



УДК 550.837

Ю. Ф. Мороз¹, Т. А. Мороз¹, С. Э. Смирнов³

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

² *Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ*

³ *Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО
РАН, с. Паратунка Камчатского края*

Аномальное поведение фазы импеданса в связи с сильными землетрясениями на Камчатке

Рассмотрены данные многолетнего мониторинга низкочастотного магнитотеллурического импеданса в трёх пунктах на побережье Авачинского залива. Основное внимание уделено поведению фазы импеданса, в меньшей мере зависимой от локальных геоэлектрических неоднородностей и характеризующей изменение глубинной электропроводности. Интерпретация данных мониторинга выполнена с привлечением магнитотеллурических зондирований. На всех пунктах за последние 12 лет только в 2009 г. установлено увеличение стандартного отклонения фазы главного импеданса на периодах 500 и 1000 с в несколько раз. С увеличением периода вариаций дисперсия фазы импеданса становится близкой к фону. Обсуждается возможная природа выявленного аномального эффекта. Аномальное поведение фазы импеданса связывается с усилением сейсмичности в зонах поперечного глубинного разлома и сейсмофокального слоя. Предполагается, что активизация глубинных процессов в связи с сейсмичностью привела к неустойчивости во времени электропроводности литосферы, что проявилось увеличенной дисперсией фазы импеданса. Также не исключается, что активизация сейсмичности могла повлиять на литосферно-ионосферные связи, которые привели к неустойчивому определению импеданса.

Методика наблюдений

На побережье Авачинского залива в пп. Шипунский, Тундровый и Верхняя Паратунка осуществляется многолетний мониторинг электромагнитного поля Земли с целью контроля за электропроводностью литосферы сейсмоактивной зоны. Сеть наблюдений включает пункты: Шипунский, Тундровый и Верхняя Паратунка (рис. 1). Расстояние между пунктами — от первых десятков до 150 км. Пункт Шипунский наиболее приближён к сейсмофокальной зоне. На всех пунктах приёмные каналы ориентированы по направлениям С–Ю и В–З, а также по направлениям осей геоэлектрической неоднородности среды (рис. 2.) Длина электрических диполей определяется входным импедансом и интенсивностью магнитотеллурического поля. Измерения составляющих электромагнитного поля Земли проводятся один раз в минуту. Регистрация данных и передача их в центр обработки в г. Петропавловск-Камчатский осуществляется с помощью радиотелеметрической системы измерений. Эксплуатация автоматизированных пунктов наблюдений и предварительная обработка данных осуществляется Камчатским филиалом Геофизической службы РАН.

Характеристика магнитотеллурического импеданса

В основе получения данных об электропроводности литосферы лежит связь между горизонтальными

ми векторами электрического и магнитного полей в пункте наблюдения [1]:

$$\mathbf{E}_{\text{гор}} = [\mathbf{Z}] \mathbf{H}_{\text{гор}}, \quad \text{где} \quad [\mathbf{Z}] = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y, \\ E_y &= Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y, \end{aligned} \quad (2)$$

где $[\mathbf{Z}]$ — тензор импеданса, $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ — комплексные компоненты тензора импеданса, зависящие от частоты, распределения удельных электрических сопротивлений в Земле и ориентации координатных осей.

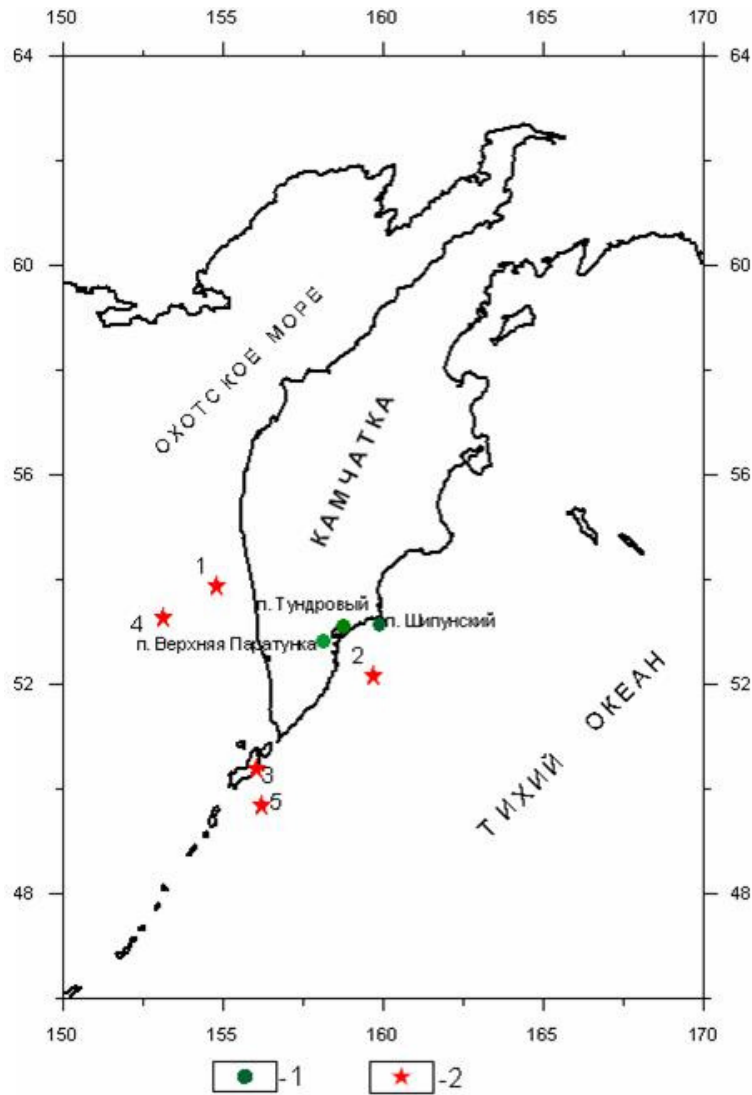
Важной характеристикой тензора импеданса являются его главные направления и главные значения. Они определяются по формуле [6]:

