

УДК 550.837

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

© 2009 г. Ю. Ф. Мороз, Т. А. Мороз

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 24.03.2008 г.

Рассмотрена возможность изучения динамики геоэлектрической неоднородности среды с использованием приемных линий, ориентированных в различных направлениях в одном пункте наблюдений. Показано, что наличие локальной геоэлектрической неоднородности позволяет с помощью мониторинга теллурического тензора контролировать состояние электропроводности геологической среды. Приводятся результаты многолетнего мониторинга электротеллурического тензора на Камчатке. В его поведении проявилась заметная аномалия, которая может быть связана с сильнейшими землетрясениями с $M = 8.2$ и $M = 8.3$ в Курило-Камчатском регионе.

Для изучения динамики электропроводности геологических сред применяют различные электромагнитные методы, основанные на использовании искусственных и естественных электромагнитных полей. Среди последних привлекают внимание магнитотеллурические методы. Известно, что магнитотеллурическое поле содержит информацию о геоэлектрической неоднородности среды. Данную информацию можно использовать для изучения динамики этой неоднородности [6, 9]. Опыт показывает, что в магнитотеллурическом поле повышенной чувствительностью к локальным геоэлектрическим неоднородностям обладает электротеллурическое поле. Данная особенность поля положена в основу электротеллурического мониторинга на Камчатке в связи с поиском предвестников сильных землетрясений [8]. Мониторинг электротеллурического поля осуществляется синхронно в пунктах, удаленных между собой на расстояние 50–100 км. В поведении передаточной функции (теллурического тензора) между горизонтальными составляющими электротеллурического поля выявлены аномальные эффекты, которые могут быть связаны с сильными землетрясениями [8]. Эти эффекты обусловлены изменениями электропроводности среды в пунктах наблюдений. В настоящей статье рассмотрена возможность мониторинга электропроводности геологической среды по данным наблюдений электротеллурического поля в одном пункте с использованием систем ортогональных измерительных линий, ориентированных в различных направлениях.

КРАТКАЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

Наблюдения электротеллурического поля осуществляются в пункте Тундровый, который расположен на побережье Авачинского залива Тихого

океана (рис. 1). Район характеризуется сложным геологическим строением [2]. Здесь в отличие от всей территории Камчатки, где преобладает линейная зональность тектонических сооружений северо-восточного простирания, развиты структуры северо-западной поперечной ориентировки. В этом районе, юго-западнее пункта Тундровый, выведены на поверхность наиболее древние (кайнозойские, протерозойские) метаморфические породы, с которыми связывается консолидированный фундамент, подстилающий кайнозойский осадочно-вулканогенный чехол.

Геоэлектрический разрез района представляется следующим [7]. В верхней части разреза залегают четвертичные вулканогенные и осадочные образования сопротивлением сотни – первые тысячи Ом м и более, мощностью первые сотни метров. Ниже залегает кайнозойская толща со средним продольным сопротивлением от первых единиц до первых десятков Ом м, мощностью от 0 до 4 км. Она подстилается комплексом верхнемеловых осадочно-вулканогенных образований со средним продольным сопротивлением от десятков до первых сотен Ом м. Консолидированный фундамент имеет сопротивление первые тысячи Ом м. Глубинная часть разреза содержит коровый и астеносферный проводящие слои.

Поведение магнитотеллурического поля зависит от распределения электропроводности геологической среды. Представление о проводимости осадочно-вулканогенного чехла дает рис. 2. На нем видно, что в пункте наблюдений проводимость чехла составляет 20 Сим. В северо-восточном направлении выделяется поперечная зона повышенной проводимости. Она отвечает грабену, выполненному преимущественно терригенными отложениями. В районе Авачинско-Корякской группы вулканов проводимость зоны возрастает до 600 Сим, что может быть обусловлено наличием жидкой фазы (растворов и

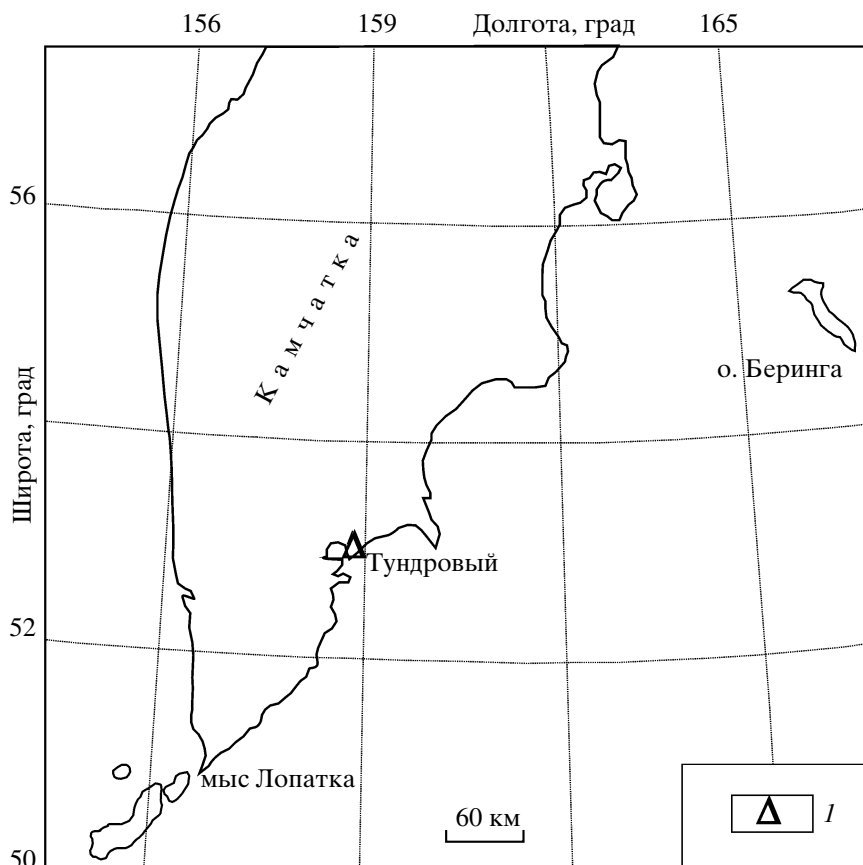


Рис. 1. Схема расположения пункта Тундровый, где производились наблюдения электротеллурического поля. 1 – пункт Тундровый.

