

УДК 550.837.2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ В ИЗУЧЕНИИ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Ю. Ф. Мороз¹, Т. А. Мороз¹, В. П. Назарец², С. А. Нечаев³, С. Э. Смирнов²

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН*

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

³*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г.Иркутск*

Аннотация. Рассмотрены методика и результаты изучения динамики электропроводности геологической среды с помощью теллурического тензора и вектора индукции, а также основные особенности в структуре геомагнитного поля Земли на Камчатке и в Байкальской рифтовой зоне. Приводится сравнительный анализ поведения составляющих геомагнитного поля в сейсмоактивных регионах. В результате применения новых методических подходов и технологий выявлены аномальные эффекты в изменении электропроводности литосферы и в структуре геомагнитного поля, которые могут быть связаны с сильными землетрясениями. Обсуждается возможная природа выявленных аномальных эффектов.

ELECTROMAGNETIC FIELD IN STUDIES OF GEODYNAMIC PROCESSES

Y. F. Moroz¹, T. A. Moroz¹, V. P. Nazareth², S. A. Nechaev³, S. E. Smirnov²

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch, Russian Academy of Sciences*

²*Institute of Space Physics and Radio Wave Propagation Research, Far East Division,
Academy of Sciences, village of Paratunka*

³*Institute of Solar and Earth Physics, Academy of Sciences, Irkutsk*

Annotation. Methods and results of geological structure's electrical conductance studies with the help of telluric tensor and induction vector and the main characteristics in the structure of Earth's geomagnetic field and Baikal rift zone were analyzed. Comparitive analysis of geomagnetic field component's behaviour in the regions of seismic activity is given. As a result of using new methods and technologies there were anomalous effects in the changes of lithosphere's electrical conductivity and structure of geomagnetic field found out, they can be referred to strong earthquakes. Nature of these anomalies is discussed.

Введение

В проблеме прогноза землетрясений большое место принадлежит электромагнитным методам, основанным на изучении естественного электромагнитного поля Земли, которое может быть связано как с внешним, так и с внутренним источниками. Внешним источником являются электрические процессы, протекающие в ионосфере и магнитосфере. За счет индукции в Земле возникает магнитотеллурическое (МТ) поле различной частоты и интенсивности. Наблюдая его на земной поверхности, можно

контролировать изменение электропроводности среды во времени. Это направление используется для прогноза землетрясений в ряде зарубежных стран и в России.

Более простым и трудоемким является изучение разности потенциалов теллурического поля. Это направление используется в Греции, Китае, США и других странах [21,24,26]. На Камчатке также проводились подобные исследования [10,16]. В ряде случаев обнаружены аномалии в поведении теллурических потенциалов, которые могут являться предвестниками землетрясений. Основная трудность при этом связана с выделением аномалий, обусловленных внутренними источниками, к которым следует отнести электрокинетические, электрохимические и другие процессы. Отдельные из них могут быть связаны с подготовкой землетрясений и представляют основной интерес для их прогноза.

Таким образом, при изучении геодинамических процессов с помощью электромагнитного поля Земли существует два подхода: выявление аномальных изменений в поведении электрических свойств горных пород и в структуре вариаций электрического и магнитного полей.

В настоящей статье основное внимание уделено изучению поведения электропроводности земной коры на Камчатке с помощью теллурического тензора и индукционного вектора. Кроме этого приводится сравнительный анализ структуры геомагнитных вариаций для сейсмоактивных районов Камчатки и Байкальской рифтовой зоны.

Методика наблюдений

В основу исследований положены данные электромагнитного мониторинга. На Камчатке в начале 90-х годов XXI века организована сеть наблюдений земных электрических токов на Петропавловском геодинамическом полигоне на побережье Авачинского залива, где по долгосрочному прогнозу ожидается катастрофическое землетрясение ($M \geq 8.5$), опасное для г.Петропавловск-Камчатского. По данным площадных электроразведочных исследований методом МТЗ выбраны пункты с резко выраженной геоэлектрической неоднородностью разреза. На этих пунктах более детально изучен геоэлектрический разрез и определен характер геоэлектрической неоднородности среды. По направлениям С-Ю и В-З, а также по направлениям осей геоэлектрической неоднородности среды расположены приемные линии для регистрации теллурических токов. Длина их выбрана различной для регистрации сигналов от внутриземных и ионосферных источников электромагнитного поля. Эта длина определяется входным импедансом среды на различных частотах и интенсивностью магнитного поля [6].

По данной методике заложены и функционируют 3 пункта на Восточной Камчатке в районе г.Петропавловск-Камчатского (рис. 1), 4-ый пункт на мысе Шипунский заложен в прошлые годы. На нем также обновлена система измерительных линий. Расстояние между пунктами от первых десятков км до 150 км. В качестве заземлений использованы свинцовые электроды, опущенные на глубину около 2-2,5 м. Измерения разности потенциалов электротеллурического поля производятся с помощью радиотелеметрической системы [9]. Каждый канал опрашивается один раз в минуту На п.Шипунский – один раз в 20 с. Эксплуатация автоматизированных пунктов наблюдений земных электрических токов и предварительная обработка данных осуществляется Камчатской опытно-методической сейсмологической партией Геофизической службы РАН.

Наряду с наблюдениями земных электрических токов в п.Паратунка Институтом космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН осуществляется мониторинг вариаций геомагнитного поля в виде составляющих H,D,Z, которые регистрируются с помощью магнитовариационных станций. Подобные наблюдения вариаций геомагнитного поля осуществляются также в районе оз.Байкал, в обсерватории «Патроны».

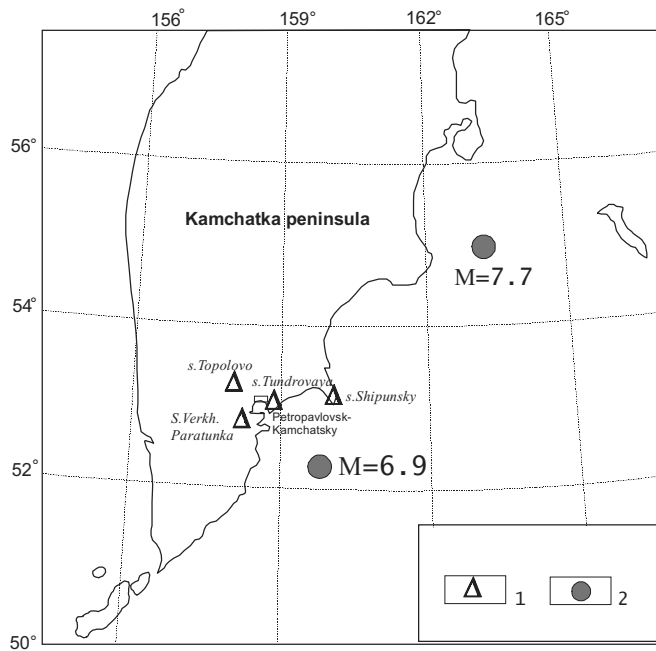


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений электротеллурических токов и эпицентров сильных землетрясений с $M \geq 6.9$ за период с 01.07.97 г. по 31.10.99 г.

1- пункты наблюдений электротеллурических токов; 2 – эпицентры землетрясений и их магнитуда.

Рис. 1. Scheme of electric telluric observation stations' location and epicentres of the strong earthquakes with $M \geq 6.9$ at the period from 01.07.97 to 31.10.99.

1- electric telluric observation stations, 2- epicentres of the strong earthquakes and their magnitude.

Методика обработки и анализ поведения теллурического тензора

Пульсации и бухтообразные вариации электротеллурического поля в средних и низких широтах допускают аппроксимацию их плоской волной. В рамках этой модели существует связь между горизонтальными векторами электрического поля в двух точках земной поверхности в виде [2]:

$$\vec{E}_1 = \hat{t} \vec{E}_2, \text{ где } \hat{t} = \begin{vmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{vmatrix} \quad (1)$$

где \hat{t} - теллурический тензор, t_{xx} , t_{xy} , t_{yx} , t_{yy} – комплексные компоненты тензора, зависящие от частоты, распределения проводимости в Земле и ориентации координатных осей.

Для изучения теллурического тензора использованы данные на пунктах Верхняя Паратунка и Тундровый, где временные ряды электротеллурических токов не имеют длительных перерывов с 01.01.1997 г. по 31.10.1999 г. На этих пунктах для обработки приняты временные ряды разности потенциалов электротеллурического поля по каналам, ориентированным в направлениях С-Ю и В-З. Длина каналов на п.Верхняя Паратунка 70 и 100 м, на п. Тундровый 97 и 105 м, соответственно. Для определения компонент теллурического тензора использована программа, алгоритм которой основан на известной робастной методике, разработанной Дж. Ларсеном [22]. Данная методика спектральной обработки создана специально для вычисления передаточных функций по электромагнитным полям, содержащим поля различного происхождения и позволяет не только определять передаточные функции, но и эффективно подавлять помехи. Исходные данные для обработки представляют собой числовые массивы по 21100 значений напряженности электротеллурического поля с минутным интервалом для каждого канала. Общее количество таких массивов для каждого канала 58. Компоненты теллурического тензора получены в результате решения системы линейных уравнений методом наименьших квадратов:

$$E_X^r = E_X^i t_{XX} + E_Y^i t_{XY} \quad (2)$$

$$E_Y^r = E_X^i t_{YX} + E_Y^i t_{YY} \quad (3)$$

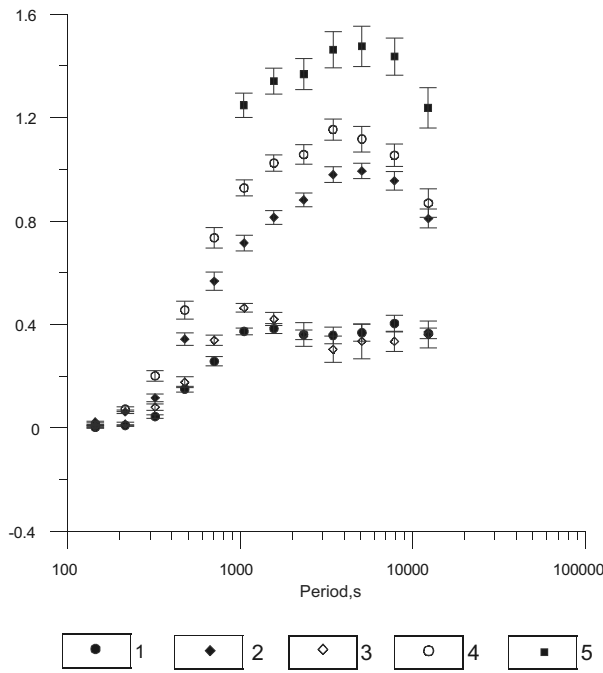


Рис. 2. Частотные кривые компонент теллурического тензора.

