

УДК 550.436;551.510.522;551.510.535

ВАРИАЦИИ СПЕКТРОВ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ НА КАМЧАТКЕ

© 2003 г. Ю. М. Михайлов¹, Г. А. Михайлова¹, О. В. Капустина¹, А. В. Бузевич², С. Э. Смирнов²¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН,
г. Троицк (Московская обл.)²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский (Камчатская обл.)

Поступила в редакцию 10.12.2002 г.

Впервые выполнен спектральный анализ суточных вариаций квазистатического электрического поля E_z приземной атмосферы. В вариациях спектра мощности E_z в “хорошую погоду” выделены две полосы собственных периодов колебаний атмосферы с $T = 1-5$ и $6-24$ ч. Это моды внутренних гравитационных и приливных волн в нижней атмосфере. Моды акустических волн в спектрах E_z не обнаружены. В дни с осадками уровень спектральной мощности E_z возрастает на порядок. В период подготовки землетрясения с аномалией в суточном ходе E_z интенсивность гармоник с $T = 1.8; 2.2; 3.8$ ч на порядок и более возросла по сравнению со спектрами E_z в “хорошую погоду”. Одновременно появились две дополнительные спектральные полосы с $T = 0.6$ и 1 ч.

1. ВВЕДЕНИЕ

Аномальные изменения квазистатического электрического поля E_z в приземной атмосфере перед землетрясениями с магнитудой $M \geq 4$ были зарегистрированы во многих сейсмоактивных регионах Земли. Обычно они возникают с интервалом от нескольких часов до суток перед главным толчком и проявляются либо в виде бухтообразного ослабления величины поля вплоть до смены знака, либо в виде пакета колебаний длительностью ~ нескольких часов. Результаты этих наблюдений обобщены и проанализированы в обзоре [Руленко, 2000], которые позволили установить, что оба вида аномалий E_z вызываются деформационными процессами в приповерхностных слоях земной коры в подготовительную фазу землетрясений. По-видимому, особенности обоих видов аномалий могут быть обусловлены геоструктурой верхних слоев коры в различных сейсмоактивных регионах. На Камчатке в течение нескольких лет регистрировались аномалии преимущественно первого вида и связывались с выходом радона Rn из подпочвенных газов в атмосферу, изменяющим ее проводимость и, следовательно, величину E_z [Руленко и др., 1992; Руленко и др., 1996; Бузевич и др., 1998; Смирнов, 2001]. Эти результаты, а также данные, полученные в других сейсмоактивных регионах, послужили основанием предполагать, что главным фактором, модифицирующим ионосферу по всей ее толще в подготовительную фазу землетрясений, является квазистатическое электрическое поле приземной атмосферы [Моргунов, 1988; Пулинец и др., 1998; Михайлов и др., 1999]. Предложены и другие тео-

ретические модели литосферно-атмосферно-ионосферного взаимодействия, включающие в себя электромагнитные явления, внутренние гравитационные волны, акустические волны, сторонние токи и токи смещения в глобальной атмосферно-электрической цепи. Критический анализ возможных моделей взаимодействия дан в работе [Сорокин и др., 1999].

Экспериментальная проверка предложенных теоретических моделей представляет несомненный интерес и возможна только в комплексных наземных наблюдениях с одновременной регистрацией большого набора геофизических параметров. Первые наблюдения такого типа на Камчатке были выполнены перед Кроноцким землетрясением [Бузевич и др., 1998]. Позже, дополненные регистрацией эффектов в ионосфере, они были проведены в 1999 г. [Михайлов и др., 2002]. Предварительные результаты анализа комплексных наблюдений показали следующее. В суточном ходе E_z при осадках наблюдаются бухтообразные понижения величины поля, подобные эффектам землетрясений в ясную погоду. В среднесуточных вариациях E_z и концентрации Rn не была установлена ожидаемая взаимосвязь. Аномалии E_z и критических частот $foF2$ не совпадали между собой ни по длительности явления, ни по времени упреждения момента главного толчка землетрясения.