магматических расплавов). В Авачинской бухте проводимость за счет морской воды составляет около 100 Сим. В Авачинском заливе проводимость верхнего слоя, включающего толщу морской воды, возрастает до 7000 Сим, в районе глубоководного желоба до 20000 Сим. Резкий контраст проводимости на стыке суши и океана проявляется в магнитотеллурическом поле в виде берегового эффекта. Этот эффект, как будет показано ниже, сильно влияет на поведение электротеллурического поля в пункте Тундровый. Важно отметить, что напряженность и поляризация электротеллурического поля также зависят от распределения локальных приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Так как геологическая среда представляет собой иерархию блоков горных пород различной размерности, то мы вправе предположить, что в районе пункта наблюдений могут быть геоэлектрические неоднородности, соизмеримые с длиной приемных линий. Об этом свидетельствуют данные геологических наблюдений, по которым в рассматриваемом районе выделяются геологические тела и тектонические нарушения размерами от первых десятков до сотен и более метров [2]. Поэтому в местах, где располагаются приемные линии, высока вероятность

наличия геоэлектрических неоднородностей, которые могут вызвать эффекты в электротеллурическом поле.

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Система регистрации разности потенциалов электротеллурического поля показана на рис. 3. Она включает измерительные линии 1, 2 в направлении С-Ю и В-З, а также линии 3 и 4, ориентированные под азимутами 40° и 310° , которые располагаются по направлениям осей геоэлектрической неоднородности среды, определенным по данным площадных электроразведочных исследований методом МТЗ. Длины линий: 1–97, 2–105, 3–65, 4–90 м. В качестве заземлений использованы свинцовые электроды, опущенные на глубину около 2–2.5 м. Измерения разности потенциалов электротеллурического поля выполняются с помощью автоматизированной цифровой аппаратуры. Данные передаются по радиоканалам в центр обработки (г. Петропавловск-Камчатский). Каждая измерительная линия опрашивается один раз в минуту. Эксплуатация автоматизированных пунктов наблюдений электротеллурического поля и предварительная

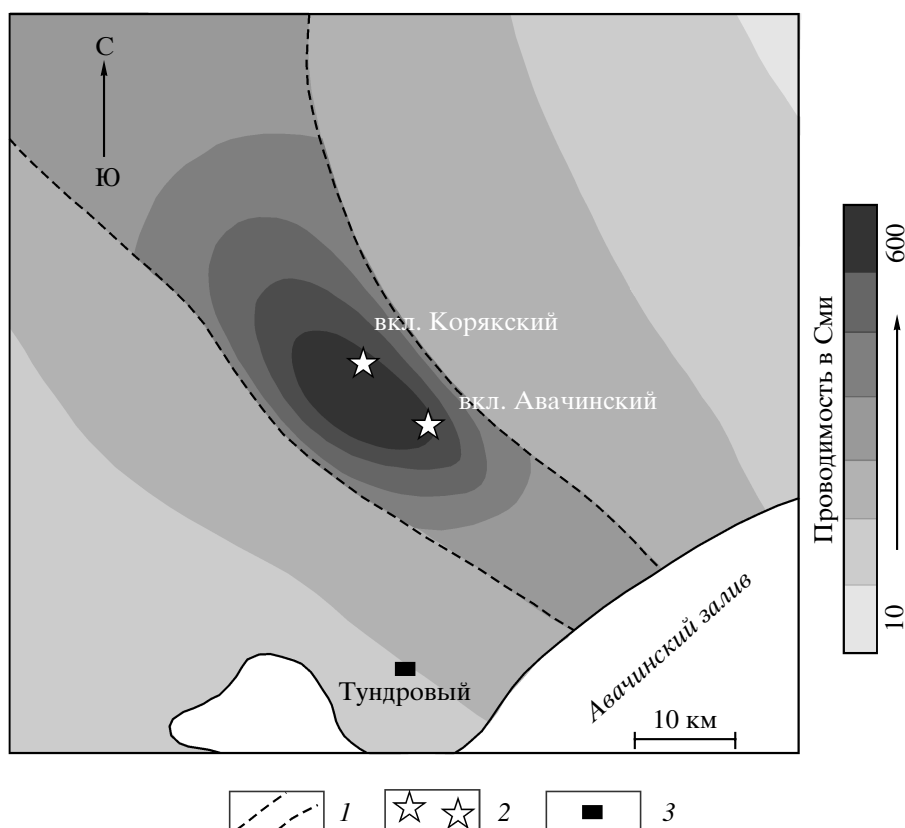


Рис. 2. Схема суммарной проводимости осадочного-вулканогенного чехла района исследований. 1 – изолинии проводимости; 2 – вулканы; 3 – пункт Тундровый.

обработка данных производится Камчатским филиалом Геофизической службы РАН.

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

На рис. 4 в качестве примера приведены временные ряды напряженности электротеллурического поля, полученные на линиях 1, 2, 3, 4. Короткопериодные вариации выражены в виде “шума”. В большей мере он выражен на линии 3. Повышенная интенсивность короткопериодных вариаций связана с поперечной структурой (горст-антиклинорием), в районе которой расположен пункт Тундровый. На линиях 1, 2, 4 проявились суточные вариации интенсивностью до 40–50 мВ/км. На линии 3 суточные вариации выражены слабее. Их интенсивность не превышает 10 мВ/км.

Временные ряды 1 и 2 пересчитаны на направления под азимутами 40 и 320 градусов. Это выполнено путем поворота осей координат 1 и 2 на угол 40° против часовой стрелки, т.е. до совпадения с линиями 4 и 3. Пересчет выполнен по формулам [1]:

$$x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha$$

$$y' = -x \sin \alpha + y \cos \alpha,$$

где x , y и x' , y' – старые и новые координаты напряженности электротеллурического поля; α – угол поворота осей.