$$Z_p^{\pm} = \frac{Z_1}{2} \pm \sqrt{\frac{Z_1^2}{4} - Z_{\text{эф}}^2}, \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{xy} - Z_{yx}, \\ Z_{\text{эф}} &= \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Главные направления тензора $[\mathbf{Z}]$ находятся по формуле:



| | Дата | Время (UTC) | Широта | Долгота | Глубина, | Класс | Магнитуда |
|----|------------|--------------|--------|---------|----------|-------|-----------|
| 1. | 2008.11.24 | 09:02:53.100 | 53.870 | 154.790 | 559.0 | 16.9 | 7.7 |
| 2. | 2009.01.14 | 05:14:18.970 | 52.166 | 159.704 | 11.1 | 12.5 | 5.5 |
| 3. | 2009.04.21 | 05:26:09.980 | 50.367 | 156.063 | 179.6 | 13.6 | 6.1 |
| 4. | 2009.12.10 | 02:30:55.710 | 53.272 | 153.131 | 597.5 | 14.4 | 6.5 |
| 5. | 2010.02.23 | 10:43:10.040 | 49.688 | 156.210 | 80.4 | 12.7 | 5.6 |

Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдений магнитотеллурического поля и эпицентров землетрясений. 1 – пункты наблюдений МТ-поля; 2 – эпицентры землетрясений. Под рисунком указаны сведения о землетрясениях.

$$\operatorname{tg} 2\theta^{\pm} = 2\operatorname{Re} \gamma^{\pm} / (1 - |\gamma^{\pm}|^2), \quad (5)$$

где $\gamma^{\pm} = (Z_{xy} - Z_p^{\pm}) / Z_{xx}$; θ^{\pm} – угол между главным направлением и осью X. Тензор импеданса характеризует комплексное сопротивление среды (активное, индуктивное, ёмкостное). Комплексные компоненты тензора импеданса можно представить в виде:

$$Z_{xy} = |Z_{xy}| e^{i\varphi_{xy}}; \quad Z_{yx} = |Z_{yx}| e^{i\varphi_{yx}} \quad (6)$$

где $|Z_{xy}|$, $|Z_{yx}|$ и φ_{xy} , φ_{yx} – модули и фазы импеданса.

Модули импеданса преобразуются в кажущиеся электрические сопротивления среды в виде: $\rho_k^{xy} = 0,2T|Z_{xy}|^2$, $\rho_k^{yx} = 0,2T|Z_{yx}|^2$, где T – период вариаций.

Таким образом, по вариациям магнитотеллурического поля можно получить значения кажущегося сопротивления и фазы импеданса по различным направлениям в зависимости от периода вариаций. Следует отметить, что информация о фазе импеданса в значительной мере уточняет и дополняет