В этой связи представляло интерес более детально исследовать каждый из геофизических параметров в различных метеорологических, геомагнитных и сейсмологических условиях и попытаться установить причинно-следственные связи в их спектральных характеристиках. Ниже приве-

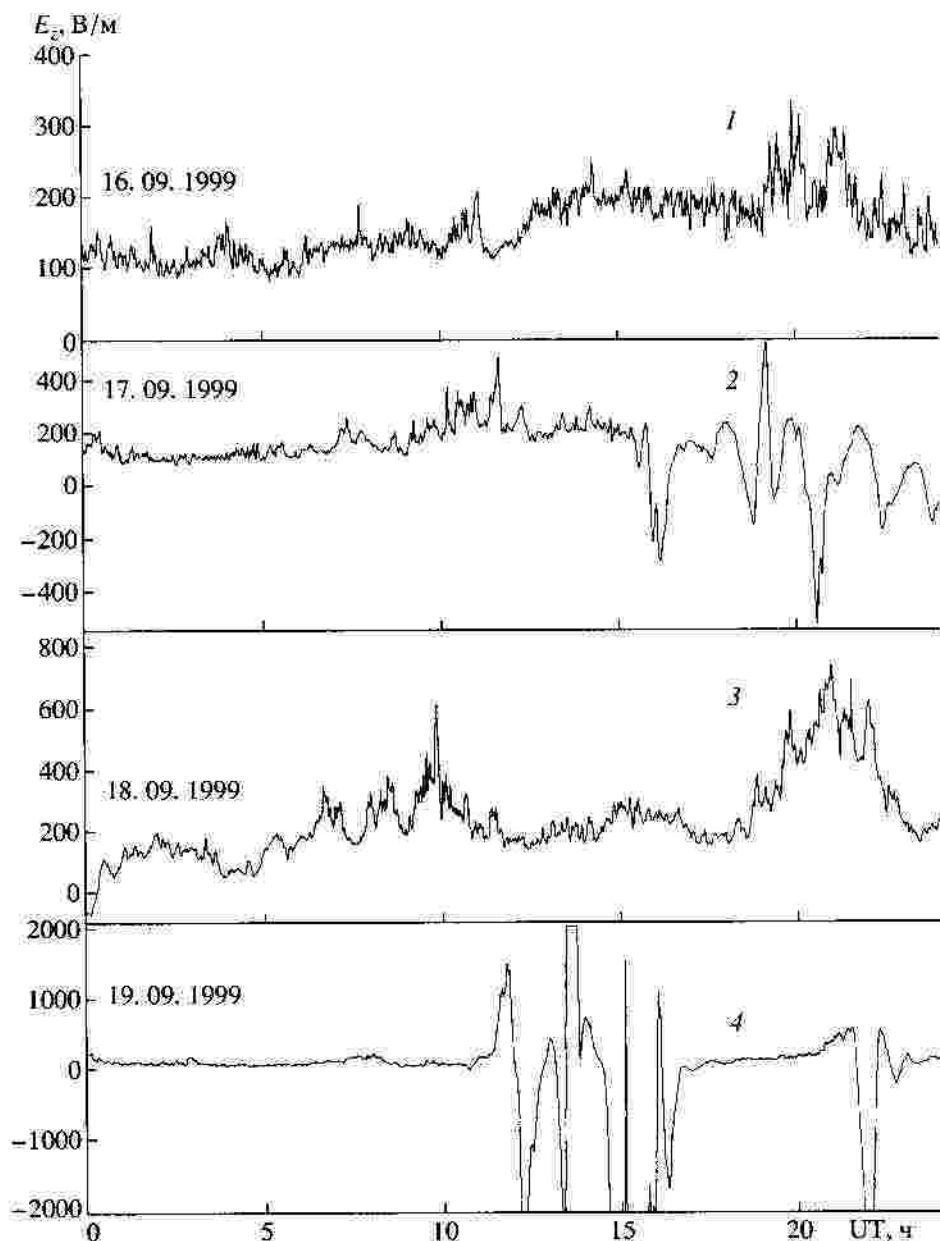


Рис. 1. Типичные суточные вариации величины квазистатического электрического поля E_z приземной атмосферы: 1–3 – дни без осадков; 2 – накануне землетрясения; 3 – в день землетрясения; 4 – день с сильными осадками.

дены результаты анализа спектров мощности квазистатического электрического поля E_z . Результаты спектрального анализа других геофизических параметров, измеренных одновременно с E_z , будут опубликованы позже.

2. ИСХОДНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ ОБРАБОТКИ

На рис. 1 приведены типичные суточные вариации E_z , измеренные с шагом 1 мин, в дни “хорошей погоды” (кривые 1 и 2), в день землетрясения (кривая 3) 18 сентября 1999 г. 21.28 : 33.17 UT, $\varphi =$

$= 51.21^\circ\text{N}$, $\lambda = 157.56^\circ\text{E}$, $h = 60$ км, $K = 13.4$ ($M = 6.0$) и кривая 4 с сильными осадками. Как видно из кривой 1, в суточном ходе выделяется небольшой максимум в утренние часы, связанный с температурным градиентом, более слабый вечерний максимум, спокойный ход днем и ночью, при этом дневной уровень E_z несколько ниже ночного при среднем значении $E_z \sim 120$ В/м. 17 сентября, за сутки до землетрясения на кривой E_z наблюдалась бухта пониженных значений E_z с возрастанием среднего значения до 200 В/м. В день с осадками 19 сентября величина E_z в течение ~ 6 ч уменьшилась до -2×10^3 В/м. Следовательно, если принять

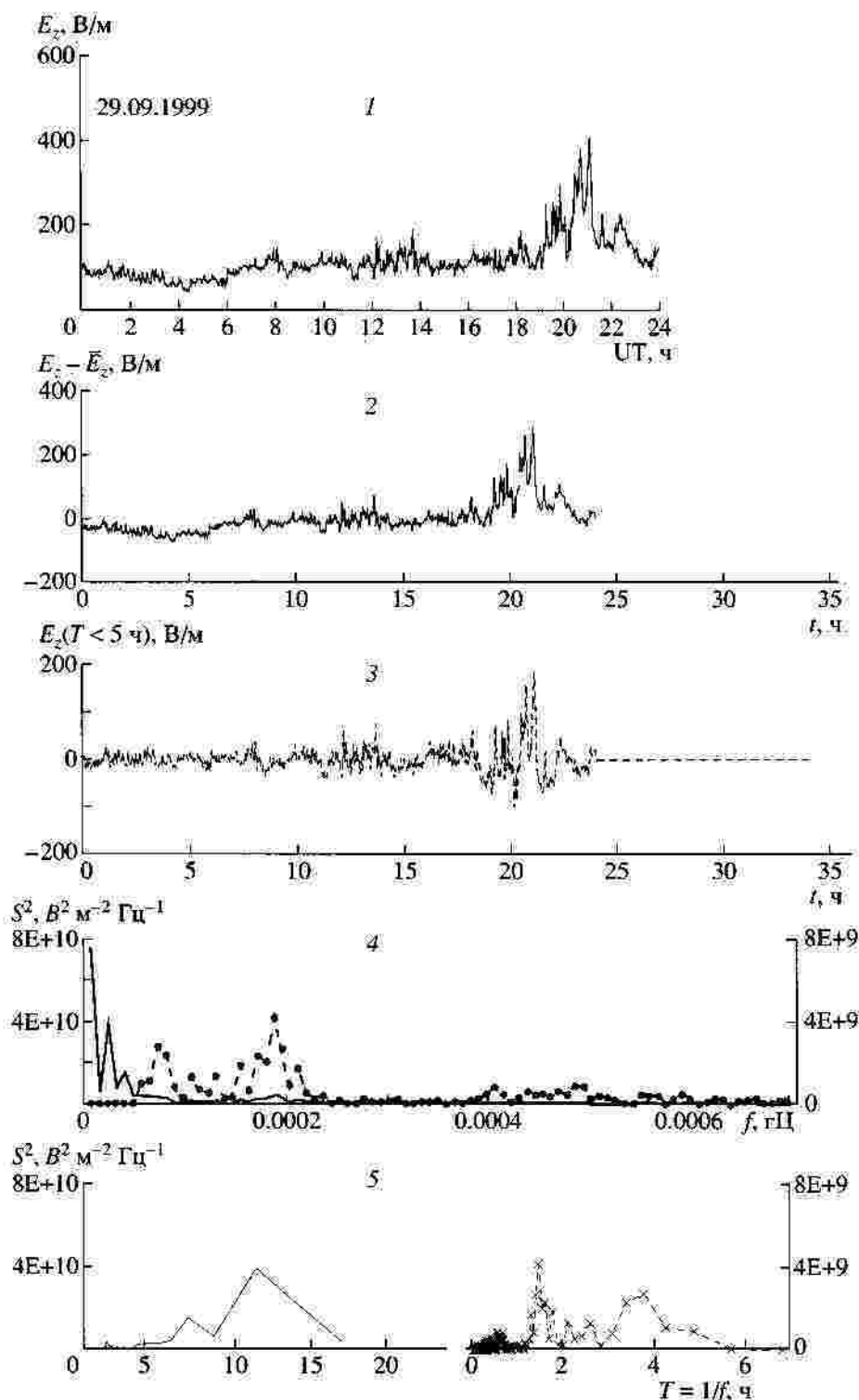


Рис. 2. Метод спектральной обработки суточных вариаций E_z (подробнее см. текст).