Предполагается, что в случае, если геоэлектрическая среда в пункте наблюдения не содержит локальных геоэлектрических неоднородностей, то полученные временные ряды в результате пересчета 1' и 2' должны совпасть с временными рядами 4 и 3. Однако, этого не произошло. На рис. 5 приведено сопоставление временных рядов 1' и 4, 2' и 3, ориентированных в одном направлении. На нем видно, что временной ряд 1' отличается от 4, а 2' от 3. Такое различие указанных временных рядов можно объяснить влиянием локальных геоэлектрических неоднородностей, которые могут быть приэлектродными или соизмеримы с длиной измерительных линий.

АНАЛИЗ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Представление об электропроводности геологической среды по данным измерительных линий 1 и 2, 1' и 2', 4 и 3 дают кривые магнитотеллурического

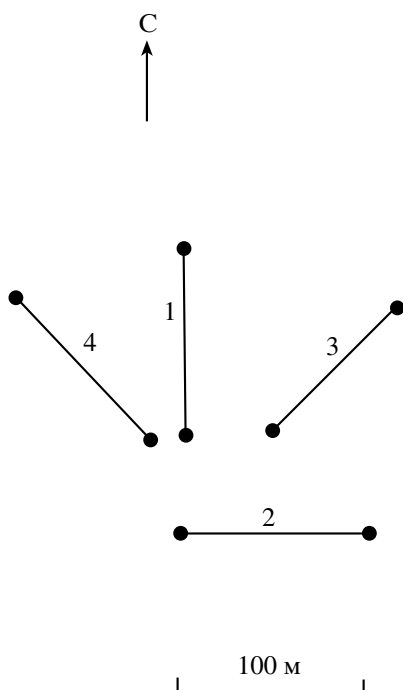


Рис. 3. Схема расположения измерительных линий в пункте Тундровый. 1, 2, 3, 4 – номера приемных линий. Азимуты линий: 1 – 0°; 2 – 90°; 3 – 40°; 4 – 310°. М-б приведен для измерительных линий.

зондирования. Они представлены на рис. 6. Кривые кажущегося электрического сопротивления различаются по уровню сопротивлений более чем на порядок. Кривые 1 и 2, ориентированные в направлениях С-Ю и В-З расходятся между собой почти в два раза на коротких периодах. Это расхождение возрастает в сторону низких частот. Такое поведение кривых свидетельствует о геоэлектрической неоднородности среды. Важно обратить внимание, что кривые 1' и 4, ориентированные в одном направлении, существенно различаются между собой. Это также относится к кривым 2' и 3. Так кривые 1' и 4, близкие по форме, расходятся по уровню сопротивлений почти на целый порядок. Кривые 2' и 3 различаются между собой по форме и уровню сопротивлений. В области низких частот кривая 3 имеет нисходящую ветвь почти под 65°. В то же время кривая 2' выражена почти горизонтальной ветвью. Таким образом, мы приходим к выводу, что кривые в МТЗ в пункте наблюдений в сильной мере подвержены влиянию геоэлектрических неоднородностей среды.

Геоэлектрические неоднородности могут быть региональными и локальными. Региональной неоднородностью является контраст электропроводности на побережье Камчатки, на границе суши и океана. Удельное электрическое сопротивление пород на суше составляет первые единицы – тысячи Ом м, а морской воды – десятые доли Ом м. Такой контраст сопротивлений на целые порядки проявляется сильной аномалией электромагнитного поля Земли, кото-

рая получила название берегового эффекта. Береговой эффект вносит сильные искажения в поведение кривых магнитотеллурического зондирования [5].

В районе пункта наблюдения Тундровый морская береговая линия имеет сложные очертания, связанные с Авачинской морской бухтой и Авачинским заливом. Поэтому береговой эффект здесь изучен с помощью трехмерного численного моделирования МТ-поля. В модели верхний слой включает однородный осадочно-вулканогенный слой на суше и неоднородную водную толщу морей и океана, омывающих Камчатку. В основании верхнего слоя лежит стандартный глубинный геоэлектрический разрез. В результате расчетов получены кривые МТЗ по направлениям, отвечающим простиранию и вкрест простирания Камчатки, а также локально-нормальная кривая МТЗ. Полученные кривые приведены на рис. 7. Поперечная кривая представлена восходящей асимптотической ветвью, которая выполаживается в диапазоне периодов 1600–10000 с. Такое поведение кривой связано с береговым эффектом. Продольная кривая МТЗ в области низких частот располагается ниже по уровню сопротивлений относительно локально-нормальной кривой. Максимум продольной кривой проявляется на более ранних периодах. Она дает ложное представление о более проводящем глубинном разрезе. Искажение продольной кривой вызвано индукционным влиянием электрических токов, концентрирующихся в океане. Сравнительный анализ модельных и экспериментальных кривых МТЗ свидетельствует, что как поперечные, так и продольные кривые подобны между собой (рис. 6, 7). В то же время указанные кривые заметно различаются между собой как по уровню сопротивлений, так и по форме. Это различие связано с влиянием локальных геоэлектрических неоднородностей.

Более полное представление о геоэлектрических неоднородностях на линиях 1, 2 и 4, 3 дают полярные диаграммы импеданса. На рис. 8 в качестве примера приведены диаграммы основного и дополнительного импеданса на периоде 1000 с. Полярные диаграммы для линий 1 и 2 (рис. 8а) подобны полярным диаграммам для этих линий, повернутых на 40°, т.е. совмещенными с направлениями линий 4 и 3 (рис. 8б). Различная ориентировка диаграмм импеданса связана с различной ориентацией координатных осей. Обе диаграммы основного и дополнительного импеданса отражают двумерно-неоднородный геоэлектрический разрез. Однако, диаграммы для линий 1', 2' и 4, 3, ориентированных в одних и тех же направлениях, различаются между собой по форме, сжатию и ориентировке (рис. 8б, 8в). Так диаграммы основного и дополнительного импеданса для линий 4, 3 (рис. 8в) отражают трехмерно-неоднородный разрез. Диаграмма дополнительного импеданса для линий 4, 3 имеет овальную форму. Здесь нет направлений, в которых дополнительные импедансы были бы близки к нулевым значениям. Таким образом можно заключить, что геоэлектрические неоднородности прояв-

