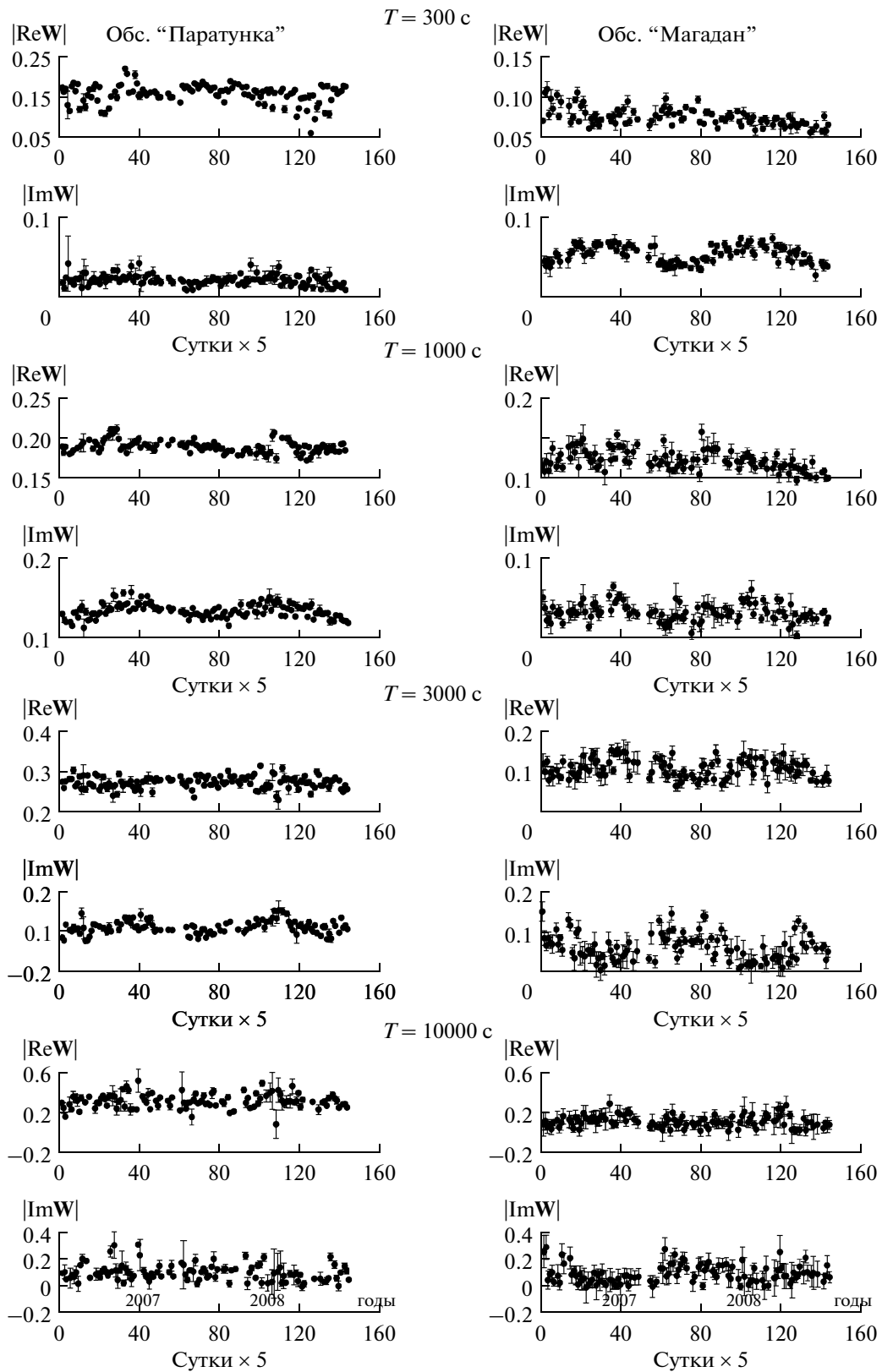


Рис. 7. Временные ряды вещественной и мнимой частей типпера на периодах 300, 1000, 3000 и 10000 с.