бухтообразное понижение E_z как предвестник землетрясения, то отделить этот эффект во временных рядах от эффектов, вызванных осадками, не представляется возможным. В день землетрясения и особенно в его момент на кривой 2 наблюдалось усиление поля E_z и более возмущенное его поведение

по сравнению с 16 сентября, связанное с повышением температуры воздуха и выносом объемных зарядов вверх. Это, как известно, уменьшает проводимость атмосферы и приводит к росту E_z .

Рис. 2 демонстрирует метод спектральной обработки суточных данных E_z на примере 29 сентяб-

ря 1999 г. Верхняя кривая 1 – это суточный ход E_z с дискретностью $\Delta t = 1$ мин. Следующая вниз кривая 2 – суточный ход с исключенным из кривой 1 среднесуточным значением E_z . На этой кривой отчетливо видна полусуточная волна с дневной амплитудой, меньшей, чем ночная. Эти значения дополнены нулями до 2048 точек, необходимых для использования алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Спектр мощности дополненного ряда значений E_z рассчитывается методом периодограмм с прямоугольным временным “окном” на частотах $f_k = k\Delta f$ с соответствующим шагом по частоте $\Delta f = 1/2048\Delta t = 8.14 \times 10^{-6}$ Гц и периодами $T_k = 1/f_k$, где $k = 1, 2, \dots, 1024$. Он и показан на рисунке с цифрой 4 сплошной кривой с левой осью ординат. В этом спектре преобладает гармоника с периодом $T = 12$ ч, а также присутствуют более слабые по интенсивности гармоники с периодами 1–5 ч. Для их выделения в спектре исключены периоды более 5 ч (штриховая линия с точками, правая ось ординат на том же рисунке). Временная форма отфильтрованного ряда представлена кривой под цифрой 3. Для наглядности внизу рисунка (цифра 5) показаны отдельно спектры в зависимости от периода от 5 до 24 ч (слева), а также с $T < 5$ ч (справа).

3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанным выше методом был выполнен спектральный анализ суточных кривых E_z за сентябрь–октябрь 1999 г. Естественно, что вид спектров изменялся ото дня ко дню. Для получения статистически надежных спектров и выделения устойчивых максимумов было использовано осреднение данных по числу дней с характерными особенностями поведения E_z . Это дни без осадков и землетрясений, когда вариации спектров могут быть вызваны глобальными эффектами в земной коре данного региона и, следовательно, в приземной атмосфере. Локальные источники вариаций E_z и их спектров – это местные метеоявления и землетрясения. Для контроля на рис. 3 приведены данные по осадкам за период наблюдений.

Результирующие усредненные спектры для дней без осадков (22 дня, кривая 1) и с осадками (11 дней, кривая 2) показаны на рис. 4 ($T < 5$ ч) и 5 ($5 \text{ ч} < T < 24 \text{ ч}$) вместе с отдельным спектром 17 сентября (кривая 3). Вертикальными отрезками на кривых 1 и 2 нанесены среднеквадратические отклонения.

На кривой 1 видна тенденция ослабления спектра от $\sim 2.5 \times 10^9 \text{ В}^2/\text{м}^2 \text{ Гц}$ на $T \sim 4$ ч до $\sim 2 \times 10^8 \text{ В}^2/\text{м}^2 \text{ Гц}$ на $T \sim 1$ ч без уверенного выделения изолированных всплесков по уровню 0.5 от максимального значения.