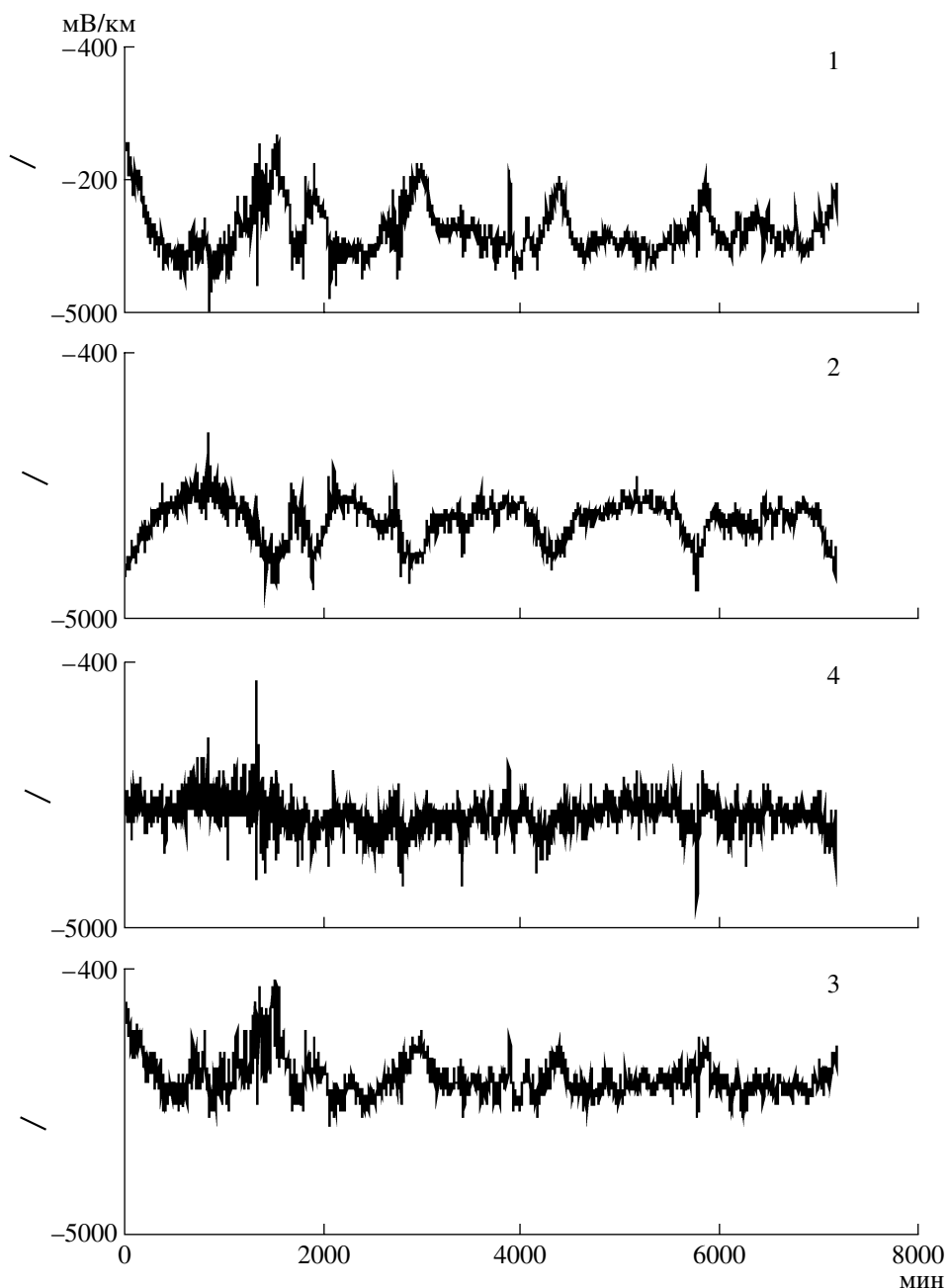


Рис. 4. Графики напряженности электротеллурического поля. Цифрами обозначены номера линий (рис. 3).

ляются различным образом на линиях 1, 2 и 4, 3. Это можно объяснить тем, что геоэлектрические неоднородности являются локальными и могут быть соизмеримы с длиной измерительных линий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Мониторинг электротеллурического поля дает возможность исследовать изменение локальной

геоэлектрической неоднородности во времени. Для этого целесообразно использовать теллурический тензор [8]. Для его определения пригодна программа Дж. Ларсена [10]. Алгоритм этой программы основан на известной робастной методике. Она имеет преимущество в том, что позволяет не только определять передаточные функции, но и эффективно подавлять помехи.

В нашем случае связь между электротеллурическими полями на линиях 1, 2 и 4, 3 представляется в следующем виде:

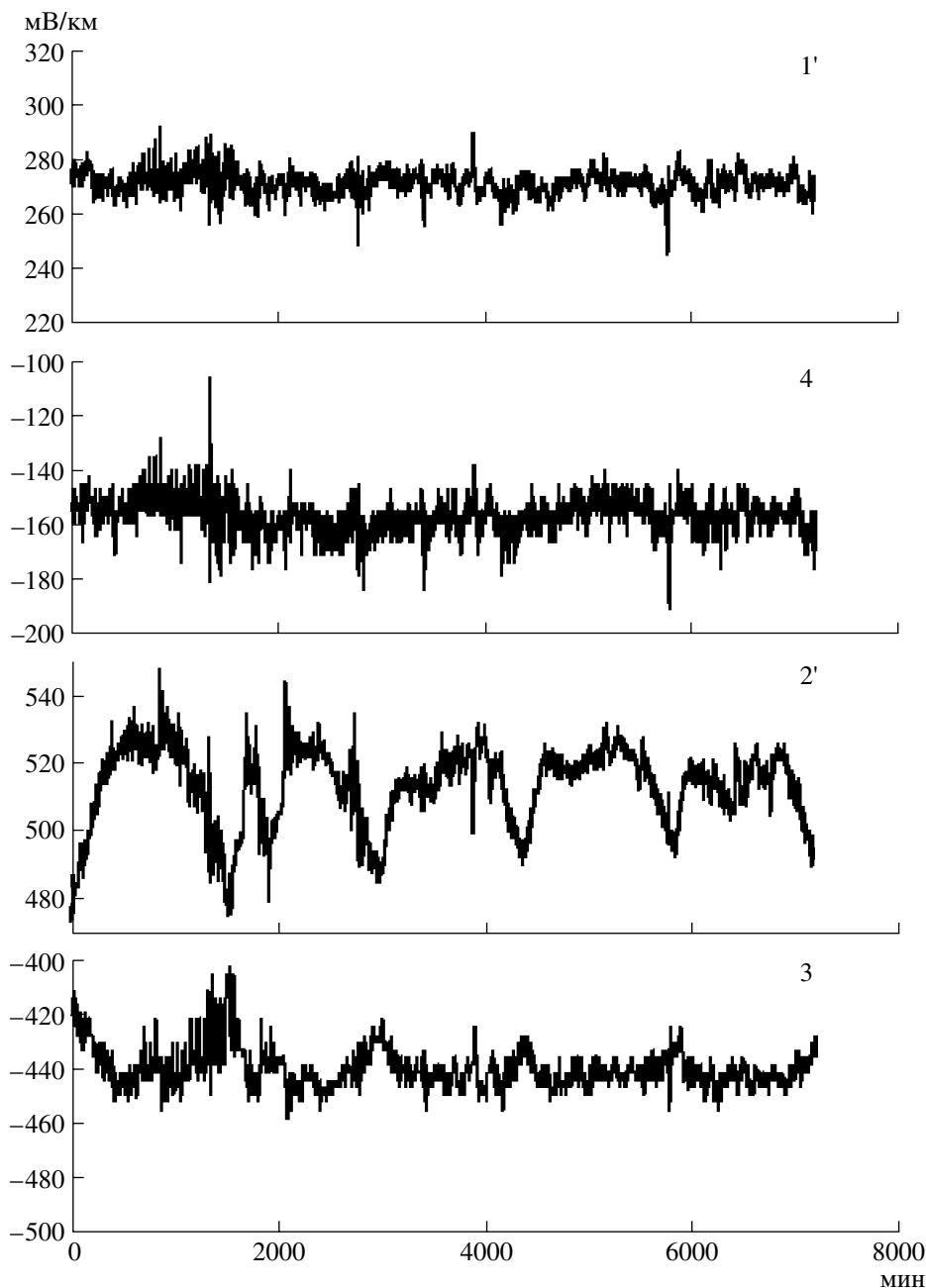


Рис. 5. Сопоставление графиков напряженности электротеллурического поля. Цифрами 1 и 2 обозначены графики, полученные в результате поворота осей координат 1' и 2' на угол 40° против часовой стрелки, т.е. до совпадения с линиями 3 и 4 (рис. 3).

$E_{1,2} = \hat{\tau} E_{4,3}$, где $E_{1,2}$ и $E_{4,3}$ – горизонтальные векторы по каналам 1, 2 и 4, 3, соответственно; $\hat{\tau}$ – теллурический тензор.

Соотношение между векторами в развернутом виде:

$E_1 = t_{YX}E_4 + t_{YY}E_3$, $E_2 = t_{XY}E_4 + t_{XX}E_3$, где E_1 , E_2 , E_4 , E_3 – составляющие электротеллурического поля; t_{XX} , t_{XY} , t_{YX} , t_{YY} – комплексные компоненты теллурического тензора, зависящие от частоты, ориента-

ции координатных осей и распределения удельных электрических сопротивлений.

Обратимся к данным наблюдений электротеллурического поля в пункте Тундровый. Для изучения динамики теллурического тензора создана специальная компьютерная программа, позволяющая из банка многолетних данных электротеллурического мониторинга формировать в автоматическом режиме массивы данных для расчетов компонент тензора. При этом важно выбрать длину временных интер-

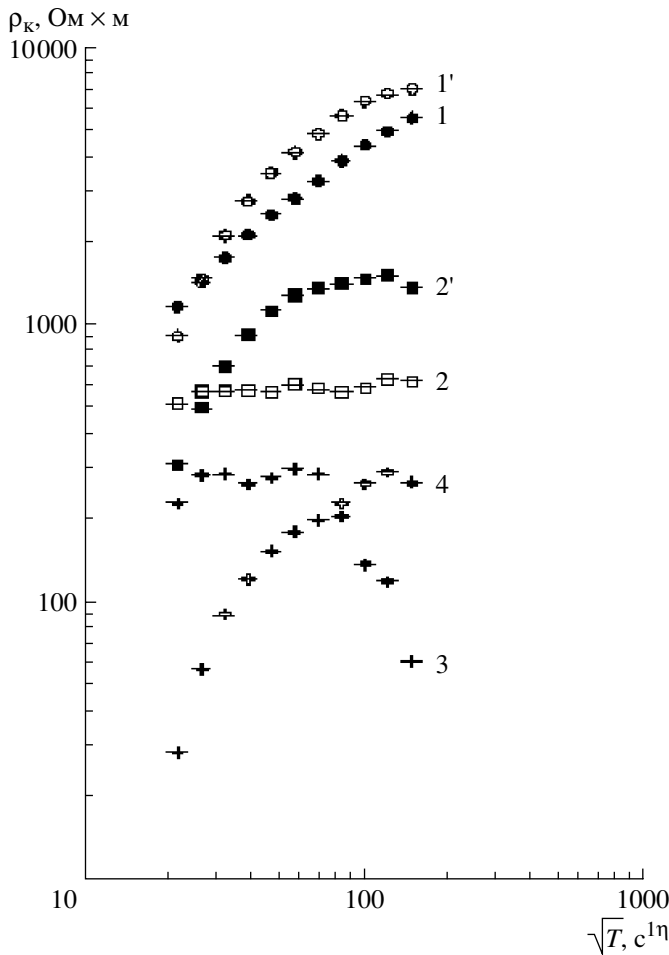


Рис. 6. Кривые МТЗ. Цифрами 1, 2, 3, 4 обозначены кривые по направлениям линий (рис. 3). Цифрами 1 и 2 обозначены кривые, полученные в результате поворота линий 1' и 2' до совмещения с линиями 4 и 3.