вещественных и мнимых частей магнитного тупера на периодах 300, 1000, 3000 и 10000 с. Известно, что вещественные стрелки связаны с активными электрическими токами, а мнимые — с реактивными. Величина мнимых стрелок определяется индукцией в проводящих слоях [Бердичевский, Нгуен Тхань Ван, 1991].

В обсерватории “Паратунка” мнимые стрелки более устойчиво определяются на периоде 1000 с, а в обсерватории “Магадан” — на периоде 300 с. На этих периодах в поведении модулей мнимых стрелок четко выражены годовые вариации. Данные периоды на кривых МТЗ приурочены к минимумам, связываемым с коровыми проводящими слоями. Следовательно, годовые вариации модулей мнимых индукционных стрелок характеризуют вариации электропроводности корового проводящего слоя, в котором концентрируются электрические токи, вызванные индукцией. По-видимому, за счет концентрации токов мы имеем более устойчивые значения и хорошо выраженные годовые вариации мнимых индукционных стрелок на периодах 1000 и 300 с. Следует отметить, что годовые вариации в меньшей мере выражены и на других периодах. Это свидетельствует, что годовым изменениям электропроводности в той или иной степени подвержены различные толщи литосферы. Можно предположить, что годовые изменения электропроводности литосферы могут быть связаны с геодинамическими процессами, имеющими годовую цикличность, вызванную степенью освещенности Земли при ее годовом вращении вокруг Солнца. Данные процессы возможно приводят к изменению ширины и глубины литосферных разломов, степени их насыщенности гидротермальными растворами и уровня их минерализации, что проявляется в вариациях электропроводности литосферы.

АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ТЕНЗОРА

Пульсации и бухтообразные вариации геомагнитного поля в средних и низких широтах допускают аппроксимацию их плоской моделью. В рамках этой модели существует связь между горизонтальными векторами геомагнитного поля в двух точках земной поверхности в виде [Бердичевский, Жданов, 1981; Бердичевский, Дмитриев, 2009]:

$$\mathbf{H}_1 = [\mathbf{m}] \mathbf{H}_2, \text{ где } [\mathbf{m}] = \begin{pmatrix} m_{xx} & m_{xy} \\ m_{yx} & m_{yy} \end{pmatrix}, \text{ где } [\mathbf{m}] \text{ — магнитный}$$

тензор, $m_{xx}, m_{xy}, m_{yx}, m_{yy}$ — комплексные компоненты тензора, зависящие от частоты, распределения проводимости в Земле и ориентации координатных осей.

В нашем случае, для обсерваторий “Паратунка” и “Магадан”, это выражение представим в следующем виде:

$$\mathbf{H}^n = [\mathbf{m}] \mathbf{H}^M, \text{ отсюда } H_x^n = m_{xx} H_x^M + m_{xy} H_y^M,$$

$$H_y^n = m_{yx} H_x^M + m_{yy} H_y^M,$$

где H_x^n , H_y^n и H_x^M , H_y^M — горизонтальные составляющие геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан”.

Как мы уже отмечали, расстояние между обсерваториями почти 900 км. Поэтому возникает вопрос об устойчивости связи между векторами геомагнитного поля на таком расстоянии. Приближенные оценки свидетельствуют, что на периодах вариаций более 300 с длина электромагнитной волны превышает расстояние между пунктами наблюдений. Можно полагать, что связь между векторами геомагнитного поля будет устойчивой в диапазоне периодов 300–10000 с. В пользу этого свидетельствует высокая когерентность (более 0.8) между вариациями геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан”.

Для определения компонент магнитного тензора использована программа, алгоритм которой основан на известной робастной методике, разработанной Дж. Ларсеном [Larsen et al., 1996; Larsen, 1997]. Данная программа позволяет вычислять передаточные функции по электромагнитным полям, содержащим поля различного происхождения и дает возможность не только определять передаточные функции, но и эффективно подавлять помехи.