На кривой 2 характер спектра изменился незначительно: выделяется усиление энергии на $T \sim 4$ ч и

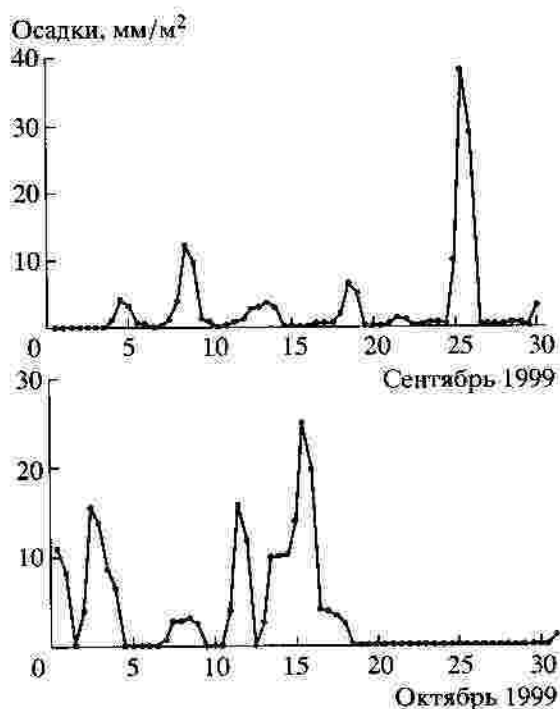


Рис. 3. Изменение уровня осадков, измеренного два раза в сутки в течение сентября–октября 1999 г.

~ 2 ч, но уровень мощности возрос в два раза по сравнению с кривой 1, при очень большой величине среднеквадратических отклонений, указывающих на сильную изменчивость индивидуальных спектров.

И, наконец, кривая 3 представляет индивидуальный спектр мощности E_z 17 сентября 1999 г. в отсутствие осадков, но с аномалией в суточном ходе (см. рис. 1). На этой кривой четко выделяются следующие особенности:

1. Наличие спектральных полос (по уровню 0.5 от максимума) на $T = 0.6; 1; 1.8; 2.2; 3.8$ ч.
2. Интенсивность в максимумах этих полос на порядок и более превышает соответствующие значения в дни без осадков.
3. Появление спектральных максимумов на периодах менее 2 ч.

На рис. 5 приведены усредненные спектры мощности E_z на $T > 5$ ч, полученные аналогичным методом. В дни без осадков практически каждые сутки выделяются гармоники с периодами $T = 6-8$ и $\sim 11-12$ ч. В усредненной кривой 1 они также проявляются. В дни с осадками возрастает общий уровень мощности более, чем на порядок, увеличивается разброс отдельных значений, но при этом все-таки выделяются указанные выше гармоники. Особое поведение индивидуального спектра мощности поля 17 сентября (кривая 3), на котором видна гармоника с $T \sim 6$ ч, полусуточная гармоника с $T = 12$ ч подавляется и резко возрастает интенсивность на $T > 12$ ч.

