

УДК 550.388.2

## СПЕКТРЫ МОЩНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПРИЛИВНЫХ И ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ И В *D*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА КАМЧАТКЕ

© 2009 г. Г. А. Михайлова<sup>1</sup>, Ю. М. Михайлов<sup>1</sup>, О. В. Капустина<sup>1</sup>, Г. И. Дружин<sup>2</sup>, С. Э. Смирнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова

РАН, г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: yumikh@izmiran.ru

<sup>2</sup>Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО

РАН, п. Паратунка (Камчатский край)

e-mail: sergey@ikir.kamchatka.ru, drug@ikir.kamchatka.ru

Поступила в редакцию 13.01.2009 г.

Выполнен спектральный анализ суточных вариаций квазистатического электрического поля в приземной атмосфере и ОНЧ-атмосферных радиозумов на частоте 5.3 кГц, наблюдаемых одновременно в сентябре–октябре 1999 г. в obs. “Паратунка” ИКИР ДВО РАН. Исследованы вариации интенсивностей спектральной плотности мощности и длительностей периодов колебаний в полосе периодов  $T \sim 8–24$  ч и выше в зависимости от геомагнитной и сейсмической активностей.

PACS: 92.60.hh+92.70.Cp+94.20.de

### 1. ВВЕДЕНИЕ

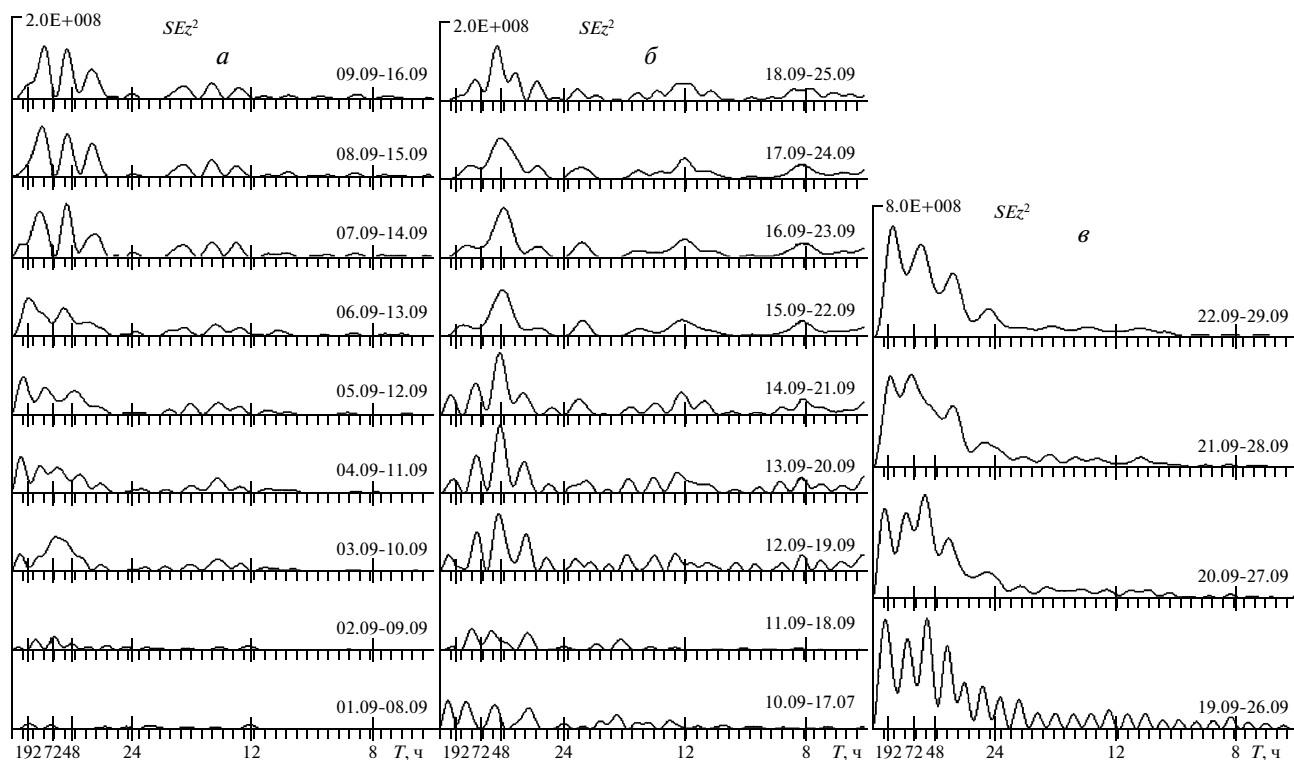
Исследованию волновых процессов на различных высотах атмосферы посвящено большое количество работ [Митра 1977; Волновые возмущения..., 1980; Данилов и др., 1987 и цитируемая там литература], в которых использовались разнообразные радиофизические методы. В последнее время уделяется особое внимание изучению волновых возмущений в атмосфере Земли на различных ее высотах в сейсмически активных регионах в широком диапазоне периодов, включая внутренние гравитационные волны (ВГВ,  $T < 3.5$  ч), тепловые приливные волны ( $T \leq 24$  ч) и волны планетарных масштабов ( $T > 24$  ч). Цель этих исследований – поиск и выделение волновых возмущений литосферной природы. В настоящее время такие исследования активно проводятся на Камчатке в obs. “Паратунка” ИКИР ДВО РАН ( $\lambda = 158.25^\circ\text{E}$ ;  $\varphi = 52.9^\circ\text{N}$ ), где в качестве косвенных средств их изучения используются суточные вариации  $E_z$ -компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере, ОНЧ-атмосферных радиозумов и горизонтальной компоненты геомагнитного поля, наблюдаемые одновременно. Ранее авторами в спектрах мощности суточных вариаций этих геофизических параметров впервые был выделен полный набор колебаний в указанном выше диапазоне периодов и исследовано прохождение ВГВ из приземной атмосферы до высот динамо-области ионосферы [Михайлова и др., 2008]. Кроме того, по результатам наблюдений вариаций горизон-