На первом этапе выполнена обработка трехмесячной непрерывной синхронной регистрации компонент H и D с дискретностью 1 с в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан”. В результате обработки получены частотные кривые компонент магнитного тензора и магнитные полярные диаграммы, характеризующие основные особенности магнитного тензора. На рис. 8 видно, что компоненты магнитного тензора меняются в зависимости от периода вариаций. Это обусловлено изменением электропроводности геоэлектрических сред с глубиной в районах обсерватории “Паратунка” и “Магадан”. В большей мере изменение выражено в поведении компоненты m_{xx} , на графике которой выражены максимумы на периодах 400–500 с и на периоде 35000 с. На кривых МТЗ на данных периодах проявляются литосферный и астеносферный проводящие слои.

Обратимся к магнитным полярным диаграммам, приведенным на рис. 9 для периодов 1000, 3000, 6000 и 10000 с. Диаграммы основных магнитных компонент имеют вид овала, а дополнительных — вид восьмерки. Это свидетельствует о том, что передаточная функция между горизонтальными векторами в обсерватории “Паратунка” и “Магадан” имеет трехмерный характер, связанный, по-видимому, с характером распределения электропроводности. Следует отметить, что с увеличением периода вариаций отношение площади, описываемой восьмеркой и овалом, уменьшается, что отражает ослабление

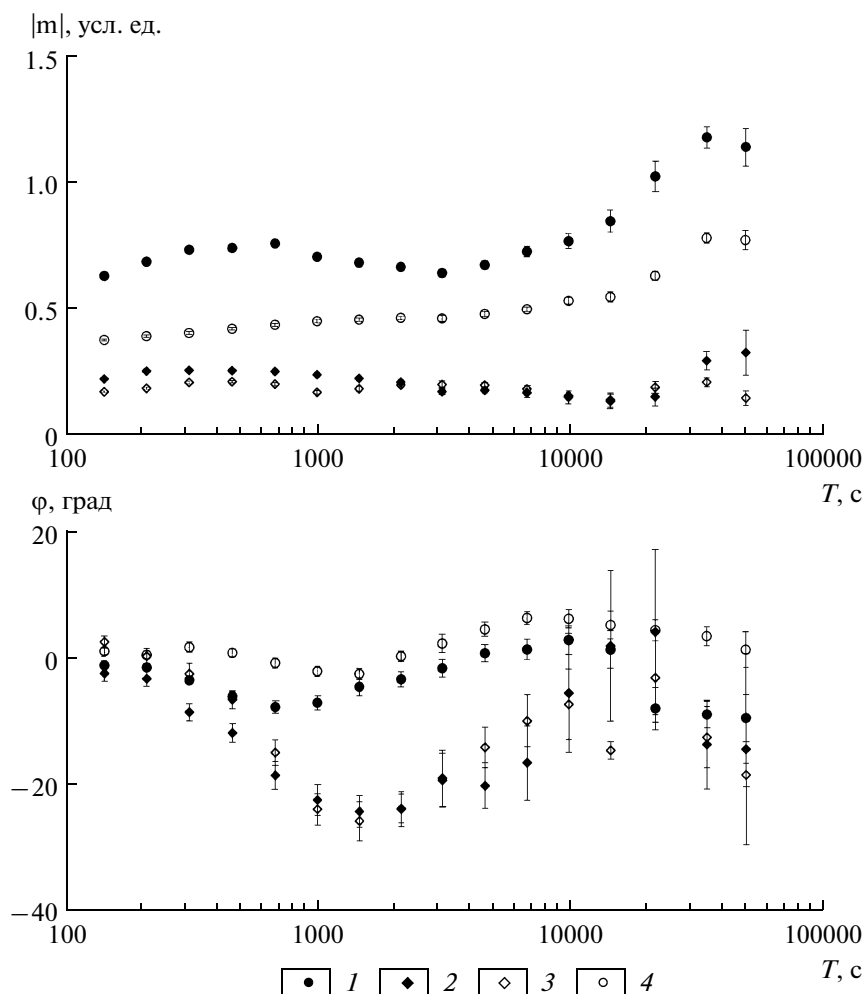


Рис. 8. Частотные кривые модулей и фаз компонент магнитного тензора: 1, 2, 3 и 4 — m_{xx} , m_{xy} , m_{yx} и m_{yy} соответственно.