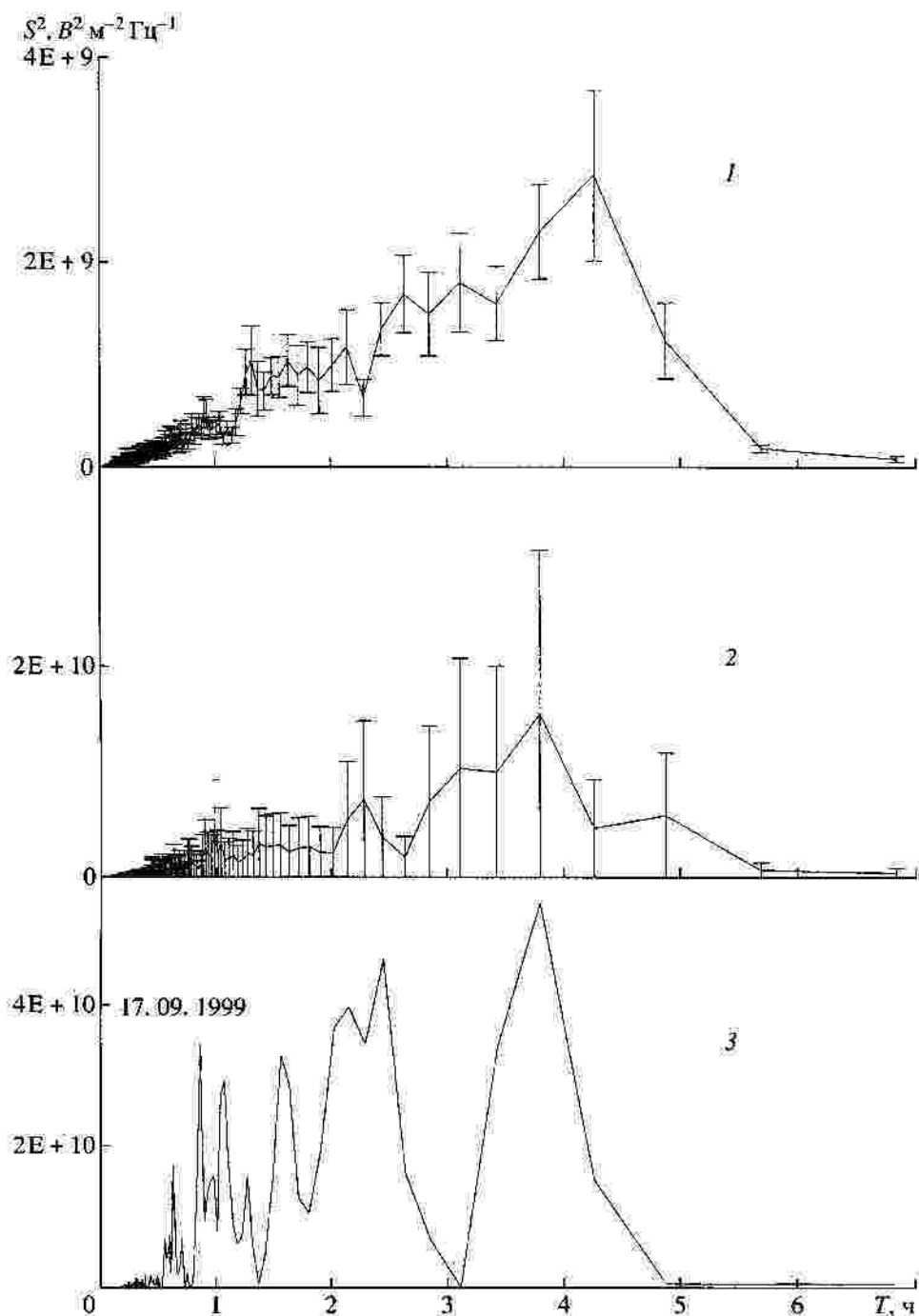


Рис. 4. Усредненные спектры мощности электрического поля E_z в полосе периодов менее 5 ч в дни без осадков (кривая 1), с осадками (кривая 2) и 17 сентября с аномалией E_z в суточном ходе (кривая 3).

Для выделения гармоник с периодами $T > 12$ ч были рассчитаны спектры удлиненного ряда исходных данных с дискретностью по времени $\Delta t = 1$ ч только для дней с хорошей погодой, т.е. 1–4 сентября, 20–24 сентября, 20–24 октября, 25–29 октября. Результирующий спектр, усредненный по этим дням, приведен на рис. 6. Как видно, на кривой четко выделяются максимумы с $T \sim 10, 12, 24$ ч.

В период сентябрь–октябрь на Камчатке, кроме 18 сентября, произошли еще два землетрясения, в зону подготовки которых попадал пункт регистрации E_z . Это 5 октября, 05.01 : 35.94 UT, $\varphi = 51.21^\circ\text{N}$, $\lambda = 157.61^\circ\text{E}$, $h = 76$ км, $K = 13$ ($M = 5.6$) и 18 октября, 20.49 : 47.92 UT, $\varphi = 51.30^\circ\text{N}$, $\lambda = 157.12^\circ\text{E}$, $h = 138$ км, $K = 12.3$ ($M = 4.8$). Однако, как видно на рис. 3, в эти дни были зарегистриро-