1, 2, 3, 4, 5 – компоненты теллурической матрицы t_{xx} , t_{xy} , t_{yx} , t_{yy} , t_{max} , соответственно. t_{max} – компонента t_{yy} в направлении под азимутом 150° .

Рис. 2. Frequency graphs of components of telluric tensor.

1, 2, 3, 4, 5 – components of telluric matrix t_{xx} , t_{xy} , t_{yx} , t_{yy} , t_{max} , so as t_{max} is a component of t_{yy} in the direction with azimuth of 150° .

Определим какую из компонент теллурического тензора лучше использовать для мониторинга. В этой связи рассмотрены полярные диаграммы теллурической матрицы, которые свидетельствуют, что максимальные значения теллурического параметра отмечаются в направлении под азимутом 150° , т.е. вкрест простирания сейсмофокальной зоны. Более наглядное представление о зависимости компонент теллурического тензора от частоты дает рис. 2. На нем видно, что значения t_{max} почти на 30% превышают t_{yy} .

Опыт изучения данных магнитотеллурического мониторинга свидетельствует, что максимальные значения МТ-параметров определяются более устойчиво во времени [5,11]. Поэтому, для дальнейшего изучения принят теллурический параметр t_{max} под азимутом 150° . Мы уже отмечали, что компоненты теллурического тензора зависят от направления, частоты и распределения электропроводности среды в пунктах наблюдений. Если закрепим частоту и направление в 150° , то теллурический параметр t_{max} даст возможность контролировать относительное изменение электропроводности между п.Верхняя Паратунка и п.Тундровый. Обратимся к результатам мониторинга.

Поведение параметра t_{max} изучено на периодах 3460 с, 5080 с, 7400 с. Результаты показали, что данный параметр определяется более устойчиво на периоде 3460 с, т.е. близко к часу. Данные магнитотеллурического мониторинга, выполненного нами ранее, также свидетельствуют об устойчивости компонент тензора импеданса на периодах близких к часу [5,11]. График параметра t_{max} на периоде 3460 с приведен на рис. 3. Значения параметра меняются от 0.7 до 1.6. Ошибка их определения составляет в большинстве случаев первые проценты. Только в отдельных случаях она вырастает

где E_x^P, E_y^P и E_x^T, E_y^T – составляющие электрического поля на пунктах Верхняя Паратунка и Тундровый.

$t_{xx}, t_{xy}, t_{yx}, t_{yy}$ – комплексные компоненты теллурического тензора, зависящие от частоты, ориентации координатных осей и распределении удельных электрических сопротивлений на пунктах Паратунка и Тундровый.

По данным обработки получены значения компонент теллурической матрицы по направлениям, азимут которых меняется через 10° в интервале от 0 до 360° . По этим значениям построены теллурические полярные диаграммы, характеризующие основные особенности передаточной функции, включая ее максимальные значения. Важным параметром, характеризующим точность определения компонент теллурического тензора, является когерентность между электрическими полями в пп. Верхняя Паратунка и Тундровый. Анализ показывает, что когерентность между этими полями более 0.8 для вариаций с периодом более 2000 с. Поэтому, для теллурического мониторинга в большей степени подходят вариации с периодом более 2000 с, для которых отмечается более высокая когерентность полей и более высокий уровень интенсивности вариаций электротеллурического поля.

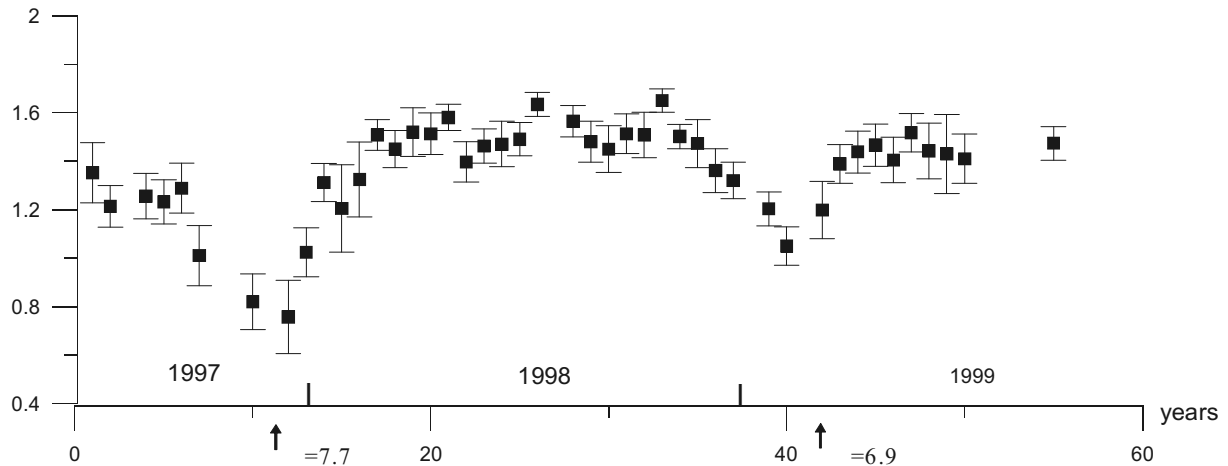


Рис. 3. График теллурического параметра t_{max} на периоде 3460 с.

t_{max} — компонента t_{yy} в направлении под азимутом 150° . Значения t_{max} получены для временного окна — 15 суток. На временной оси показаны моменты сильных землетрясений $M=7.7$ (05.12.1997 г.) и $M=6.9$ (08.03.1999 г.). Период наблюдений: 01.07.1997 г. — 31.10.1999 г.

Fig. 3. Picture of telluric parameter t_{max} at the period of 3460 s.

t_{max} is a component of t_{yy} in the direction with azimuth of 150° . Values for t_{max} are given for the time interval of 15x24 hours. On the time axis there are moments of the strong earthquakes $M=7.7$ (05.12.1997) and $M=6.9$ (08.03.1999). The observation period is 01.07.1997 — 31.10.1999.

до 10-15%. В поведении графика выражены два минимума. Первый из них характеризует отклонение теллурического параметра более чем на 50% от среднего уровня, второй — на 30%. Это превышает среднеквадратичное отклонение в несколько раз. Можно полагать, что данные аномалии в поведении параметра t_{max} представляют надежный результат.

За период наблюдений электротеллурических токов с 01.07.1997 по 31.10.1999 гг. в районе Камчатки произошло два наиболее сильных землетрясения с $M=7.7$ (05.12.1997 г.) и $M=6.9$ (08.03.1999 г.). Расположение эпицентров этих землетрясений приведено на рис.1. Моменты их показаны на временной оси графика t_{max} (рис. 3). На рисунке видно, что к моментам землетрясений приурочены минимумы на графике теллурического параметра. Его уменьшение начинается примерно за 1,5 месяца до землетрясения. После землетрясения уровень значений t_{max} восстанавливается приблизительно за такое же время. Данное изменение теллурического параметра во времени можно рассматривать как возможный предвестник сильных землетрясений.

Рассмотрим какую относительную информацию об электропроводности несет теллурический параметр t_{max} . Обратимся к обобщенным кривым глубинного магнитотеллурического зондирования Камчатки [4]. Они свидетельствуют, что вариации с периодом 3460 с, приурочены к нисходящей ветви, связываемой с кровлей астеносферного проводящего слоя на глубине около 100 км. Поэтому, можно предполагать, что с помощью теллурического параметра мы контролируем относительное положение кровли проводящей астеносферы. Однако это не так.