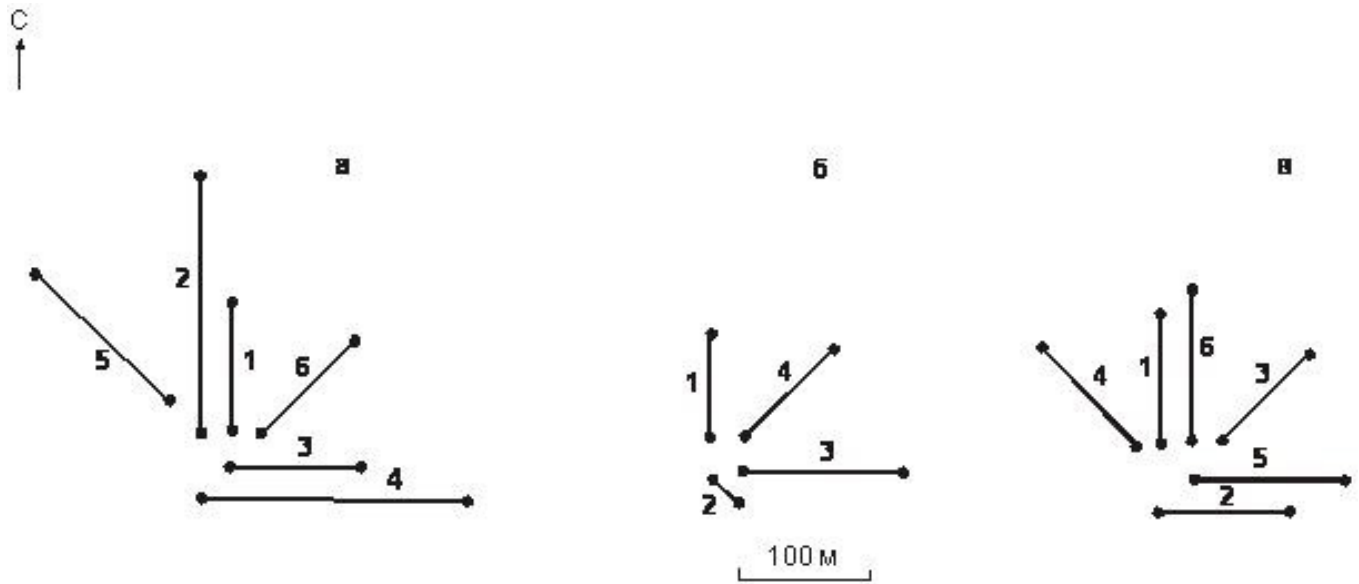


Рис. 2. Схема расположения измерительных линий электротеллурического поля в пп. Шипунский (а), Верхняя Паратунка (б), Тундровый (в). Цифрами обозначены номера линий. Масштаб приведён для измерительных линий.

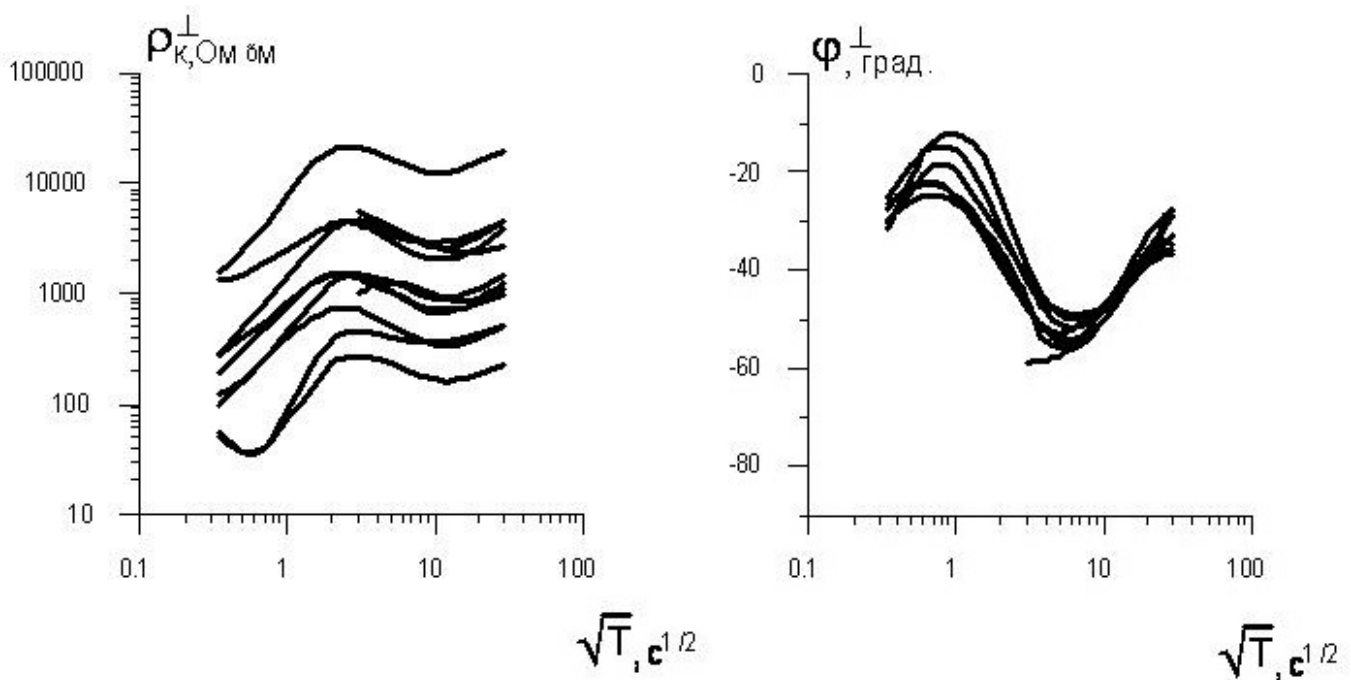


Рис. 3. Семейства поперечных индивидуальных кривых МТЗ.