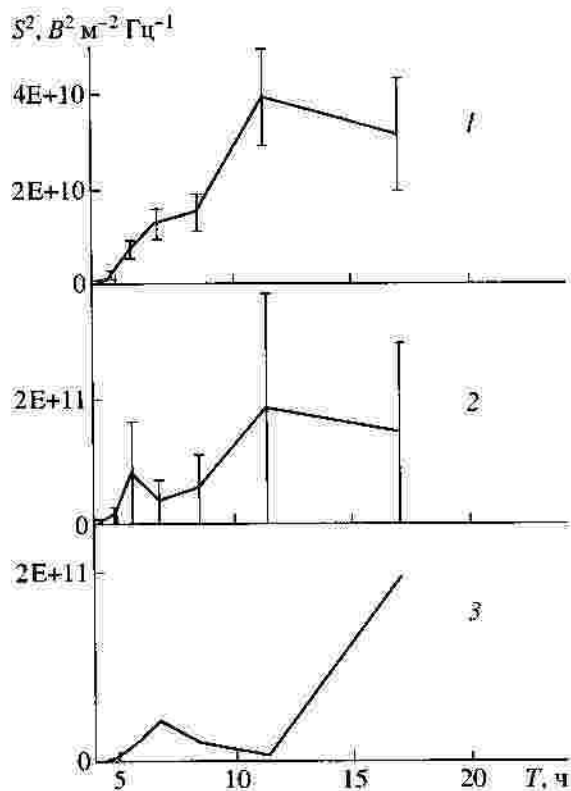


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, но в полосе периодов, превышающих 5 ч.

ваны осадки, которые, вероятно, экранировали эффекты в E_z , вызванные другими источниками.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Непрерывные измерения вариаций квазистатического электрического поля E_z с дискретностью 1 мин позволили исследовать тонкую структуру спектров мощности с периодами от 4 мин и выше. Анализ суточных вариаций E_z за интервал сентябрь–октябрь 1999 г. выявил присутствие двух спектральных полос с периодами $T = 1-5$ ч и $6-24$ ч. В условиях “хорошей погоды” в первой полосе нет четко выделенных максимумов (по уровню 0.5), но есть тенденция ослабления интенсивности при уменьшении периода от 5 до 1 ч. Как известно, это периоды внутренних гравитационных волн, которые отчетливо проявляются в сейсмогравитационных колебаниях Земли и связанных с ними возмущениях давления в приземной атмосфере [Гармаш и др., 1989; Петрова, 1999]. Совпадение спектров мощности E_z с вариациями спектров сейсмогравитационных колебаний Земли позволяет утверждать, что вариации E_z сейсмической природы. Если принять “поршневой” механизм генерации колебаний атмосферного давления колебаниями поверхности Земли [Гармаш и др., 1989], то можно ожидать аналогичные вариации

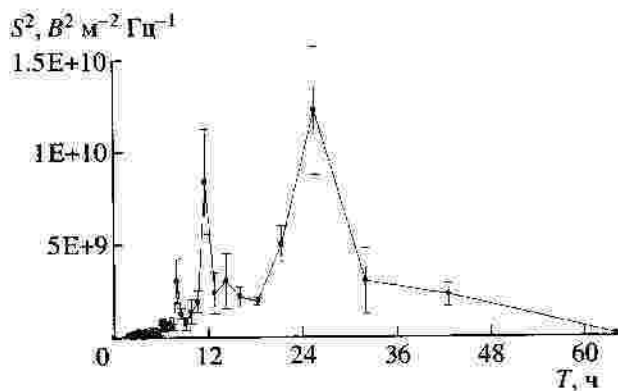


Рис. 6. Усредненный спектр мощности электрического поля E_z с периодами $2 < T < 60$ ч для дней с “хорошей погодой” в период с 1 сентября по 29 октября.

спектров концентрации радона в подпочвенных газах.

Во второй полосе спектров четко выделяются гармоники с $T = 8, 12, 24$ ч. Это приливные волны в нижней атмосфере, связанные с вариациями температуры подстилающей поверхности. Их интенсивность одного порядка и ниже интенсивности внутренних гравитационных волн.

За сутки до землетрясения 18 сентября 1999 г. в спектре мощности E_z четко (по уровню 0.5 от максимума) выделились 5 полос с $T = 0.6; 1; 1.8; 2.2; 3.8$ ч. Интенсивность их возросла на порядок и более, особенно на $T < 3$ ч, по сравнению со спектрами E_z в дни без осадков. Более того, появились полосы на $T = 0.6, 1$ ч. Подобные спектральные структуры в полосе 1–5 ч и их усиление в вариациях сейсмогравитационных колебаний Земли и одновременных вариациях давления приземной атмосферы перед сильными землетрясениями наблюдались в работе [Линьков и др., 1990]. Совпадение спектров E_z с результатами этой работы свидетельствует о том, что не только спокойные суточные вариации E_z , но и аномалии перед землетрясениями имеют одинаковую сейсмогравитационную природу.