тальной компоненты геомагнитного поля была исследована динамика волновых возмущений в динамо-области ионосферы в полосе периодов тепловых приливных волн и волн планетарных масштабов ( $T = 48, 72, 192$  ч) [Михайлова и др., 2009].

Настоящая работа является продолжением исследований волновых процессов в приземной атмосфере и в *D*-области ионосферы по результатам регистрации напряженности квазистатического электрического поля и ОНЧ-атмосферных радиозумов, наблюдаемых одновременно в различных геофизических условиях.

### 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ОБРАБОТКИ

В качестве исходных данных рассмотрены суточные вариации напряженности квазистатического электрического поля ( $E_z$ -компонента) в приземной атмосфере и атмосферного радиозума на частоте 5.3 кГц, измеренные одновременно в обсерватории с дискретностью по времени 1 мин в период наблюдений сентябрь–октябрь 1999 г. (Для  $E_z$ -компоненты только сентябрь месяц). Состояние геомагнитной активности ( $\Sigma K_p$ - и  $Dst$ -вариации), а также поведение метеорологических параметров (осадки, давление) показаны на рис. 2 (нижние кривые). Видно, что в сентябре месяце с 10 по 30, а в октябре – с 10 по 20 и с 20 по 30 наблюдались периоды высокой геомагнитной активности, на фоне которых имели место изолированные бури с  $Dst$ -вариацией  $\sim 180$  нТл (22 сентяб-