сведения по данным кажущегося электрического сопротивления. Рассмотрим это на примерах.

Известно, что электрическое поле обладает повышенной чувствительностью к геоэлектрическим неоднородностям среды по сравнению с магнитным полем. Повышенная чувствительность связана с гальваническими эффектами, которые затрагивают амплитудные кривые, но не проявляются в фазовых кривых. В качестве примера на рис. 3. из работы [3] приведены амплитудные кривые кажущегося

электрического сопротивления и фазовые кривые импеданса по одному из районов на Камчатке. На рисунке видно, что амплитудные кривые ρ_k расходятся по уровню сопротивлений почти на 3 порядка. При этом фазовые кривые расходятся незначительно.

Данный эффект назван эффектом ρ . Вторым примером является рис. 4. Здесь приведены амплитудные кривые ρ_k и фазовые кривые импеданса в пункте наблюдений Шипунский для линий MN

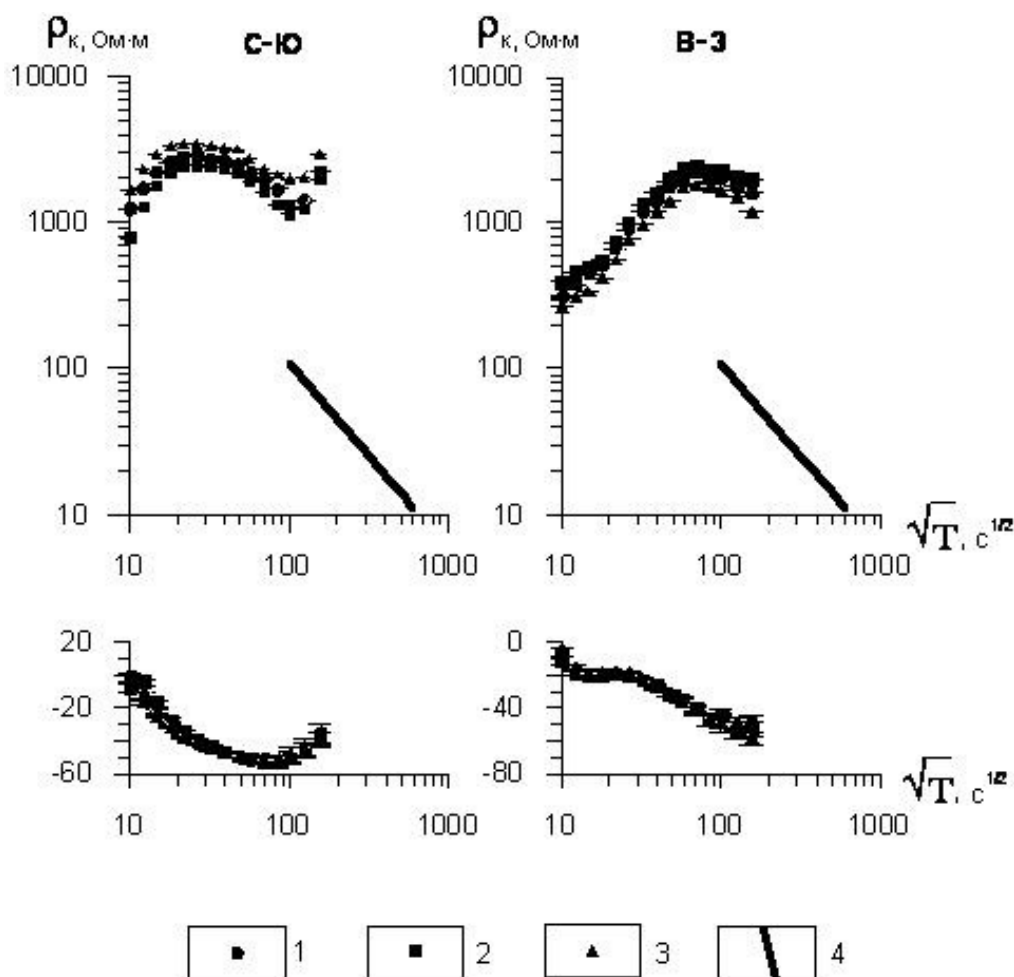


Рис. 4. Совмещенные кривые МТЗ в направлениях С-Ю и В-З в п.Шипунский 1,2,3 — кривые МТЗ для линий 1-3, 2-4, 5-6, соответственно; 4 — стандартная кривая.

различной длины и направления. Данный рисунок наглядно свидетельствует, что влияние локальных геоэлектрических неоднородностей, соизмеримых с длиной приёмных линий, проявляется в расхождении амплитудных кривых кажущегося сопротивления. Однако, оно не выражено в фазовых кривых импеданса, которые слились почти в один график.