валов данных электротеллурического поля. От длины выбранного интервала зависит диапазон периодов, в котором вычисляются компоненты тензора и точность их определения. Компоненты теллурического тензора рассчитаны для временных интервалов равным 1, 3, 5, 10, 20 суткам. Анализ показал, что компоненты тензора получаются более устойчивыми для временных интервалов более 5 сут.

Рассмотрим в качестве примера результаты мониторинга компоненты t_{yy} с 01.01.2001–31.10.2007 годы на периоде 4500 с (временной интервал 10 сут). На рис. 9 представлены графики модуля указанной компоненты теллурического тензора и ее аргумента. В поведении модуля компоненты t_{yy} проявилась в 2006 г. аномалия интенсивностью 40–50%. В то же время в поведении аргумента данной компоненты аномалия не выражена. Это свидетельствует о том, что аномалия связана с гальваническим эффектом в электротеллурическом поле [8]. Аномалия модуля компоненты t_{yy} предвещает сильнейшие зем-

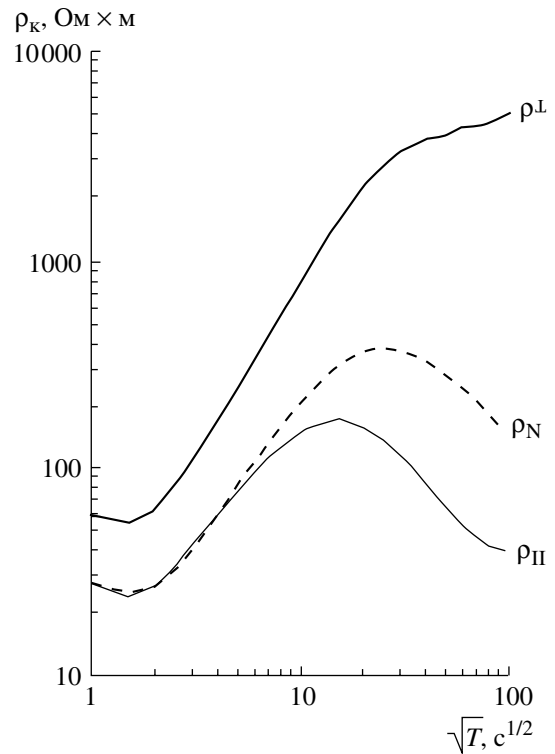


Рис. 7. Модельные кривые МТЗ. ρ^{\perp} , ρ^{\perp} и ρ_N – продольная, поперечная и локально-нормальная кривая МТЗ.

трясения в Курило-Камчатском регионе с $M = 8.3$ (15.11.2006 г.; $\phi^{\circ} - 46.62, \lambda^{\circ} - 153.22$) и $M = 8.2$ (13.01.2007 г.; $\phi^{\circ} - 46.29, \lambda^{\circ} - 154.45$). Они произошли в районе Курильских островов. Не исключается, что данная аномалия связана с изменением локальной геоэлектрической неоднородности, вызванной геодинамическими процессами, предвещающими и сопровождающими эти землетрясения.

Какова природа этой аномалии? Для ответа на данный вопрос рассмотрим теллурический тензор совместно с магнитотеллурическим импедансом, который является передаточной функцией между электрическим и магнитным полями. Связь напряженности электротеллурического поля с напряженностью магнитного поля имеет вид [3]:

$$E_{гор} = \hat{Z} H_{гор},$$

где \hat{Z} – магнитотеллурический импеданс.

В общем случае, в одном пункте наблюдения, $E_{1,2} = \hat{Z} H_{гор}, E_{4,3} = \hat{Z} H_{гор}$, так как правые части уравнений равны, то $E_{1,2} = E_{4,3}$, следовательно $\hat{t} = 1$, т.е. мы располагаем одинаковой информацией в системе каналов 1, 2 и 4 и 3. Опыт многолетних исследований свидетельствует, что магнитотеллурический импеданс в большинстве случаев подвержен влиянию локальных приповерхностных геоэлектрических неоднородностей. Магнитотеллурические им-

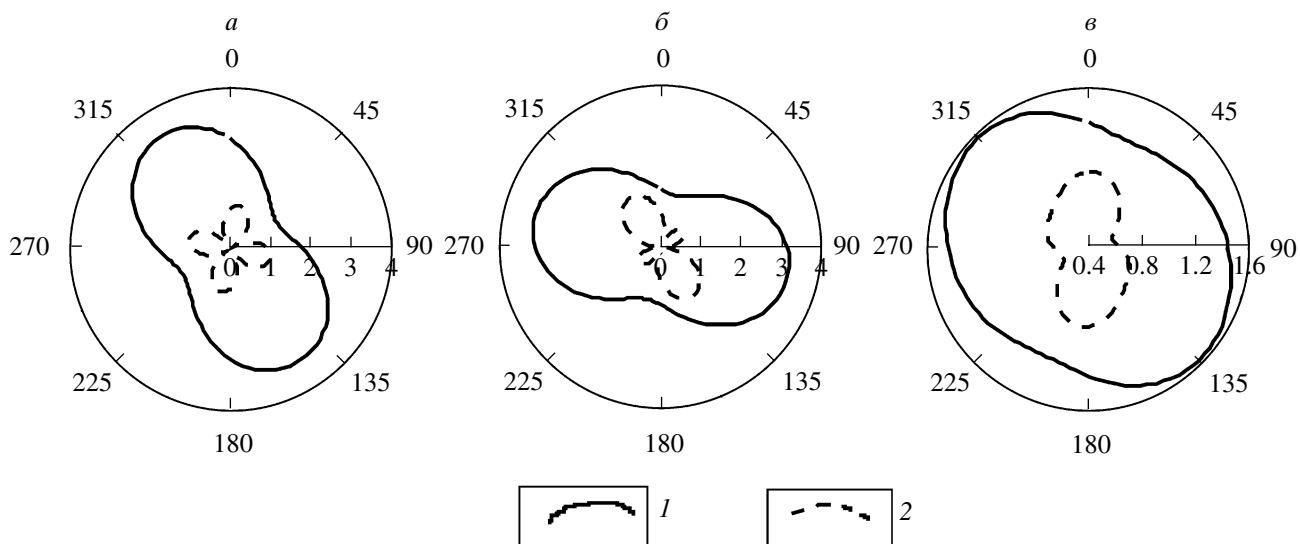


Рис. 8. Импедансные полярные диаграммы. а, б и в – для линий 1, 2; 4, 3 и 1', 2' – соответственно. 1 – диаграммы основного, 2 – дополнительного импеданса.