Данный вопрос рассмотрен подробнее с помощью индивидуальных кривых МТЗ на пунктах Верхняя Паратунка и Тундровый. Кривые кажущихся сопротивлений получены по данным непрерывной трехмесячной записи электротеллурического поля и геомагнитных вариаций. Обработка выполнена с помощью программы Дж. Ларсена [22]. Кривые кажущихся сопротивлений в меридиональном направлении g_{xy} , также как и в широтном g_{yx} , подобны между собой в диапазоне периодов 2000-7000 с. При этом меридиональная кривая МТЗ на пункте Тундровый занимает более высокий уровень по сопротивлению относительно меридиональной кривой на п.Верхняя Паратунка. В то же время широтные кривые МТЗ в указанных пунктах практически совпадают. Расхождение меридиональных кривых свидетельствует о геоэлектрической неоднородности среды в пунктах наблюдений электротеллурического поля. Геоэлек-

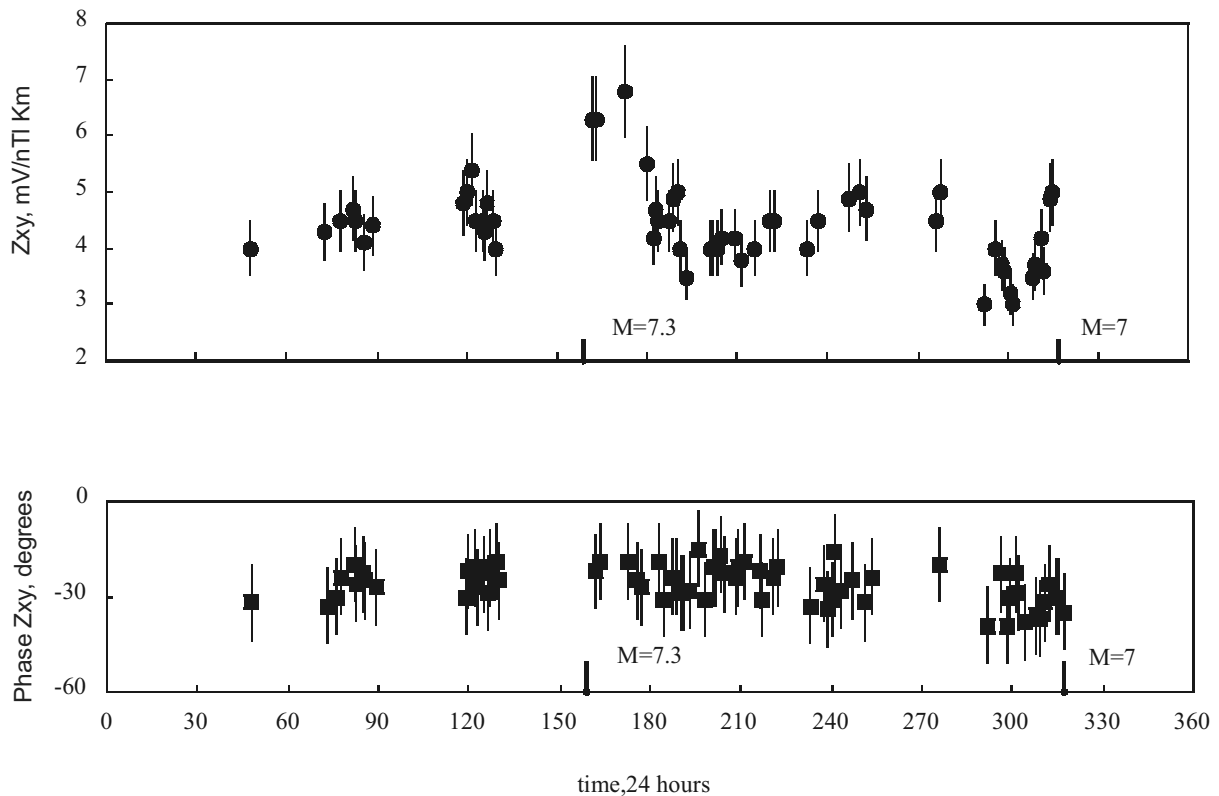


Рис.4. Временные ряды модуля (а) и фазы (б) импеданса на периоде 2500 с.

Период наблюдений с 17 февраля по 14 ноября 1993 г. На временной оси указаны моменты сильных землетрясений и их магнитуды.

Fig. 4. Time series of module (a) and phases (b) of impedance at the period of 2500s.

The observation period is February 17 – November 14 1993. On the time axis the moments of the strong earthquakes and their magnitude are indicated.

трическая неоднородность среды изучена с помощью полярных диаграмм импедансов. Анализ показывает, что на п.Тундровый диаграммы основного импеданса имеют овальную форму, дополнительного импеданса имеют вид четырехлепестковой розы. Это свидетельствует о двумерности геоэлектрического разреза на низких частотах. Соотношение большой и малой осей диаграмм основного импеданса на периоде близким к часу (3160 с) равно 3, что характеризует сильную неоднородность среды. На п. Верхняя Паратунка поведение полярных диаграмм импеданса имеет более сложный вид. Однако, оно также указывает на квазидвумерный характер геоэлектрического разреза. Степень геоэлектрической неоднородности среды здесь выражена сильнее. Отношение большой и малой осей диаграмм основного импеданса на таком же периоде здесь достигает почти 20. Следует отметить общее свойство полярных диаграмм основного импеданса на обоих пунктах, которое выражено в ориентации их больших осей вкрест простирания Камчатки, что связано с «береговым эффектом». Эта особенность в поведении полярных диаграмм основного импеданса была установлена нами ранее и подтверждена численным моделированием [7].

Анализ кривых МТЗ, ориентированных по главным направлениям тензора импеданса, отвечающим простиранию и вкрест простирания Камчатки, свидетельствует, что кривые МТЗ подвержены влиянию геоэлектрических неоднородностей. Так как горизонтальное магнитное поле слабо реагирует на геоэлектрические неоднородности, то основная информация о них содержится в электрическом поле. Следовательно, теллурический тензор несет информацию об относительных изменениях геоэлектрических неоднородностей в пп.Верхняя Паратунка и Тундровый. Они могут быть региональными и локальными.

Региональная неоднородность выражена резким изменением электропроводности верхней части разреза при переходе от материка к Тихому океану. Локальные геоэлектрические неоднородности могут быть связаны с тектоническими нарушениями, интрузивными и эффузивными телами различной формы, блоками пород, наличием жидких флюидов и т.д. На п.Верхняя Паратунка сильное сжатие полярной диаграммы основного импеданса и форма дополнительного импеданса, подтверждают наличие здесь разлома. Также, по данным признакам не исключается существование тектонического нарушения на п.Тундровый. Наряду с этим, на указанных пунктах, имеют место и другие локальные геоэлектрические неоднородности, природу которых, по-видимому, можно выявить только при специальных детальных исследованиях.

Рассмотрим возможную природу аномальных изменений t_{max} в связи с землетрясениями. Анализ показал, что выявленные аномалии t_{max} не связаны с влиянием метеопараметров. Приуроченность минимумов теллурического параметра к моментам сильных землетрясений свидетельствует о возможной их связи с динамическими процессами в земной коре, предвещающими и сопровождающими сильные землетрясения. Существуют представления, что эти процессы при сильных землетрясениях происходят в значительных по объему блоках литосферы, составляющих сотни км [14]. При тектонических напряжениях возможны деформации геологической среды, изменение пористости горных пород, минерализации растворов, насыщающих породы и т.д. Эти явления будут выражены различным образом в пунктах Верхняя Паратунка и Тундровый, отличающихся геологическим строением. Они могут привести к появлению или изменению геоэлектрических неоднородностей в указанных пунктах. Это проявится в электротеллурическом поле в виде различных эффектов (гальванический, обтекания, концентрации), выраженных в аномальном изменении теллурического параметра. В пользу этого свидетельствуют результаты магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивного района Камчатки, приводимые на рис. 4 [11]. Здесь аномальные эффекты, связанные с сильными землетрясениями, выражены в поведении модуля импеданса в виде максимума и минимума. Аномалии импеданса связываются с гальваническим эффектом за счет влияния приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Доказательством этого является поведение фазовых характеристик импедансов, которые практически не меняются при возмущении модулей импедансов. По-видимому, подобную природу имеют эффекты и в поведении параметра t_{max} . Предположения о преобладающем влиянии локальных геоэлектрических неоднородностей на поведение теллурических токов основаны на большом объеме экспериментальных и модельных исследований электротеллурического поля Камчатки [4,7].

Возникает вопрос, почему аномальные изменения t_{max} проявились в виде минимума? По-видимому, это частный случай. Мы уже отмечали, что t_{max} отражает относительное изменение геоэлектрических параметров в пунктах наблюдений. При этом большую роль играют локальные геоэлектрические неоднородности в пп.Верхняя Паратунка и Тундровый. Следует иметь в виду, что при геодинамических процессах могут возникнуть как новые геоэлектрические неоднородности, так и измениться существующие. Влияние этих неоднородностей может привести к уменьшению или увеличению t_{max} при геодинамических процессах, происходящих при подготовке удаленного сильного землетрясения. Возможны различные влияния локальных геоэлектрических неоднородностей, приводящие к уменьшению или увеличению t_{max} . Например, различный характер изменения геоэлектрических параметров в пп.Верхняя Паратунка и Тундровый и т.д. Также существует вероятность, что параметр t_{max} может не измениться при геодинамических процессах. Например, при одинаковом изменении геоэлектрической среды в пп.Верхняя Паратунка и Тундровый. Однако, такая вероятность является крайне малой, так как геоэлектрические неоднородности в указанных пунктах различны. Выявленный аномальный эффект целесообразно назвать сейсмотеллурическим. Данный эффект открывает перспективы использования теллурических токов для прогноза сильных землетрясений.

Методика обработки и анализ поведения вектора индукции

На Восточной Камчатке в обсерватории «Паратунка» в течение многих десятилетий осуществляются наблюдения геомагнитного поля в виде компонент H , D , Z . Временные ряды этих составляющих поля в виде часовых значений за период с 1990-2000 гг. изучены в работе [12]. В последние три года здесь осуществляется регистрация компонент H , D , Z с дискретностью 1 сек с помощью цифровой геомагнитной станции. Эти данные дают возможность изучить передаточную функцию между компонентой Z и компонентами H , D в виде индукционной матрицы Визе-Паркинсона в частотной и временной областях. Основанием такого исследования является предположение о существовании линейного соотношения вида [2]:

$$H_z = \hat{W} \vec{H}_{\text{гор.}}, \text{ где } \hat{W} = |W_{zx}, W_{zy}|$$

$H_z = W_{zx}H_x + W_{zy}H_y$, где H_z , H_x , H_y – составляющие наблюдаемого магнитного поля, W_{zx} , W_{zy} – компоненты индукционной матрицы, зависящие от частоты, распределения электропроводности в Земле и ориентации координатных осей.