Таким образом, мы приходим к важному выводу, который необходимо учитывать при анализе данных мониторинга магнитотеллурического импеданса. Если в поведении временного ряда кажущегося электрического сопротивления (импеданса) выражены вариации, но они не проявляются в фазе импеданса, следовательно, здесь действует эффект ρ , связанный с локальными геоэлектрическими неоднородностями. Если в поведении временного ряда фазы импеданса выражены аномальные изменения, то они свидетельствуют о глубинных изменениях электропроводности геологической среды.

Электропроводность литосферы в пунктах наблюдений электромагнитного поля Земли

Обработка регистраций электромагнитного поля Земли сводится к выделению когерентных вариаций,

составляющих магнитотеллурического поля E_x , E_y , H_x и H_y и определению компонент тензора импеданса. Для этого использована программа, алгоритм которой основан на известной робастной методике, разработанной Дж.Ларсеном [5]. Данная методика спектральной обработки разработана специально для вычисления переходных функций по электромагнитным полям, содержащим поля различного происхождения. Она позволяет не только определять переходные функции, но и эффективно подавлять влияние электромагнитных полей не магнитотеллурического происхождения (солнечно — суточные и приливные гармоники, промышленные шумы и пр.).

Для интерпретации электромагнитного мониторинга необходимы сведения о структуре электропроводности геологических сред в пунктах наблюдений. Такая информация получена путём обработки полугодовых массивов магнитотеллурического поля. Результатами обработки являются тензоры импеданса, которые дают возможность судить о геоэлектрической неоднородности среды. Анализ показывает, что на всех пунктах диаграммы основного импеданса на периодах 100–3000 с имеют овальную

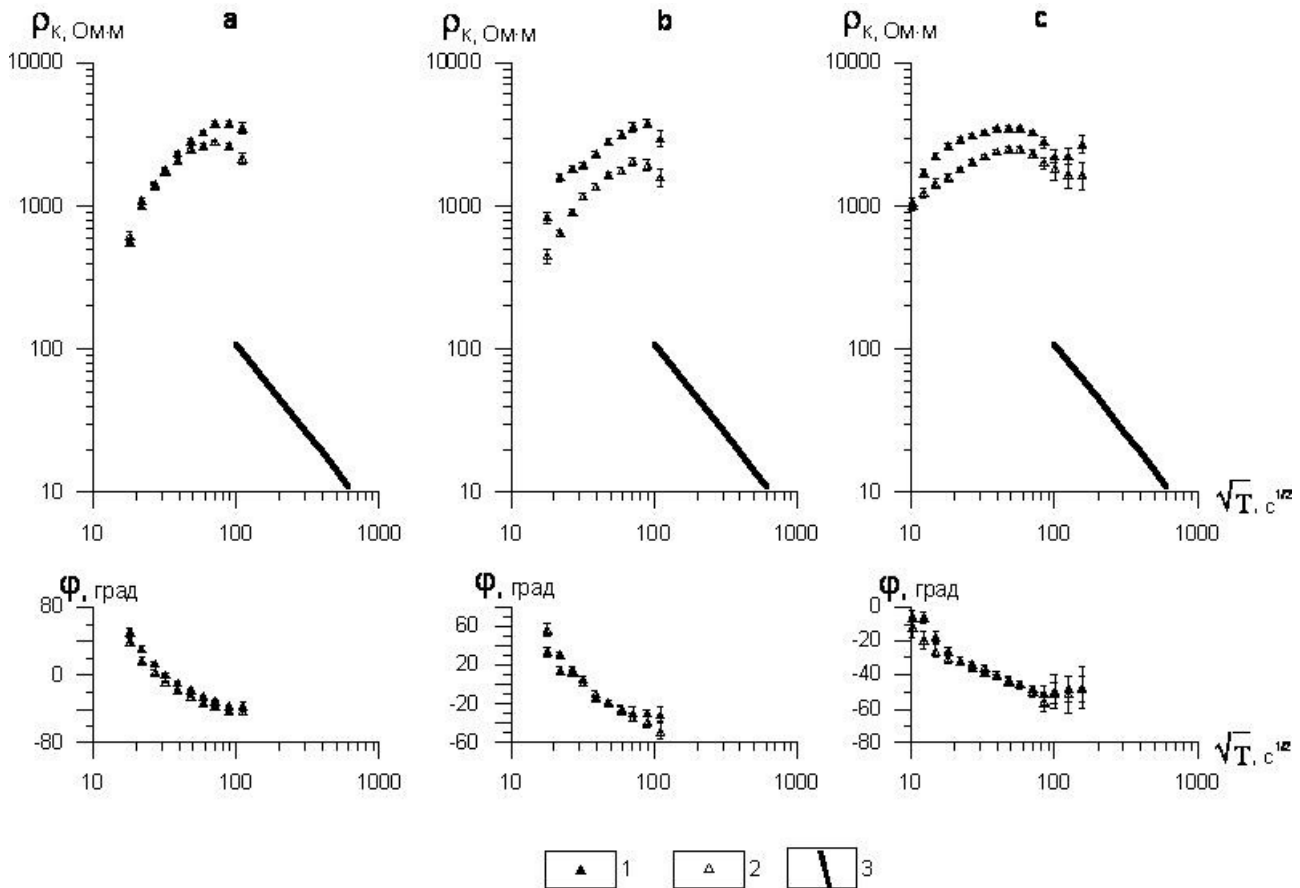


Рис. 5. Совмещенные кривые МТЗ по главным направлениям в п. Верхняя Паратунка (а), Тундровый (б) и Шипунский (в). 1 и 2 — кривые МТЗ по двум главным направлениям 3 — стандартная кривая.