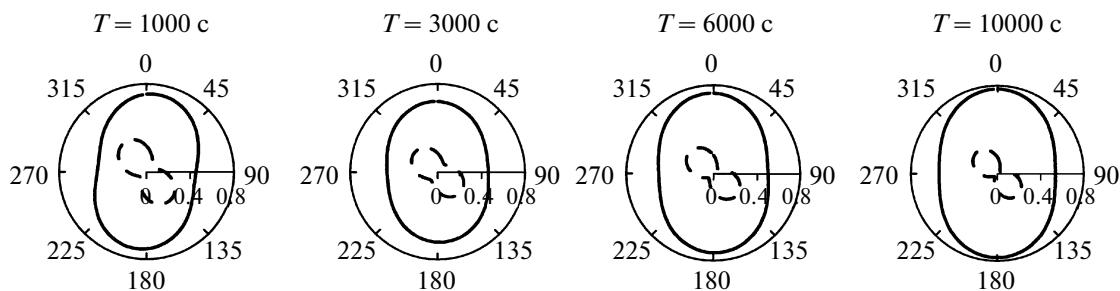


Рис. 9. Магнитные полярные диаграммы. Сплошными линиями изображена диаграмма $m_{xx}(\alpha)$, пунктирными $m_{xy}(\alpha)$. Цифрами над диаграммами обозначены периоды вариаций в секундах. Оси x и y направлены на север и восток соответственно.

трехмерного характера связи между векторами геомагнитного поля в пунктах наблюдений.

Рассмотрим результаты мониторинга магнитного тензора. Анализ показал, что компоненты магнитного тензора в диапазоне периодов от 100 до 3000 с определяются более устойчиво на временном

интервале равным 5 суткам. С помощью специальной программы двухлетний интервал синхронных регистраций вариаций геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан” был разбит на интервалы по 5 суток. На каждом интервале определены модули и фазы компонент магнитного тензора. Графики этих параметров на периодах 300, 1000 и