По компонентам индукционной матрицы можно определить векторы индукции [2,25].

$$\vec{C}_u = \text{Re } W_{zx} \vec{i} + \text{Re } W_{zy} \vec{j}$$

$$\vec{C}_v = \text{Im } W_{zx} \vec{i} + \text{Im } W_{zy} \vec{j}$$

Определение компонент матрицы и вектора индукции производилось с помощью программы Ларсена [22]. Основное внимание при расчетах уделялось когерентности между вертикальной и горизонтальными составляющими геомагнитного поля. При когерентности не менее 0.8 компоненты индукционной матрицы определяются с точностью в первые проценты.

Анализ влияния геоэлектрических неоднородностей среды

Индукционные матрицы получены в широком диапазоне периодов в результате обработки непрерывных наблюдений геомагнитного поля за период 2001-2003 гг. Поведение компонент матриц определяется латеральными и вертикальными геоэлектрическими неоднородностями среды.

О характере их влияния на различных частотах можно судить из поведения магнитных полярных диаграмм [1]. В диапазоне коротких периодов ($T=250$ с, $T=1000$ с), форма и ориентировка полярных диаграмм обусловлена, по-видимому, влиянием локальных геоэлектрических неоднородностей среды, включая сложные очертания береговой линии. На $T=3000$ с и 6000 с диаграммы вытянуты вкост простирания Курило-Камчатского глубоководного желоба, представляющего собой двумерную геоэлектрическую неоднородность. На $T=36000$ с полярная диаграмма меняет свою ориентировку почти на 60° . При этом лепестки в начале координат заметно расходятся, что указывает на трехмерную неоднородность среды.

Более наглядное представление о береговом эффекте дают векторы индукции, модули которых и азимуты показаны на рис. 5. Следует отметить, что мы впервые располагаем такой информацией в диапазоне периодов от первых минут до 2000 мин., характеризующей береговой эффект. На рисунке 5, видно, что действительная часть вектора индукции достигает максимальных значений 0,3 на периоде около 6000 с. При этом мнимая часть вектора индукции минимальна, а азимут ее меняется на 180° . Азимут действительной части вектора индукции равен 130° , т. е. его направление определяется индукцией в глубоководном желобе. На этом периоде происходит максимальное насыщение глубоководного желоба электрическим током.

В высокочастотной области азимут действительной части вектора составляет около 60° . Он заметно отличается от направления мнимой части вектора, что связано с

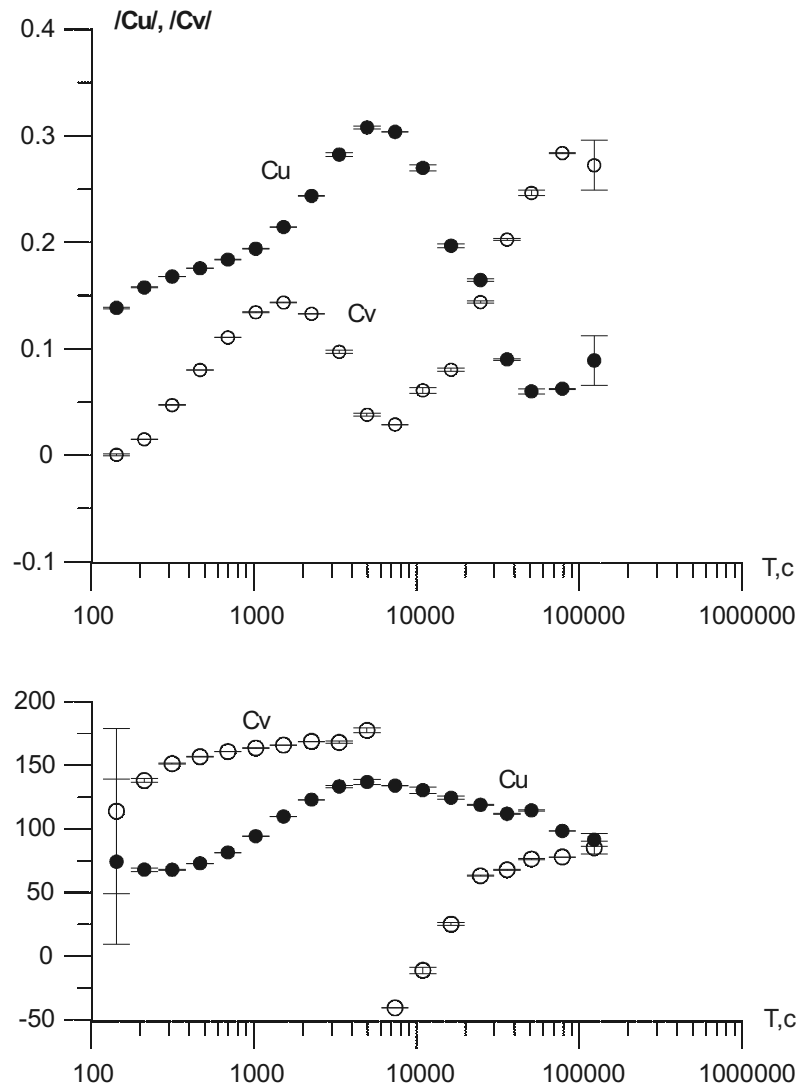


Рис. 5. Частотные характеристики действительной и мнимой частей вектора индукции.
Pic. 5. Frequency characteristics of real and imaginary parts of the induction vector.

влиянием сложных очертаний береговой линии и другими геоэлектрическими неоднородностями среды. В области низких частот отмечается увеличение мнимой части вектора и уменьшение действительной части вектора, азимут которых составляет около 100° . Возможно, данные особенности в поведении векторов индукции вызваны совместным влиянием Курило-Камчатского и Алеутского глубоководных желобов.

Изменение векторов индукции в частотно-временной области и возможная их связь с землетрясениями

Рассмотрим результаты мониторинга векторов индукции. Важно выбрать период вариаций на котором векторы индукции определяются более устойчиво. Диапазон периодов, в котором определяются векторы индукции зависит от временного интервала. Анализ показывает, что период на котором векторы индукции определяются более устойчиво, зависит от выбранного временного интервала. При этом важным условием является высокая когерентность между вертикальной и горизонтальной составляющими геомагнитного поля. Поэтому, в дальнейшем все полученные результаты рассмотрены при когерентности не менее 0.8. На рис. 6 в качестве примера приведено сопоставление частотных кривых модулей действительных частей векторов индукции

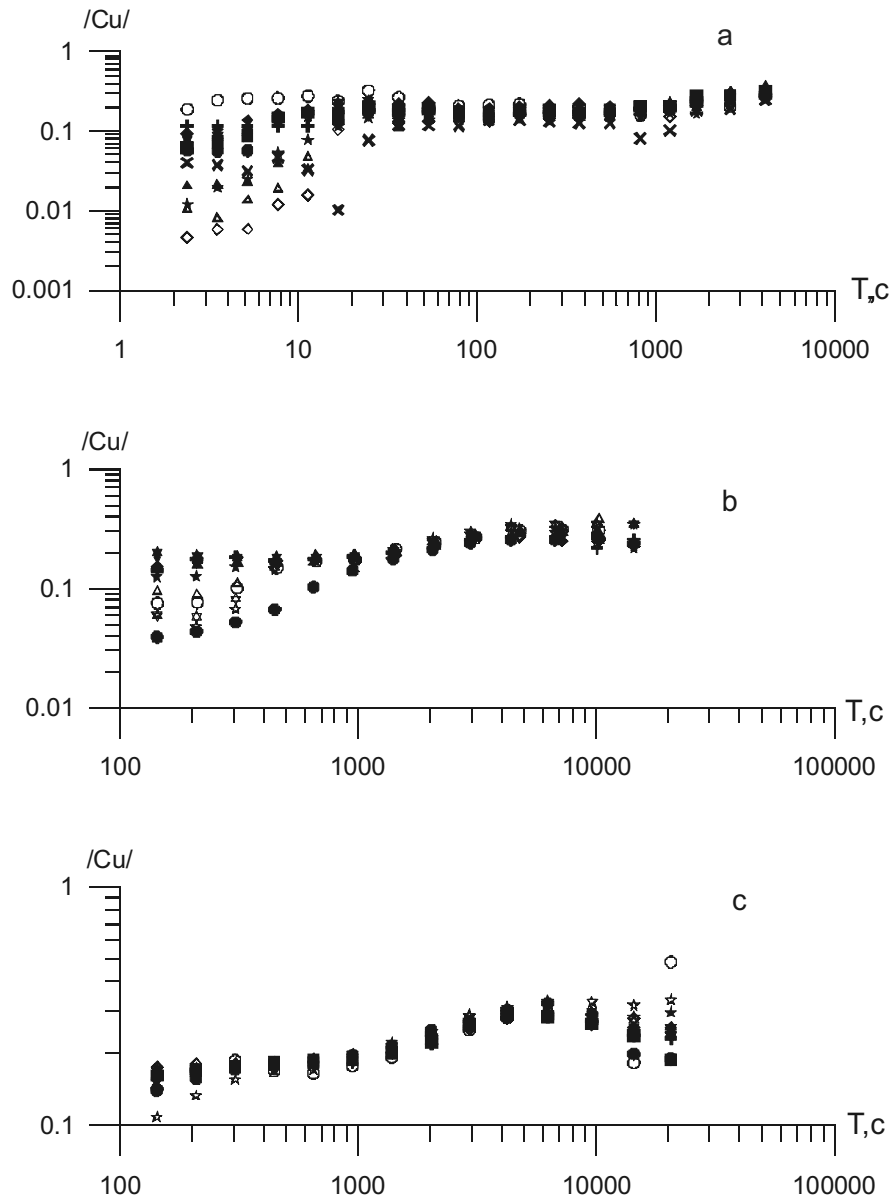


Рис. 6. Сопоставление частотных кривых модулей действительных частей векторов индукции для временных интервалов, равным 5(а), 10(б) и 20(в) суток.