форму, дополнительного импеданса — вид четырёх лепестковой розы. Это свидетельствует о квазидвумерности геоэлектрических разрезов на рассматриваемых периодах. Общее свойство полярных диаграмм основного импеданса выражено в ориентации их больших осей вкrest простирания береговой линии (береговой эффект).

Так, в п. Шипунский диаграммы ориентированы поперёк вытянутого в юго — восточном направлении п-ова Шипунский. В пп. Верхняя Паратунка и Тундровый большие оси диаграмм основного импеданса направлены вкrest простирания береговой черты Авачинского залива. Эта особенность в поведении полярных диаграмм основного импеданса была установлена ранее и подтверждена численным моделированием [4].

Сжатие полярных диаграмм основного импеданса характеризует степень геоэлектрической неоднородности среды. Так, соотношение большой и малой осей диаграмм на периоде 1000 с в п. Шипунский равно 7, в п. Верхняя Паратунка — 20, в п. Тундровый — 2,5. Эти величины свидетельствуют о сильных региональных геоэлектрических неоднородностях. Наряду с ними необходимо иметь в виду локальные геоэлектрические неоднородности, которые проявляются в виде эффекта ρ (шифт-эффект). Анализ показал, что данному эффекту подвержены

амплитудные кривые МТЗ на всех пунктах. Однако фазовые кривые импеданса свободны от действия шифт-эффекта.

Рассмотрим кривые МТЗ по главным направлениям в пп. Шипунский, Тундровый и Верхняя Паратунка. Кривые кажущегося сопротивления и фазы импеданса приведены на рис. 5. Амплитудные кривые показаны в сопоставлении со стандартной кривой кажущегося сопротивления. Характерно, что правые ветви кривых ρ_k расположены выше по уровню сопротивлений относительно стандартной кривой. Это свидетельствует, что кривые ρ_k подвержены влиянию региональных геоэлектрических неоднородностей. К ним можно отнести берег океана, глубинные разломы, дайки и другие крупные геоэлектрические неоднородности в земной коре и верхней мантии. Указанные неоднородности также выражены в поведении фазы. Следует отметить, что фазовые кривые на более высоких частотах отражают глубинные части разреза, чем амплитудные. Это хорошо видно на рис. 5, где на амплитудных кривых выражены только максимум и слабовыраженная нисходящая ветвь, а фазовые кривые уже представлены нисходящей ветвью, отражающей увеличение электропроводности с глубиной. Максимум амплитудных кривых связывается с высокоомной литосферой. Нисходящие ветви