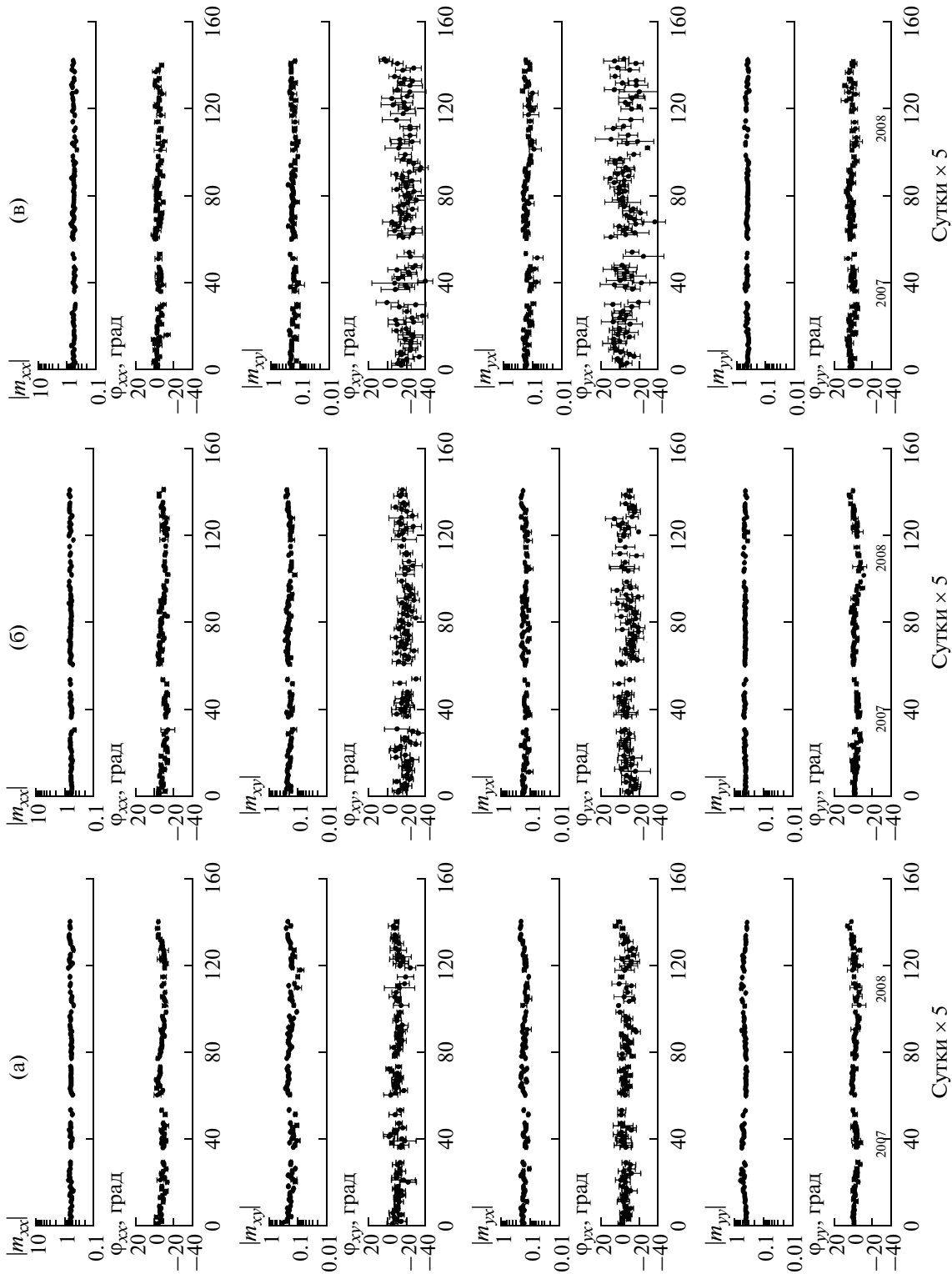


Рис. 10. Временные ряды модулей и фаз компонент магнитного тензора на периодах 300 с (а), 1000 с (б) и 3000 с (в).