Pic. 6. Comparison of frequency graphs of induction vector's real parts modules for time intervals equal 5(a), 10(b), 20 (c) x24 hours.

для временных интервалов, равных 5, 10 и 20 суткам. Количество временных интервалов 10-15. Они случайным образом взяты из непрерывных временных рядов геомагнитного мониторинга в 2001-2003 годах. На рисунке 6 видно, что с меньшей дисперсией получены значения модулей векторов индукции для периодов 70-1000 с, 1000-3000 с и 1000-6000 с для интервалов 5, 10 и 20, соответственно.

В указанных интервалах периодов получены временные ряды различных параметров вектора индукции. На рис. 7 приведены данные мониторинга действительных и мнимых частей вектора индукции на различных периодах. Увеличенная дисперсия $|Cu|$ отмечается на периоде 250 с. Результаты получены для интервалов равным 5 суткам. С увеличением длины интервалов и периодов дисперсия заметно уменьшается. Она становится минимальной для интервалов равным 20 суткам. В поведении $|Cu|$ выделяются годовые вариации, которые на периодах 250, 1000, 3000, 6000 с выражены по-разному. Они заметно проявляются в поведении действительных частей вектора индукции на периодах 250 и 6000 с. Однако, данные вариации слабо выражены на

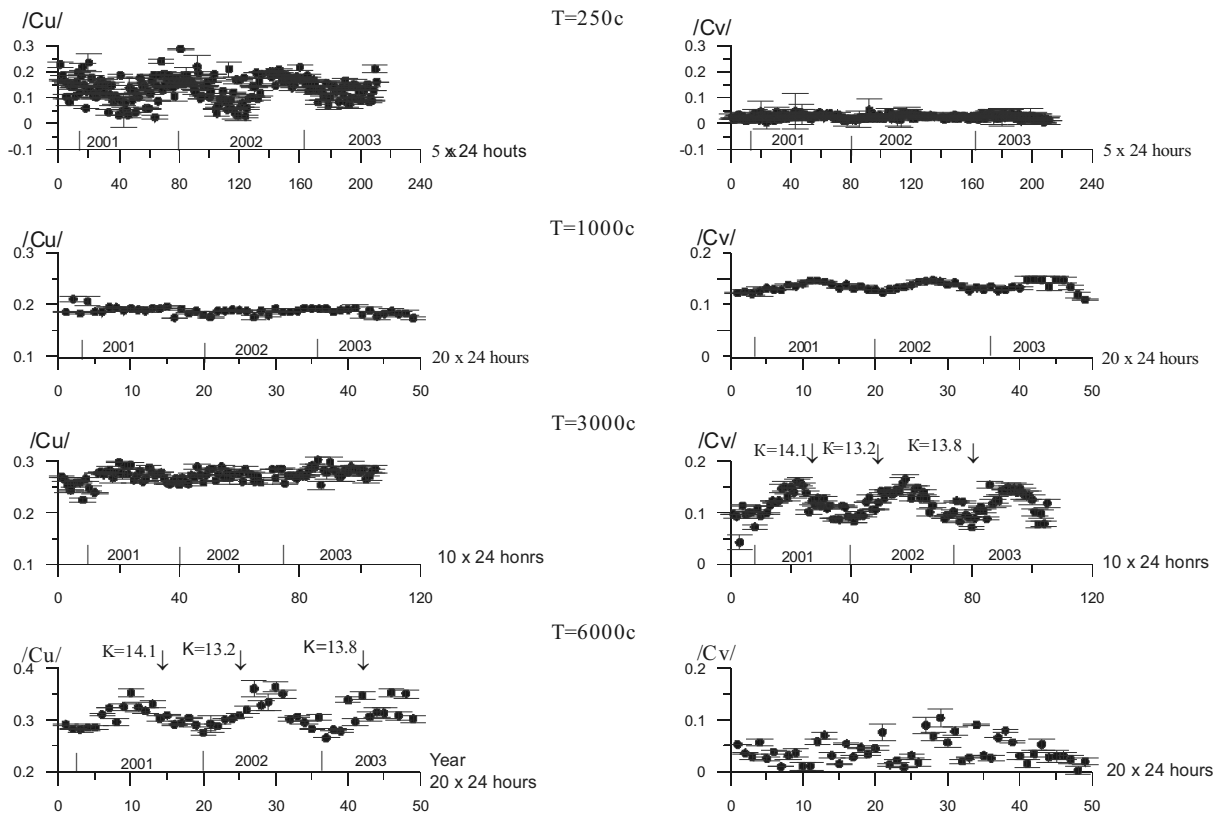


Рис. 7. Графики модулей действительных $|C_u|$ и мнимых $|C_v|$ частей векторов индукции на периодах 250, 1000, 3000, 6000 с.

Pic. 7. Picture of induction vectors' real and imaginary parts modules at the periods of 250, 1000, 3000, 6000 s.

периодах 1000 и 3000 с. В то же время, они заметно проявились в поведении мнимых частей вектора индукции $|C_v|$ на указанных периодах. На частной характеристике берегового эффекта (рис. 5) видно, что данные периоды приурочены к максимуму кривой $|C_v|$. Это свидетельствует о влиянии трехмерной геоэлектрической неоднородности. Таким образом, мы приходим к выводу, что в трехмерных геологических средах годовые вариации проявляются в большей мере в поведении мнимой части вектора индукции. В этих случаях, по-видимому, для поиска предвестников землетрясений необходимо использовать мнимую часть вектора.

Следует обратить внимание, что минимумам годовых вариаций на графике $|C_u|$ на периоде 250 с отвечают максимумы $|C_u|$ на периоде 6000 с. Это можно объяснить тем, что вектор индукции на периоде 250 с (исходя из длины электромагнитной волны) контролирует геоэлектрические неоднородности в среде размерностью в десятки километров. В то же время вектор индукции на периоде 6000с контролирует геоэлектрические неоднородности в среде уже размерностью в сотни и более км. Естественно, что поведение вектора индукции здесь будет другим, что находит, по-видимому, отражение в годовых вариациях.

Поведение вектора индукции сопоставлено с моментами сильных землетрясений с $K \geq 13$ на эпицентральных расстояниях до 150 км от обсерватории Паратунка. Моменты землетрясений показаны на графиках $|C_u|$ на $T=6000$ с и $|C_v|$ на $T=3000$ с, на которых в лучшей мере проявились годовые вариации. На графиках видно, что моменты землетрясений приурочены ближе к максимумам годовых вариаций $|C_u|$ и $|C_v|$. По-видимому, землетрясения имеют связь с геоэлектрическими неоднородностями среды, выраженными в поведении вектора индукции. Нам не удалось выявить более явные эффекты в параметрах $|C_u|$ и $|C_v|$, и в компонентах индукционного тензора, связанные

с землетрясениями. Возможно, это обусловлено тем, что за рассматриваемый период в районе Камчатки не было землетрясений сильнее $K=14.1$. Так, например, результаты работ в других регионах, приведенных в обзоре [18] свидетельствуют, что аномальные эффекты в поведении вектора индукции возможны лишь при сильных мелкофокусных землетрясениях на эпицентральных расстояниях в первые десятки километров. Можно полагать, что дальнейшие исследования вариаций геомагнитного поля на Камчатке дадут возможность оценить эффективность использования тензора и вектора индукции для прогноза землетрясений.

Сравнительная характеристика вариаций геомагнитного поля на Камчатке и в районе оз. Байкал

Вариации геомагнитного поля несут информации о физическом состоянии земных недр и ионосферы. Изучение этих вариаций в сейсмоактивных зонах представляет повышенный интерес в связи с поисками эффектов, связанных с сильными землетрясениями. В настоящем разделе рассмотрены данные многолетних наблюдений геомагнитного поля на обсерваториях «Паратунка» (Камчатка) и «Патроны» (оз. Байкал). Обсерватория «Паратунка» находится на побережье Тихого океана в зоне субдукции. Обсерватория «Патроны» расположена в районе Байкальской рифтовой зоны.