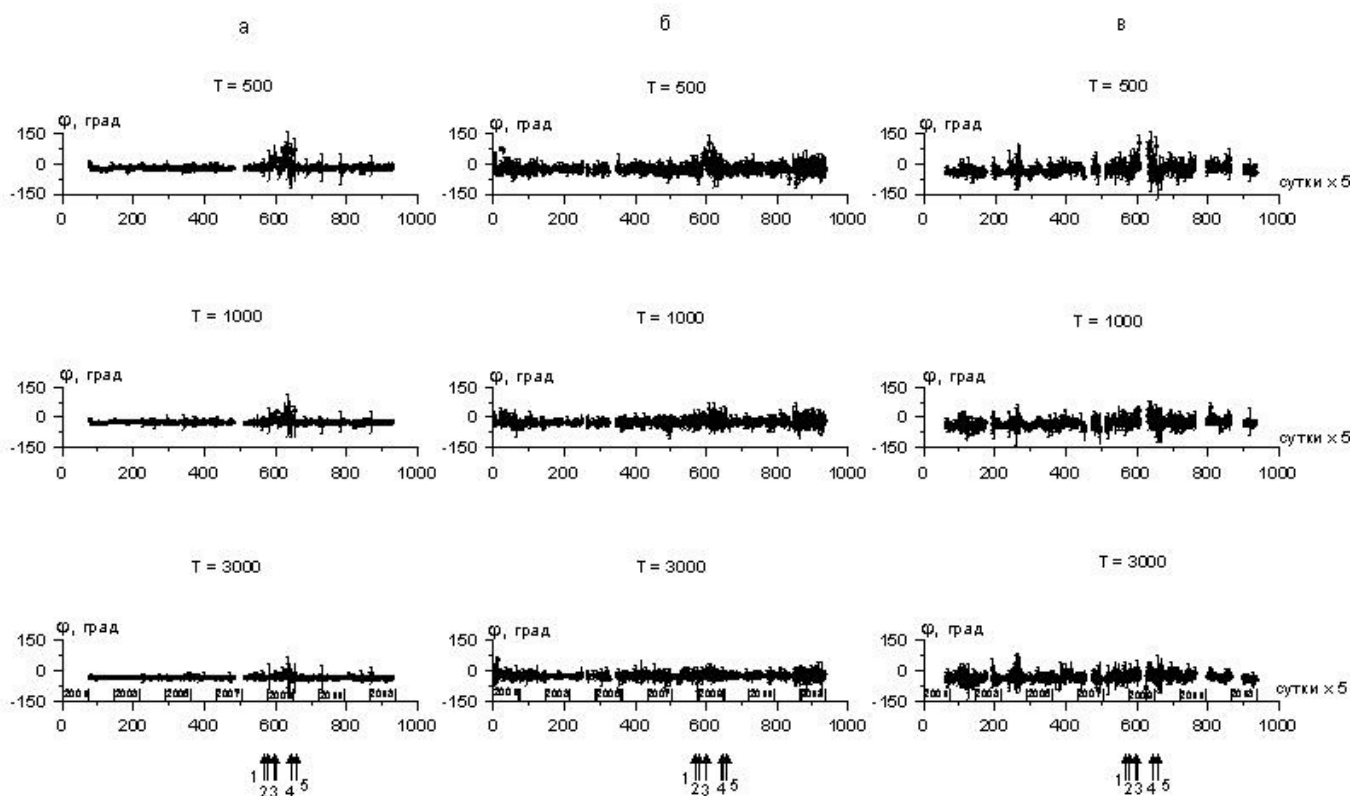


Рис. 6. Временные ряды фазы главного импеданса на периодах 500, 1000 и 3000 с в п.Верхняя Паратунка (а), Тундровый (б) и Шипунский (в). На временной оси показаны моменты землетрясений (см рис. 1).

амплитудных и фазовых кривых, выходящих в минимум, обусловлены проводящей астеносферой.

Результаты мониторинга магнитотеллурического импеданса

Для изучения изменений импеданса во времени важно выбрать период вариаций, на котором он вычисляется более устойчиво. Импедансы можно получить в диапазоне периодов, который определяется длиной временного интервала (массивом данных), используемого для обработки. От величины временного интервала зависит точность определения компонент тензора импеданса. Поэтому необходимо было выбрать оптимальные параметры для мониторинга импеданса. Расчёты выполнены для временных интервалов, равных 1, 3, 5 и 10 суток. Анализ показал, что минимальный временной интервал, на котором можно получить компоненты тензора импеданса с погрешностью в первые проценты, равен 5 суткам. На этом временном интервале импеданс определяется в диапазоне от первых минут до первых часов. Для мониторинга электропроводности литосферы приняты временные ряды на периодах 500, 1000 и 3000 с, на которых модули и фазы импеданса определяются более устойчиво. Длительность временных рядов составляет около 12–13 лет (рис. 6).

Рассмотрим временные ряды фазы импеданса в п. Верхняя Паратунка для линий 1–3, на которых перерывы по техническим причинам минимальны (рис. 6а). На протяжении 12 лет имеется разрыв в наблюдениях только во второй половине 2007 г. Стандартное отклонение фаз главного импеданса на периоде 500 с на 12 летнем временном интервале, за исключением 2009 г., составляет 4–7 град. На периодах 1000 с и 3000 с оно не превышает 7 град. Такое отклонение можно объяснить точностью определения фазы и геологическим шумом, связанным с изменчивостью электропроводности геологической среды во времени. Характерно, что в 2009 г. стандартное отклонение фазы главного импеданса возрастает. На периодах 500, 1000 и 3000 с оно составляет 33, 22 и 8 град., соответственно. Из этих данных видно, что с увеличением периода дисперсия фазы уменьшается.

Аналогичная ситуация во временных рядах импеданса в пп. Тундровый и Шипунский. Обратимся к данным в п. Тундровый (рис. 6б.). Здесь более представительны временные ряды фазы главного импеданса для линий 4 и 6. Из-за технических проблем имеются проблемы в 2004, 2005 гг. По сравнению с п. Верхняя Паратунка стандартное отклонение значений фазы главного импеданса является повышенной и (за исключением 2009 г.) составляет

10–15 град. Это может быть связано с увеличенным уровнем технического и геологического шума. Здесь также проявилась повышенная дисперсия фазы в 2009 г. Стандартное отклонение фазы на периодах 500 и 1000 с составляет 32 и 17 град.