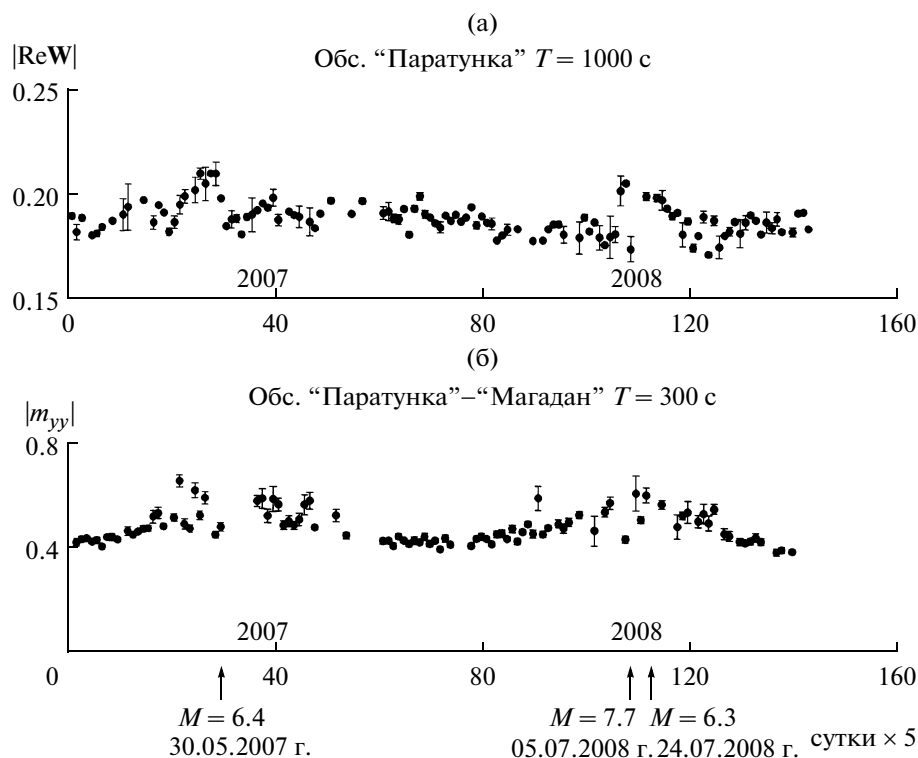


Рис. 11. Временные ряды модуля вещественной индукционной стрелки (а) и компоненты магнитного тензора (б) на периодах 1000 с и 300 с. На временной оси показаны моменты землетрясений, магнитуды и даты. Местоположение землетрясений изображено на рис. 1.

3000 с приведены на рис. 10. Графики основных компонент и их фаз имеют дисперсию меньше, чем дополнительные компоненты и их фазы. Характерно, что в поведении компонент магнитного тензора выражены годовые вариации, которые по амплитуде на многих графиках превышают в несколько раз дисперсию. В лучшей мере годовые вариации проявились в поведении фаз основных компонент на периодах 300 и 1000 с. Также они выражены в отдельных случаях на графиках дополнительных компонент и их фаз. Это свидетельствует, что годовые вариации в значительной мере связаны с изменением глубинной электропроводности сред в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан”.

АНОМАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОГО ТИППЕРА И ТЕНЗОРА И ИХ ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ С СИЛЬНЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

Временные ряды компонент магнитного типпера и тензора сопоставлены с моментами сильных землетрясений с $K \geq 6.3$, произошедших в районах Камчатки и Магадана в 2007–2008 гг. Таких землетрясений три (рис. 1). Самое сильное землетрясение с $M = 7.7$ произошло 05.07.2008 г. в Охотском море. Эпицентр его располагался в 420 км от обсерватории “Паратунка” и в 1060 км от обсерватории “Магадан”.

Гипоцентр находится на глубине 594 км. Два других землетрясения с $M = 6.4$ и $M = 6.3$ произошли в районе южной Камчатки 30.05.2007 г. и 24.07.2008 г. Эпицентры этих землетрясений расположены на расстоянии 90 и 235 км от обсерватории “Паратунка”, гипоцентры — на глубинах 128 и 36 км. Аномальные изменения параметров, которые можно связать с сильными землетрясениями, наиболее заметно проявились в поведении модуля вещественной индукционной стрелки на периоде 1000 с и компоненты m_{yy} магнитного тензора на периоде 300 с. На рис. 1. приведены временные ряды данных параметров на указанных периодах. На временной оси показаны моменты сильных землетрясений. В поведении временного ряда модуля вещественной стрелки отмечаются “скачкообразные” изменения, предвещающие землетрясения. Так, перед землетрясениями с $M = 7.7$ и $M = 6.4$ отмечаются “скачки” параметра $|\text{Re}W|$ превышающие дисперсию. Изменение параметра $|\text{Re}W|$ перед землетрясением с $M = 6.4$ (30.05.2007 г.) превышает дисперсию лишь в 1.5–2 раза. Изменения произошли за 10–15 суток до землетрясений. Обратимся к временному ряду m_{yy} . В его поведении отмечается увеличение дисперсии, которое можно связать с сильными землетрясениями.

Какова возможная природа аномалий магнитовариационных параметров? Параметр $|\text{Re}W|$ харак-

теризует геоэлектрическую неоднородность среды. Можно предположить, что геоэлектрическая среда испытывает резкие изменения при геодинамических процессах, предвещающих сильные землетрясения. Наряду с этим возможно нарушение связи горизонтальных векторов геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” и “Магадан”, что выражено увеличением дисперсии параметра m_{yy} .

ВЫВОДЫ

По данным наблюдений вариаций геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” (Камчатка) и “Магадан” изучены магнитный типпер и магнитный тензор в диапазоне периодов от первых минут до первых часов. Выявлены следующие особенности в поведении передаточных магнитовариационных функций.