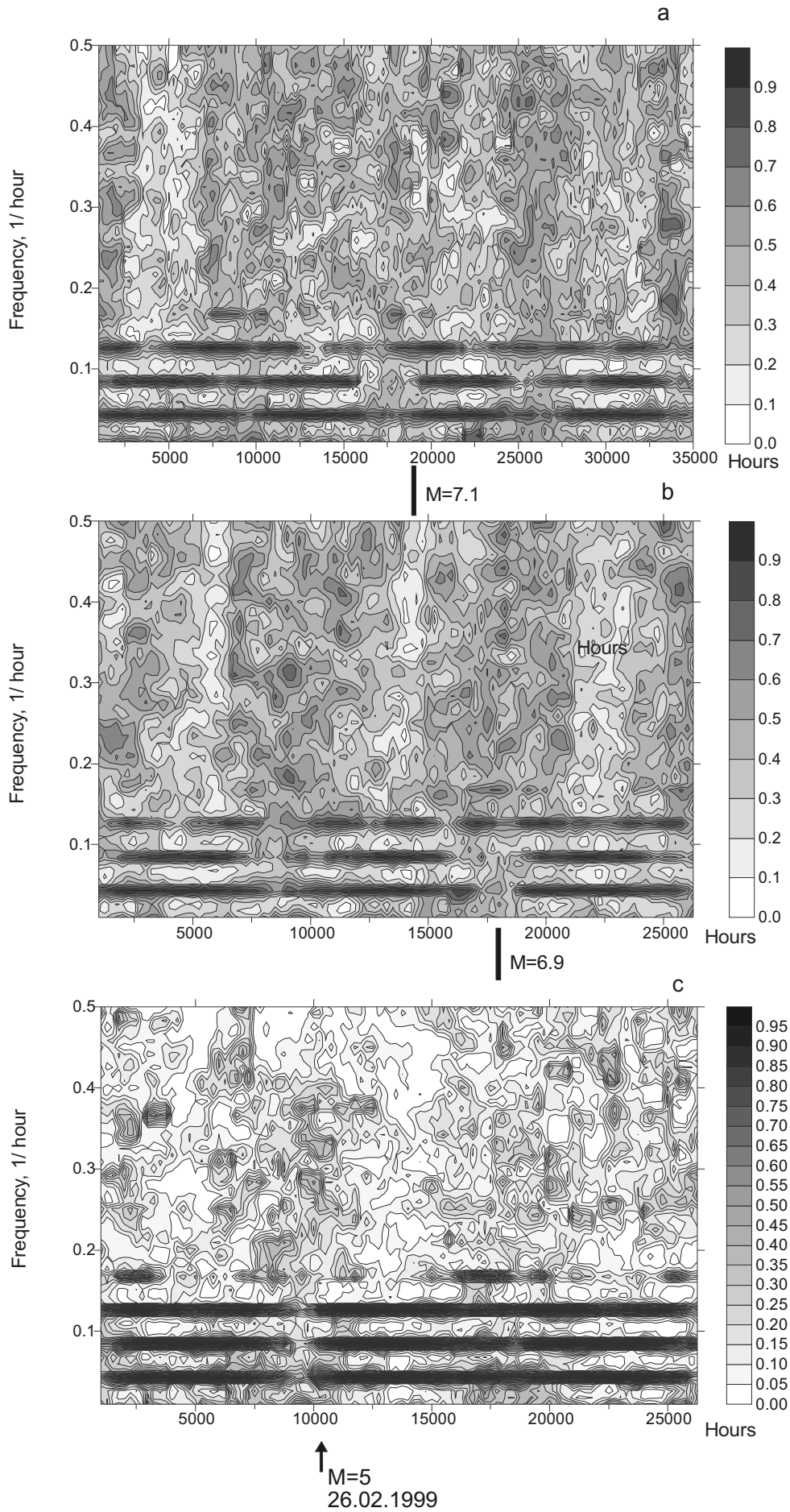
Геомагнитное поле регистрируется на обсерваториях в виде горизонтальной составляющей H , магнитного склонения D и вертикальной составляющей Z . Запись поля осуществляется с помощью вариометров системы В.Н. Боброва в аналоговом виде. Точность определения компонент H , $Z = 2$ нТл, $D - 0,2$ мин. Предварительная обработка сводилась к расчету среднечасовых, среднемесячных и среднесуточных значений, а также к нормированию, центрированию, интерполяции, фильтрации временных рядов наблюдений.

Представление о поведении геомагнитного поля за последние 40 лет дают средне-годовые значения компонент H , D , Z . Эти медленные изменения поля характеризуют вековую вариацию. Составляющие H и Z на обеих обсерваториях более близки по форме. В наибольшей мере отличаются компоненты D . Так в обсерватории «Паратунка» склонение монотонно изменяется с 1975 года до 2002 года почти на один градус. В то же время в обсерватории «Патроны» склонение с 1968 г. по 1987 год слабо меняется в пределах первых минут и только в период с 1987 г. по 2002 г. испытывает бухтообразное изменение с амплитудой около 10 минут.

Известно, что вековые вариации связаны с источниками, находящимися внутри земного шара и, по-видимому, имеют одинаковое происхождение с магнитным полем Земли. Также существуют данные, что на вековой ход влияют солнечная и магнитная активность и наличие западного дрейфа [19]. Кроме этого на поведение магнитного поля могут оказывать влияние другие факторы, включая геодинамические процессы, протекающие в Земле. По-видимому, все эти указанные явления и определяют различное поведение компонент H, D и Z в обсерваториях «Паратунка» и «Патроны».

Перейдем к высокочастотным вариациям. Для их изучения использованы временные ряды среднечасовых значений за период с 1990 г. по 2001 г. (в обсерватории «Патроны» с 1990 г. по 2000 г.). Эти временные ряды из аналогового вида переведены в цифровые значения, что дает возможность выполнить анализ с привлечением современных компьютерных программ. На графиках среднечасовых значений выражены тренды, связанные с вековым ходом геомагнитного поля. Высокочастотные вариации геомагнитного поля представлены на графиках в виде «шумового» фона.

Результаты спектрального анализа рядов среднечасовых, среднесуточных и средне-месячных горизонтальных составляющих поля свидетельствуют, что в спектре геомагнитного поля присутствуют солнечно-суточные (6, 8, 12 и 24 ч), 27, 13, 5 и 9 дневные, а также полугодовые и годовые вариации. В большей мере выражены солнечно суточные вариации. Природа их связывается с существованием токовых систем в ионосфере на



высотах порядка 100 км [13,19]. Предполагается, что годовые вариации компонент геомагнитного поля обусловлены действием ионосферного динамо [20].

С помощью спектрально-временного анализа изучено изменение во времени мощности составляющих поля в диапазоне периодов от первых часов до 1000 часов в течение 10 лет. На СВАН-диаграммах наиболее четко в виде полос выражена мощность солнечно-суточных вариаций с $T = 24, 12, 8$ и 6 часов. Интенсивность этих вариаций меняется во времени и является повышенной в летний период.

Рассмотрим когерентность между горизонтальной (H), вертикальной (Z) составляющими и магнитным склонением (D). Расчеты показывают, что наиболее высокая когерентность характерна для солнечно-суточных вариаций. Она достигает значений до 0.85 на периоде 24 часа. Значительный интерес представляет исследование динамики когерентности между составляющими H, D, Z в многомерном пространстве в виде канонической когерентности (параметра “ K ”). Эта задача была решена с помощью программ Любушина [3]. Возможная связь параметра “ K ” с сильными землетрясениями изучена для временных интервалов, когда в районе обсерваторий произошли сильные землетрясения с эпицентрными расстояниями до 130 км. В районе обсерватории “Паратунка” таких землетрясений два с $M=7.1$ (02.03.1992 г) и с $M=6.9$ (01.01.1996 г.). В районе обсерватории Патроны за весь период наблюдений произошло одно сильное землетрясение с $M=5$ (28.02.1999 г.). Из-за большого объема информации анализ выполнен только для временных интервалов до 3-4 лет, в пределах которых произошли сильные землетрясения. Полученные результаты представлены на рис. 8. Из них видно, что изолинии среднего значения покомпонентных канонических когерентностей (параметра “ K ”) на периодах 24, 12, 8 часов сгущаются и образуют темные узкие полосы. Параметр “ K ” на значительных временных интервалах имеет значение более 0.7. Имеются сезонные изменения. В то же время в ряде случаев полосы прерываются и параметр “ K ” уменьшается до 0.2-0.4. В большей мере это выражено в периоды перед сильными землетрясениями с $M=7.1$ и с $M=6.9$ в районе обсерватории “Паратунка” и с $M=5$ в районе обсерватории “Патроны”. Их эпицентрные расстояния составляют 130, 125 и 120 км, соответственно. Они являются наименьшими для сильных землетрясений за периоды наблюдений на обсерваториях. Данные расстояния находятся в пределах горизонтального скин-слоя для солнечно-суточных вариаций. Большой интерес вызывает поведение параметра K для $T=12$ ч. (частота 0,183 1/ч. Он уменьшился примерно с 0.9 до 0.2-0.3 за три месяца до землетрясения с $M=7.1$, за два месяца до землетрясения с $M=6.9$ на обсерватории “Паратунка” и за один месяц до землетрясения с $M=5$ на обсерватории “Патроны”. Получается, что временный интервал затухания параметра “ K ” на периоде 12 час имеет связь с магнитудой землетрясения. Чем больше магнитуда, тем больше интервал времени, когда параметр “ K ” уменьшается до десятых долей. Данный вывод предварительный и он требует более глубокого изучения.

Предполагается, что уменьшение параметра “ K ” вызвано физическими процессами, протекающими в литосфере в связи с сильными землетрясениями. По существу-

Рис. 8. Эволюция параметра « K » трехмерного временного ряда среднечасовых значений H, D, Z .

а и б – обсерватория “Паратунка». Период наблюдений с 01.01.1990 г. по 31.12.1993 г. (а) и 01.01.1994г. по 31.12.1996 г. (б). в – обсерватория «Патроны». Период наблюдений с 01.01.1998 г. по 31.12.2000 г. Диапазон периодов и их магнитуды: $M=7.1$ (02.03.1992 г.), $M=6.9$ (01.01.1996 г.), $M=5$ (26.02.1999 г.).

Fig. 8. Evolution of the parameter “ K ” three-dimensional time series of average hour values H, D and Z .

a, b – observation site Paratunka. Observation intervals: from 01.01.1990 to 31.12.1993 and from 01.01.1994 to 31.12.1996. c – observation site Patrons. Observation period: from 01.01.1998 to 31.12.2000. Interval from 2 to 100 hours (frequency from 0.5 to 0.01 1/h). On the time axis moments of the earthquakes and their magnitude $M=7.1$ (02.03.1992), $M=6.9$ (01.01.1996), $M=5$ (26.02.1999) are indicated.