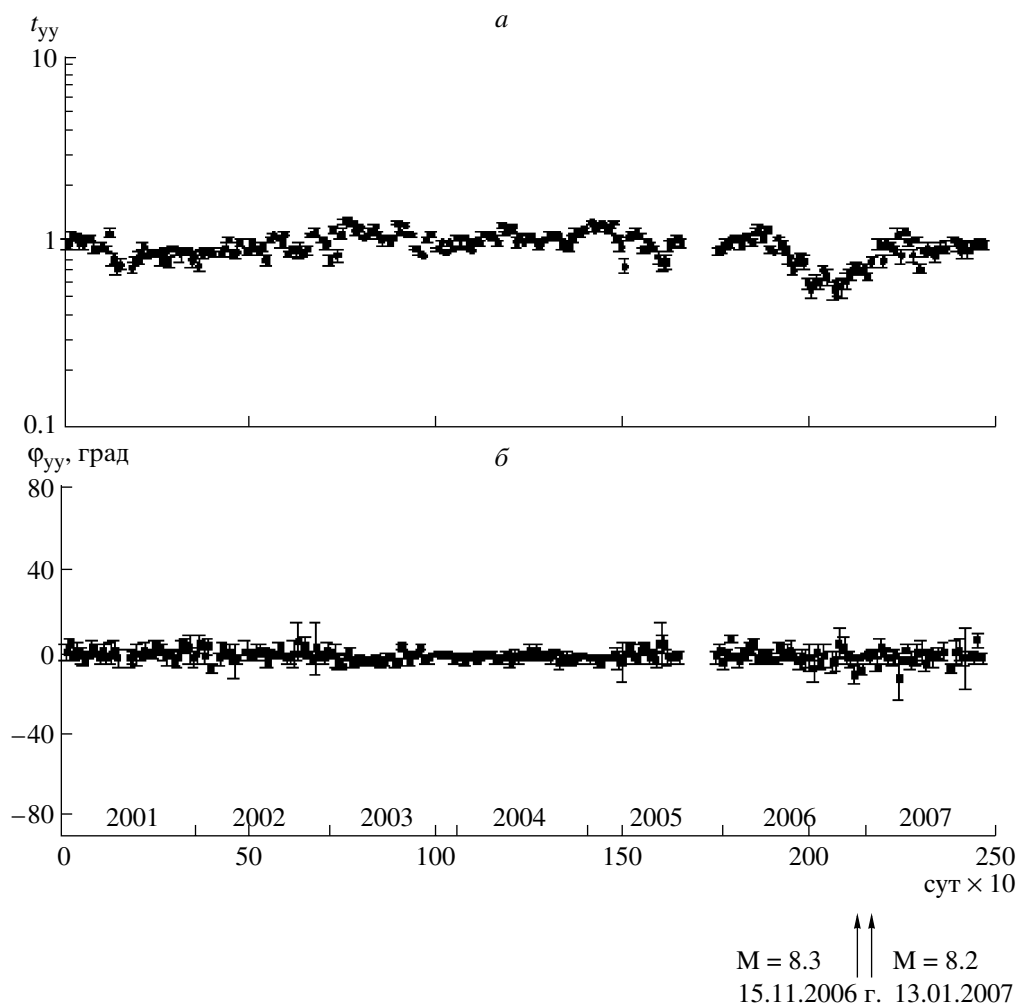


Рис. 9. Графики модуля компоненты тензорического тензора t_{yy} (а) и ее аргумента φ_{yy} (б). На временной оси показаны моменты сильнейших землетрясений ($M = 8.3$ и $M = 8.2$) в районе Курило-Камчатской основной дуги за последние 30 лет.