1. В обсерваториях “Паратунка” и “Магадан” в магнитных типперах проявляются береговые эффекты, которые в вещественных индукционных стрелках максимально выражены на периодах 6000 и 1000 с соответственно. Максимальное действие береговых эффектов определяется концентрацией активных электрических токов в Курило-Камчатском желобе и в глубоководной части Охотского моря. Мнимые индукционные стрелки, связанные с реактивными электрическими токами, имеют максимумы на периодах 300–400 с (обс. “Магадан”) и 1000–2000 с (обс. “Паратунка”). Эти максимумы обусловлены индукцией электрических токов в коровых проводящих слоях.

2. В районах обсерваторий “Паратунка” и “Магадан” по данным берегового эффекта и МТЗ изучен глубинный геоэлектрический разрез. Установлено, что земная кора и верхняя мантия содержат слои повышенной электропроводности, которые проявляются на периодах 200–1000 с и 10000–100000 с. По грубым оценкам в районе обс. “Паратунка” коровый проводящий слой располагается на глубине 20 км, астеносферный – 100 км, в районе обс. “Магадан” – на глубинах 10 и 130 км соответственно.

3. По данным мониторинга магнитного типпера и тензора на периодах 300–3000 с выявлены годовые вариации. В магнитном типпере они в лучшей мере выражены в поведении мнимой индукционной стрелки на периоде 300 с (обс. “Магадан”) и на периоде 1000 с (обс. “Паратунка”). В магнитном тензоре годовые вариации в большей мере проявились в поведении фаз основных компонент на периодах 300 и 1000 с. В МТЗ на этих периодах проявились проводящие слои. Есть основание полагать, что годовые вариации магнитного типпера и магнитного тензора

связаны с электропроводностью литосферы, содержащей коровый проводящий слой. Годовые вариации электропроводности литосферы могут быть вызваны обращением Земли вокруг Солнца, в результате которой проявляется годовая цикличность в изменении трещиноватости литосферы, степени насыщенности гидротермальными растворами и степени их минерализации.

4. Во временных рядах магнитного типпера и тензора в 2007–2008 гг. проявились аномальные изменения, которые могут быть связаны с сильными землетрясениями с $K \geq 6.3$. В поведении типпера они выражены в виде скачкообразных изменений величины вещественной индукционной стрелки за 10–15 суток до землетрясений. Это изменение превышает дисперсию в 1.5–2 раза. В поведении магнитного тензора выражено заметное увеличение дисперсии в компоненте m_{yy} на периоде 300 с, которое может быть связано с землетрясениями. Природу аномалий магнитного типпера и тензора можно объяснить изменением геоэлектрической неоднородности среды, вызванной различным проявлением трещиноватости горных пород и степенью насыщенности их минерализованными водами вследствие геодинамических процессов, предвещающих сильные землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердичевский М.Н., Жданов М.С.* Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра. 1981. 207 с.
- Бердичевский М.Н., Нгуен Тхань Ван.* Магнитовариационный вектор // Физика Земли. 1991. № 3. С. 52–62.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Голубцов Н.С., Мерцикова Н.А., Пушкарев П.Ю.* Магнитовариационное зондирование: Новые возможности // Физика Земли. 2003. № 9. С. 3–30.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И.* Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир. 2009. с. 677.
- Мардерфельд Б.Е.* Береговой эффект в геомагнитных вариациях. М.: Наука. 1977. 80 с.
- Мороз Ю.Ф., Смирнов С.Э., Мороз Т.А.* Результаты мониторинга вариаций геомагнитного поля на Камчатке // Физика Земли. 2006. № 3. С. 49–56.
- 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.
- Larsen I.C.* Noise reduction in electromagnetic time series to improve detection of seismic-induced signals // Journal of Geomagnetism and Geoelectricity. 1997. V. 49. P. 1257–1265.
- Schmucker U.* Anomalies of geomagnetic variations in the South western United States. University of California Press, Berkeley-London. 1970. 165 с.