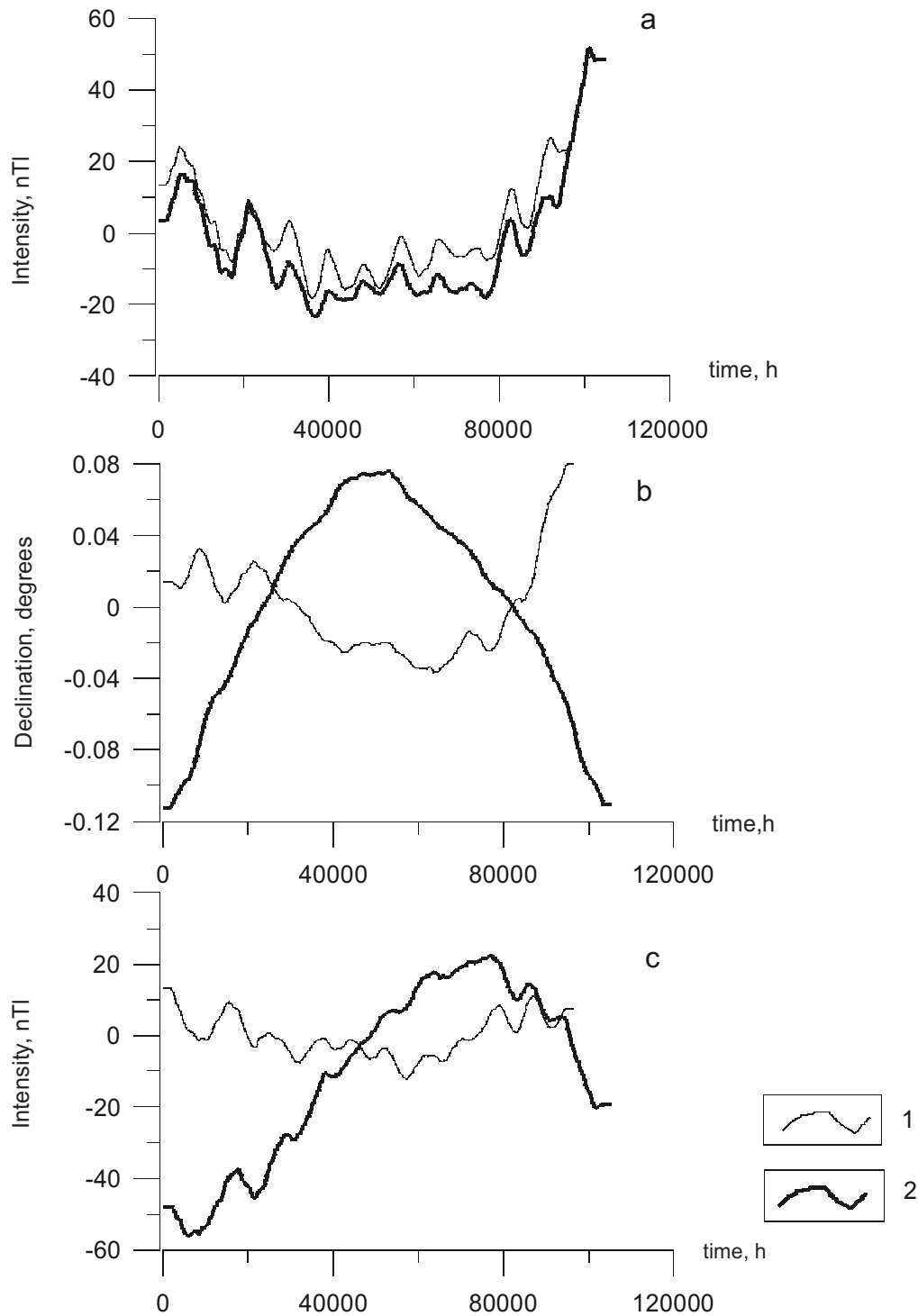


Рис. 9. Сопоставление низкочастотных вариаций составляющих геомагнитного поля H,D,Z для обсерваторий «Паратунка» и «Патроны».

Период наблюдений с 01.01.1990 г. по 31.12.2000 г. («Паратунка»); с 01.01.1990 г. по 31.12.2001 г. («Патроны»). Графики получены из исходных рядов среднечасовых значений H,D,Z в результате подавления высоких частот с радиусом осреднения 2000 ч. 1-«Паратунка», 2-«Патроны».

Fig. 9. Comparison of low-frequency variations of geomagnetic field components H,D,Z for observation sites Paratunka and Patrons.

Observation period: from 01.01.1998 to 31.12.2000 (Paratunka), from 01.01.1990 to 31.12.2001 (Patrons). Pictures are given for the incoming series of average values H,D,Z in the result of high frequency attenuation with the radius of 2000 hours. 1-Paratunka, 2-Patrons.

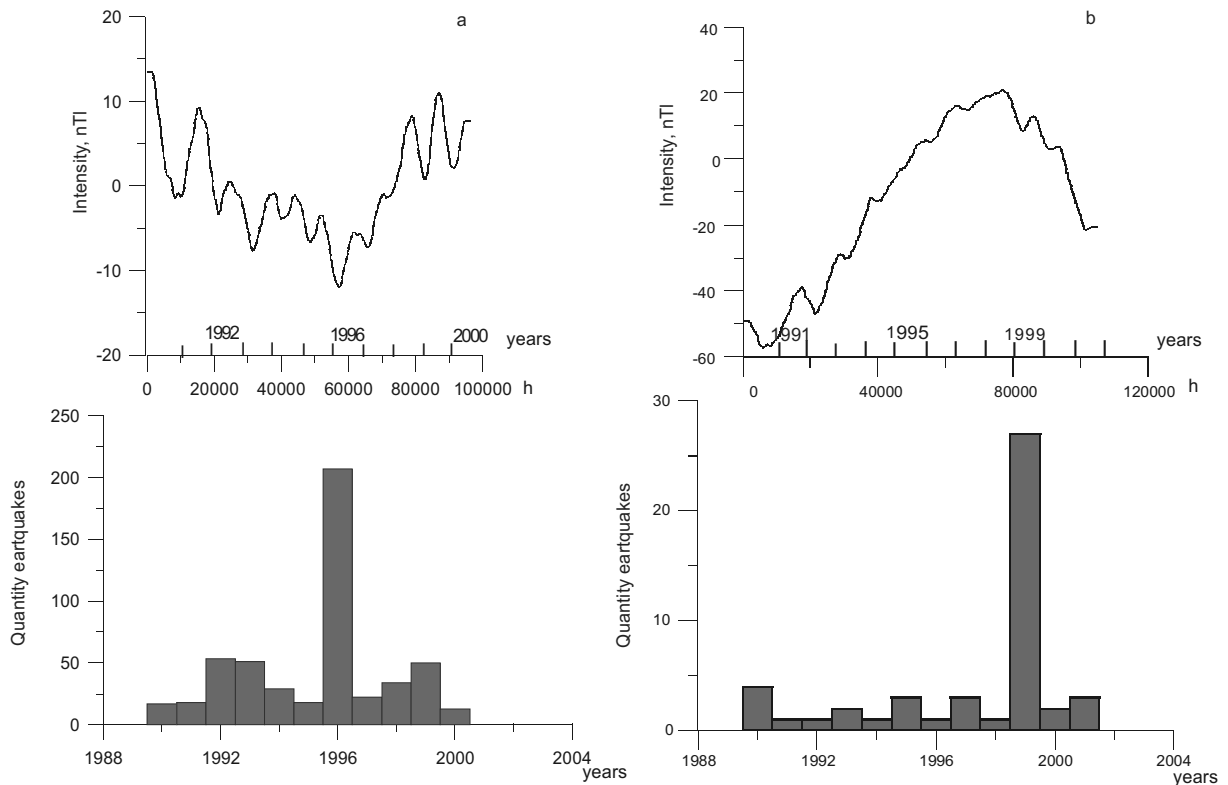


Рис. 10. Низкочастотные составляющие геомагнитного поля на обсерваториях «Паратунка» (а) и «Патроны» (б) в сопоставлении с гистограммами распределения землетрясений энергетических классов более 10 с эпицентрными расстояниями до 180 км от пунктов наблюдений.

Fig. 10. Low frequency components of geomagnetic field on the observation sites Paratunka (a) and Patrons (b) in comparison with histograms of earthquakes with energetic classes more than 10 with epicentral distances not more than 180km from observation stations distribution.

щим представлениям размеры блоков литосферы, в которых протекают подобные физические процессы, определяются их энергетическим классом [17]. Так при землетрясениях с M_{i5} горизонтальные размеры блоков литосферы могут достигать первых сотен км и более. Длина электромагнитной волны на периоде 12 час и глубина ее проникновения в Земле зависит от электропроводности среды в районе наблюдений. Согласно [8,23], эти величины будут не менее 100 км. Следовательно, солнечно-суточные вариации контролируют электропроводность крупных блоков литосферы размерами не менее 100 км по латерали и на глубину. При подготовке землетрясений возможно возникновение крупных геоэлектрических неоднородностей в литосфере. Повышенной чувствительностью к появлению таких неоднородностей обладает вертикальная составляющая геомагнитного поля. Влияние неоднородности, по-видимому, влияет на фазу суточных вариаций составляющей геомагнитного поля, что проявляется уменьшением параметра “К”. Это одна из наиболее вероятных причин возможной связи параметра “К” с сильными землетрясениями. Также нельзя исключить вероятность изменений в ионосферном источнике солнечно-суточных вариаций. Предполагается, что при подготовке землетрясений происходят процессы, приводящие к возникновению электрических источников в Земле за счет электрокинетических и других эффектов. Возможно, что электромагнитное поле от внутриземного источника оказывает влияние на литосферно-ионосферные связи и на ионосферный источник солнечно-суточных вариаций. Все это также может проявиться в аномальном поведении параметра “К”.

Обратимся к низкочастотным вариациям. На рис. 9 представлены графики составляющих геомагнитного поля H , D , Z после фильтрации высокочастотных

вариаций. Они приведены в сопоставлении для обсерваторий «Паратунка» и «Патроны». Мы уже отмечали, что поведение графиков H на обеих обсерваториях является близким между собой. В обсерватории «Патроны» вариации D и Z более интенсивны. Они существенно отличаются от соответствующих компонент на обсерватории «Паратунка» не только по амплитуде но и по фазе.