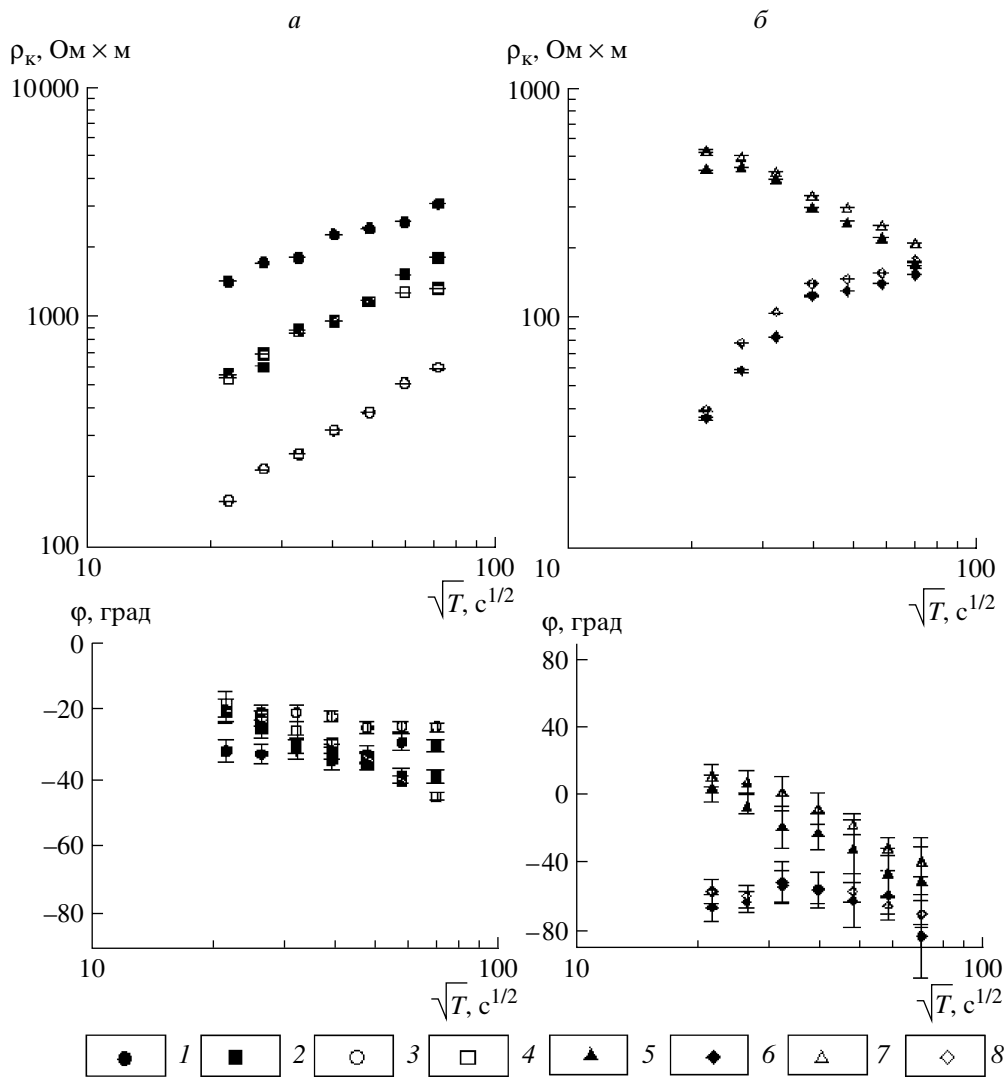


Рис. 10. Сопоставление кривых МТЗ до и в период аномального изменения теллурического тензора. *а* и *б* кривые МТЗ по направлениям С-Ю (линия 1), В-З (линия 2) и С-З (линия 4), С-И (линия 3) рис. 3. Номера условных обозначений отвечают номерам приемных линий на рис. 3: 1 – 1; 2 – 2; 3 – 1; 4 – 2; 5 – 3; 6 – 4; 7 – 3; 8 – 4. Темные значки соответствуют значениям кажущегося электрического сопротивления до аномального изменения электрического поля; светлые – в период аномального изменения.

педансы, полученные на расстояниях в первые сотни метров, различаются часто на порядок [4]. Такие изменения импедансов связаны с повышенной чувствительностью электрического поля, по сравнению с магнитным полем, к локальным геоэлектрическим неоднородностям среды. Таким образом, при мониторинге теллурического тензора в одном пункте мы можем рассчитывать на изменения компонента тензора, вызванные появлением или изменением локальных геоэлектрических неоднородностей в районе измерительных линий 1, 2 или 4, 3. Данная ситуация может возникать при геодинамических процессах, например, при землетрясениях.

Обратимся к кривым магнитотеллурического зондирования. Они получены по данным трехмесячной регистрации электротеллурического поля в пункте

Тундровый и вариаций геомагнитного поля в обсерватории Паратунка. На рис. 10 приведены кривые МТЗ, полученные до возникновения аномалии и в период аномального возмущения, а также видно, что кажущееся сопротивление на приемных линиях 1, 2 изменилось почти в 10 раз во время аномалии и практически не изменилось в то же самое время на линиях 4, 3. Анализ показывает, что это изменение не связано с метеоусловиями. Скорее всего, аномалия теллурического тензора обусловлена изменением локальной геоэлектрической неоднородности среды в районах 1, 2 приемных каналов в связи с изменением минерализации или уровня грунтовых вод или с другими причинами, вызванными геодинамическими процессами.

ВЫВОДЫ

1. Составляющие электротеллурического поля, пересчитанные на другие направления путем поворота системы координат, не всегда совпадают с составляющими электротеллурического поля, полученными в тех же направлениях в природных условиях. Это несовпадение может быть связано с влиянием локальных геоэлектрических неоднородностей, соизмеримых с длиной приемных линий.

2. Наличие локальной геоэлектрической неоднородности в пункте наблюдения дает возможность с помощью мониторинга теллурического тензора контролировать геодинамические процессы, вызывающие изменение электропроводности геологической среды.

3. В пункте Тундровый по результатам многолетнего мониторинга электротеллурического поля по различным направлениям выявлена бухтообразная аномалия в поведении компоненты теллурического тензора, которая предвещает сильнейшие землетрясения ($K = 8.3$ и $K = 8.2$) в районе Курильских островов. Аномалия электропроводности может быть связана с изменением минерализации или уровня грунтовых вод или другими причинами, вызванными геодинамическими процессами, предвещающими сильнейшие землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Выгодский М.Я.* Справочник по Высшей математике. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1963. 870 с.

2. Геология СССР. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. Т. 31. М.: Недра, 1964. 733 с.
3. *Бердичевский М.Н.* Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Наука, 1968. 255 с.
4. *Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г.* Магнитотеллурическое зондирование Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 77–84.
5. *Мороз Ю.Ф., Кобзова В.М., Ладановский Б.Т.* Физическое моделирование магнитотеллурического поля Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 50–56.
6. *Мороз Ю.Ф., Вершинин Е.Ф.* Магнитотеллурический мониторинг сейсмоактивного района Камчатки // Физика Земли. 2001. № 10. С. 63–70.
7. *Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Мороз Т.А.* Глубинная геоэлектрическая модель Петропавловского геодинамического полигона на Камчатке // Физика Земли. 2001. № 6. С. 58–66.
8. *Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А.* Результаты электротеллурического мониторинга на Камчатке в связи с поиском предвестников сильных землетрясений // Физика Земли. 2005. № 3. С. 47–55.
9. *Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Смирнов С.Э.* Электропроводность геологической среды по данным магнитотеллурического мониторинга на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 34–43.
10. *Larsen I.C.* Noise reduction in electromagnetic time series to improve detection of seismicinduced signals // J. Geomagnetism and Geoelectricity. 1997. V. 49. P. 1257–1265.

A Study in the Dynamics of Geoelectric Material from Electrotelluric Field Data

Yu. F. Moroz, T. A. Moroz

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

Possibilities are considered to study the dynamics of geoelectric earth inhomogeneities using receiving lines oriented in different directions at a single site. It is shown that the presence of a local geoelectric inhomogeneity allows monitoring the state of electric conductivity in the earth by observation of the telluric tensor. We quote results from long-continued monitoring of the tensor in Kamchatka. The tensor's behavior showed an appreciable anomaly which may have been related to great (magnitude 8.2 and 8.3) earthquakes in the Kuril-Kamchatka region.