5. ВЫВОДЫ

1. Впервые выполнен тонкий спектральный анализ суточных вариаций квазистатического электрического поля (E_z) приземной атмосферы.
2. В вариациях спектра мощности E_z выделены собственные частоты колебаний атмосферы в двух полосах с $T = 1-5$ и $6-24$ ч в условиях “хорошей погоды”. Первая из них включает в себя моды внутренних гравитационных волн (ВГВ) в нижней атмосфере, а вторая – приливные волны.
3. В период подготовки землетрясения интенсивность полос с $T = 1.8; 2.2; 3.8$ ч на порядок и более выросла по сравнению со спектрами в “хоро-

шую погоду". В этот период выделены две дополнительные спектральные полосы с $T = 0.6; 1$ ч.

4. Экспериментально подтверждена природа спектральных аномалий квазистатического поля E_z , связанная с сейсмогравитационными колебаниями Земли. Однако остается открытым вопрос: вызваны ли типичные для Камчатки бухтообразные аномалии ослабления электрического поля E_z перед землетрясениями увеличением проводимости нижней атмосферы в результате дополнительной ионизации радиоактивным газом или это чисто сейсмический электрический сигнал в результате разрушения горных пород в гипоцентре.

5. В дни с осадками спектры мощности E_z сильно изменчивы без проявления тонкой структуры.

6. Моды акустических волн в спектрах мощности E_z не обнаружены.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Л.Н. Петрову за полезное обсуждение доклада на конференции "Проблемы геокосмоса" в С.-Петербурге.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 00-05-65020, 00-05-79047, 00-05-65380).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бузевич А.В., Дружин Г.И., Фирстов П.П., Вершинин Е.Ф., Смирнов С.Э., Филимонов В.И. Гелиогеофизические эффекты, предвалявшие Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. $M = 7.7$ // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: РАН. С. 177–188, 1998.
- Гармаш С.В., Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Швед Г.М. Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. Т. 25, № 12, С. 1290–1299, 1989.
- Линьков Е.М., Петрова Л.Н., Осипов К.С. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений // ДАН СССР. Т. 313, № 5, С. 1095–1098, 1990.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В. УНЧ-КНЧ-электромагнитные излучения над разломом в долине Кангра (Индия) и их связь с радонном (ИСЗ "Интеркосмос-24") // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 39, № 4, С. 62–68, 1999.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Денуева А.Х., Бузевич А.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э., Фирстов П.П. Вариации различных атмосферно-ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке: предварительные результаты // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42, № 6, С. 805–813, 2002.
- Моргунов В.А. К природе литосферно-ионосферных связей // Изв. АН СССР. Физика Земли. № 5, С. 80–87, 1988.
- Петрова Л.Н. Сейсмический процесс в интервале частот 0.05–0.5 мГц: закономерности и особенности // Вулканология и сейсмология. № 4–5, С. 116–124, 1999.
- Пулинец С.А., Хегай В.В., Боярчук К.А., Ломоносов А.М. Атмосферное электрическое поле как источник переменчивости ионосферы // УФН. Т. 168, № 5, С. 582–589, 1998.
- Руленко О.П., Иванов А.В., Шумейко А.В. Краткосрочный атмосферно-электрический предвестник Камчатского землетрясения 6.III.1992, $M = 6.1$ // ДАН. Т. 326, № 6, С. 980–982, 1992.
- Руленко О.П., Дружин Г.И., Вершинин Е.Ф. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед камчатским землетрясением 13.11.1993 г. $M = 7.0$ // Докл. РАН. Т. 348, № 6, С. 814–816, 1996.
- Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. № 4, С. 57–68, 2000.
- Смирнов С.Э. Аномалии поведения напряженности электрического поля перед землетрясениями по наблюдениям магнитной обсерватории Паратунка за 1997–2000 годы // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений: Тезисы докладов II международного совещания в с. Паратунка Камчатской обл., 14–19 августа 2001 г. / Ред. Ю.С. Шумилов, Г.И. Дружин. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. С. 48–49, 2001.
- Сорокин В.М., Чмырев В.М., Похотелов О.А., Липеровский В.А. Обзор моделей литосферно-ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / Ред. В.Н. Страхов, В.А. Липеровский. М.: ОИФЗ РАН. С. 75–98, 1999.