Рассмотрим данные в п. Шипуннский (6в), где мы располагаем более качественными временными рядами фазы импеданса для линий 6 и 5, хотя они имеют ряд пропусков по техническим причинам. Стандартное отклонение фазы главного импеданса во временных рядах (за исключением 2009 г.) не более 15–20 град. на периоде 500 с и до 10–15 град. на периоде 1000 с. В 2009 г. имеются пропуски значительной фазы импеданса в течение нескольких месяцев. По данным в начале и конце 2009 г. дисперсия на периодах 500 и 1000 с возрастает до 40–25 градусо-секунд.

Обсуждение результатов

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что аномальное увеличение дисперсии значений фазы главных импедансов в 2009 г. выражено на всех пунктах наблюдений электромагнитного поля Земли, расположенных на расстоянии до 150 км. Следовательно, выявленный эффект имеет региональный характер. Возникает вопрос о возможной его природе. Рассмотрим подробнее данное явление. Обратимся к кривым магнитотеллурического зондирования в пунктах наблюдений, которые дают информацию о распределении электропроводности в литосфере.

На кривых МТЗ, приведённых на рис. 5., видно, что вариации с $T = 500$ приурочены к восходящей ветви амплитудных кривых, связанных с литосферным слоем повышенного удельного электрического сопротивления. На фазовых кривых вариации данного периода относятся к началу нисходящей ветви, обусловленной астеносферным слоем повышенной электропроводности. Вариации с периодом 3000 с приурочены к максимуму амплитудной кривой и почти к минимуму фазовой кривой, связанному с глубинным проводящим слоем. Из этого анализа можно судить, что увеличенная дисперсия фаз импеданса характерна для высокоомных частей литосферы. В области проводящей астеносферы дисперсия становится близкой к среднему фону за многолетний период.

Попробуем выявить региональный эффект в аномальном увеличении дисперсии фаз импеданса объяснить процессами, связанными с сейсмичностью в районе Камчатского региона. Характерная особенность сейсмичности за последние 13 лет — сильное глубокое землетрясение (24 ноября 2008 г., $M = 7,7$) в Охотском море. Эпицентр этого землетрясения приурочен к предполагаемой зоне поперечного глубинного разлома С–З простирания. На юго-востоке Камчатки разлом в верхних частях земной коры выражен в виде Петропавловск — Малкинской зоны поперечных дислокаций [2]. Предполагается, что глубинный разлом имеет продолжение под Охотским морем в сторону г. Магадан. Упругие волны

от землетрясения зарегистрированы на расстоянии в десятки тысяч километров. Сотрясения от него заметно ощущались в г. Москва.

Рассмотрим в районе Камчатки землетрясения с $M > 5,5$ за период с конца 2008 г. до начала 2010 г. Эпицентры данных землетрясений показаны на рис. 1. Под номером 1 обозначен эпицентр упомянутого сильного глубокого землетрясения в Охотском море. В районе Авачинского залива произошло близкое землетрясение № 2 с $M = 5,5$ и наименьшей глубиной гипоцентра. Эпицентр землетрясения расположен от пунктов наблюдений на расстоянии около 100 километров. Он приурочен также к продолжению зоны поперечного глубинного разлома. Характерно, что глубокое сильнейшее землетрясение (№ 1) и ближайшее землетрясение (№ 2), приближённое к дневной поверхности, близки по времени проявления. Можно предположить, что глубокое сильнейшее землетрясение вызвало активизацию процессов в зоне глубинного разлома и это привело к возникновению близкого неглубокого землетрясения. В результате такой активизации возможно усиление геоэлектрической неоднородности литосферы. Геоэлектрическая среда в период сейсмической активизации является неустойчивой. Также неустойчивой становится связь между вариациями электро-теллурического поля и вариациями геомагнитного поля, что привело к увеличенной дисперсии фаз главного импеданса. Наряду с этим нельзя исключить влияние сейсмичности на литосферно-ионосферные связи. Активизация сейсмичности в зоне глубинного разлома и в сейсмофокальной зоне, могла оказать влияние на литосферно-ионосферные связи. Это приведёт к возникновению магнитотеллурического поля, которое не аппроксимируется плоской волной. В таком случае нарушается связь между горизонтальными составляющими электрического и магнитного полей, что приведёт к увеличению дисперсии импеданса и его фазы.

Список литературы

1. Бердичевский М. Н., Дмитриев В. И. Модели и методы магнитотеллурики. Научный мир. 2009. С. 677.
2. Геология СССР. Том 31. Камчатка, Курильские и Командорские острова. Геологическое описание. М.: Недра, 1964. 733 с.
3. Мороз Ю. Ф., Лагута Н. А., Мороз Т. А. Магнитотеллурическое зондирование Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2008. № 2. С. 83 — 93.
4. Мороз Ю. Ф., Мороз Т. А. Численное трёхмерное моделирование магнитотеллурического поля Камчатки // Физика Земли. 2011. № 2. С. 64–71.
5. Larsen I. C., Mackie R. L., Manzella A., Fiodelisi A., Rieven S. Robust smooth magnetotelluric transfer functions // Geophysical Journal International. 1996. Vol. 124. P. 801–819.