Рассмотрим годовые вариации. В лучшей мере они проявились в составляющих H и Z и крайне слабо в D обсерватории «Патроны». Особенности в поведении годовых вариаций могут быть связаны с геологическим строением районов и глубинными физическими процессами, протекающими в них. Ранее мы изучили годовые вариации в обсерватории «Паратунка» за период 1990-1997 гг. и установили увеличение фазового соотношения между годовыми вариациями магнитного склонения и горизонтальной, вертикальной составляющими геомагнитного поля до 160° в связи с сильной сейсмичностью в 1996-1997 г в радиусе до 130 км от пункта наблюдения. К сожалению, мы не можем выполнить такую работу для обсерватории «Патроны», так как годовые вариации компоненты D здесь выражены слабо. Они имеют интенсивность на уровне точности измерений.

Обратимся к длиннопериодным (одиннадцатилетним) вариациям. Известно, что природа этих вариаций связана с солнечной активностью. В то же время особенности поведения этой вариации могут иметь связь с глубинными физическими процессами. Наибольший интерес представляет компонента Z . Она является более чувствительной к наличию геоэлектрических и магнитных неоднородностей в среде.

Рассмотрим сопоставление графиков Z с гистограммами землетрясений для обсерватории «Паратунка» и «Патроны». Гистограммы получены для землетрясений с $K \geq 10$ с эпицентральной расстоянием до 130 км. На рис.10 видно, что экстремумы графиков приурочены к повышенной сейсмической активности. При этом в обсерватории «Паратунка» экстремум выражен в виде минимума, а в обсерватории «Патроны» в виде интенсивного максимума. Данные экстремумы могут быть связаны с динамикой упругих напряжений в земной коре в связи с сейсмичностью. В результате их действия в литосфере возможны различного рода эффекты, приводящие к изменению физических свойств и к появлению крупных неоднородностей с поперечными размерами в десятки и длиной в сотни километров. Это один из вариантов объяснения связи экстремумов на графиках с максимумами на гистограммах. Необходимо отметить, что выявленные особенности получены для ограниченного во времени интервала. Их необходимо проверить на более длинных временных рядах составляющей Z геомагнитного поля.

Выводы

1. В результате мониторинге теллурического тензора установлено, что более устойчивой во времени является его максимальная компонента t_{max} на периоде близким к часу (3460 с) по направлению вкост простирания сейсмофокальной зоны. Данная компонента принята основной для электротеллурического мониторинга в связи с поиском предвестников сильных землетрясений.

2. В поведении компоненты t_{max} за период с 01.07.1997 по 31.12.1999 гг. выявлены аномальные эффекты, связанные с сильными землетрясениями с $M=7.7$ и $M=6.9$. Они возникают примерно за 1,5 месяца до землетрясения, сопровождают его и, примерно, за такой же период затухают.

3. Поведение компоненты t_{max} характеризует относительное изменение геоэлектрических неоднородностей на пунктах наблюдений Верхняя Паратунка и Тундровый. Геоэлектрические неоднородности, по-видимому, связаны с тектоническими нарушениями, жидкими флюидами и т.д. Эти неоднородности являются, по-видимому, приповерхностными. Они появляются или меняются в связи с сильными землетрясениями. Выявленный аномальный эффект целесообразно назвать сейсмотеллурическим.

4. По данным многолетних наблюдений вариаций геомагнитного поля впервые получена частотная характеристика берегового эффекта в расширенном диапазоне периодов от 10^2 до 10^6 . Максимальное влияние берегового эффекта отмечается на периоде близком к 1,5 часам. На этом периоде происходит максимальное насыщение электрическим током глубоководного желоба, что проявляется максимумом действительной части вектора индукции и сменой азимута его мнимой части на 180° . Частотная характеристика на коротких периодах свидетельствует о влиянии трехмерных геоэлектрических неоднородностей, к которым можно отнести сложные очертания береговой линии и других неоднородностей. В области длинных периодов усиливается влияние трехмерных неоднородностей, возможно связанных с взаимным влиянием Курило-Камчатского и Алеутского глубоководных желобов.

5. В поведении вектора индукции выявлены годовые вариации, особенности которых зависят от характера геоэлектрической неоднородности среды. В случае двухмерной неоднородности годовые вариации в лучшей мере выражены в поведении действительной части вектора индукции. В случае трехмерной неоднородности эти вариации более заметны в поведении мнимой части вектора индукции. Годовые вариации действительной части вектора индукции в короткопериодном ($T=250$ с) и среднeperиодном ($T=6000$ с) диапазонах находятся в противофазе, что обусловлено различием геологических сред, контролируемых вектором индукции. При мониторинге индукционного вектора с целью поиска возможных предвестников сильных землетрясений целесообразно изучение как действительной, так и мнимой частей вектора индукции в широком диапазоне частот. Это позволит контролировать как двумерные, так и трехмерные геоэлектрические неоднородности на различных удалениях от пункта наблюдений.

6. В результате анализа вариаций составляющих геомагнитного поля в обсерваториях «Паратунка» (Камчатка) и «Патроны» (оз. Байкал) установлено уменьшение канонической когерентности (параметра «К») трехмерного временного ряда H , D и Z от 0.9 до 0.2-0.3 для вариаций с периодом 12 ч перед сильными землетрясениями с эпицентрными расстояниями до 130 км. Временной интервал затухания параметра «К» зависит от магнитуды землетрясения. При $M=7.1$ он равен примерно трем месяцам, при $M=6.9$ – двум, при $M=5$ – одному.

7. В обеих обсерваториях установлена приуроченность экстремумов одиннадцатилетних вариаций вертикальных компонент геомагнитного поля во времени к повышенной сейсмической активности в радиусе до 130 км от обсерватории. Предполагается, что данные экстремумы могут быть связаны с динамическими процессами в литосфере в связи с сильной сейсмичностью.

Литература

1. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Наука. 1968. 255 с.
2. Бердичевский М.Н., Жданов М.С. Интерпретация аномалий переменного электромагнитного поля Земли. М.: Недра. 1981. 207 с.
3. Любушин (мл.) А.А. Анализ канонической когерентности в задачах геофизического мониторинга // Физика Земли. № 1. 1998. С.59-66.
4. Мороз Ю.Ф. Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука. 1991. 181 с.
5. Мороз Ю.Ф., Напылова О.А. Краткосрочные предвестники землетрясений в вариациях низкочастотных магнитотеллурических матриц // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 67-76.
6. Мороз Ю.Ф. О методике поисков краткосрочных предвестников сильных землетрясений в низкочастотном теллурическом поле Камчатки. // Физика Земли. 1994. №9. С. 88-90.

7. Мороз Ю.Ф., Кобзова В.М. Физическое и численное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки. // Вулканология и сейсмология. 1994. С. 86-98.
8. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г. Магнитотеллурическое зондирование Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке. // Вулканология и сейсмология. № 2. 1998. С. 77-84.
9. Мороз Ю.Ф., Бахтиаров, В.Ф., Гаврилов, В.А., Левин В.Е., Попруженко С.В. О мониторинге электротеллурического поля с целью прогноза сильных землетрясений на Камчатке. // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 139-149.
10. Мороз Ю.Ф. Предвестники сильных землетрясений в низкочастотном электромагнитном поле Камчатки. // Физика Земли. 1996. № 5. С. 58-62.
11. Мороз Ю.Ф., Вершинин Е.Ф. Магнитотеллурический мониторинг сейсмоактивного района Камчатки. // Физика Земли. 2001. № 10. С. 63-70.
12. Мороз Ю.Ф., Вершинин Е.Ф., Назарец В.П., Мороз Т.А. Аномальные эффекты в вариациях геомагнитного поля на Камчатке. // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 32-37.
13. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир. 1986. 528 с.
14. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9-27.
15. Рокитянский И.И. Исследование аномалий электропроводности методом магнитовариационного профилирования. Киев. Наукова думка. 1975. 279 с.
16. Соболев Г.А., Морозов В.Н. Локальные возмущения электрического поля на Камчатке и их связь с землетрясениями. // Физические основы поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука. 1970. 110 с.
17. Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Штейнберг В.В. О зависимости энергии землетрясения от объема сейсмического очага. // ДАН СССР. Т. 271. №3. 1983. С. 598-602.
18. Харин Е.П. Изменчивость придаточных функций электромагнитного поля Земли во времени. // Геофизический журнал. 1981. Т. 3. № 3. С. 16-24.
19. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 578 с.
20. Curric R.G. The geomagnetic spectrum – 40 days to 5.5 years. // J. Geophys. Res. 1996. V. 71. № 19. P. 4579-4598.
21. Corwin R.F., Morrison H.F. Self potential variations preceding earthquakes in central California. // Geophys. Res. Lett. 1977. V. 4. P. 171-174.
22. 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.
23. Moroz Yu.F., Pospeev A.V. Deep electrical Conductivity of East Siberia and the Far East of Russia. // Tectonophysics. V. 245. 1995. P. 85-92.
24. Noritomi K. Application of precursory geoelectric and geomagnetic phenomena in China // Report by Japanese Seism. Soc. Delegation to People's Republic of China, Skism. Soc. Japan. 1978. P. 57-87 (in Japanese, for English translation, Stt Chinese Geophys. V. 1. № 2. P. 377-391. Amer.geophys. Union).
25. Schmucker U. Anomaies of geomagnetic variations in the South wester United States. University of Colifornia Press, Berkelylos Angels-London, 1970. 32 с.
26. Varotsos P. Alexopoulos K. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes. // Tectonophysics. 1984. V. 110. P. 99-125.