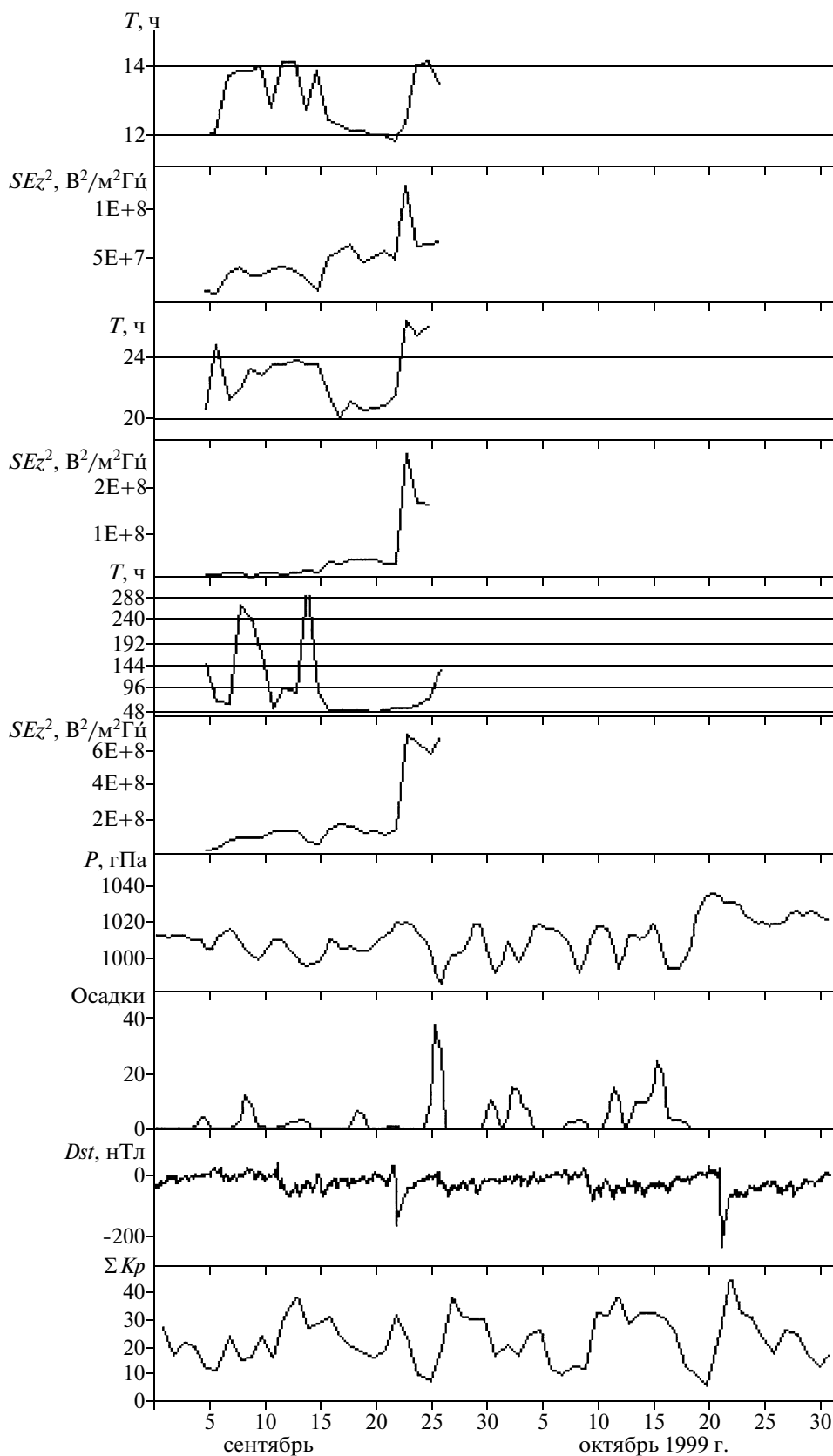
**Рис. 1.** Динамика спектральной плотности мощности суточных вариаций напряженности квазистатического электрического поля ( $SEz^2$ ) через одни сутки в сентябре 1999 г. Масштабы по оси ординат для фрагментов (а) и (б) одинаковы и равны  $2 \times 10^8 \text{ В}^2/\text{м}^2 \text{ Гц}$ , для фрагмента (в) —  $8 \times 10^8 \text{ В}^2/\text{м}^2 \text{ Гц}$ .

ря) и  $\sim 250$  нТл (22 октября). Длительность периодов высокой геомагнитной активности составляла  $\sim 8$ – $10$  суток. На фоне этой активности имели место осадки, особенно мощные ( $\sim 40 \text{ мм}/\text{м}^2$ ) 25–26 сентября, сильное землетрясение 18 сентября с параметрами 21.28:33.17 UT,  $\varphi = 51.21^\circ \text{N}$ ,  $\lambda = 157.56^\circ \text{E}$ ,  $h = 60 \text{ км}$ ,  $M = 6.0$ , а также более слабые землетрясения 6 сентября с параметрами 15.04:52.81 UT,  $\varphi = 52.10^\circ \text{N}$ ,  $\lambda = 159.15^\circ \text{E}$ ,  $h = 55 \text{ км}$ ,  $M = 5.0$ ; 5 и 24 октября с параметрами 05.01:35.94 UT,  $\varphi = 51.21^\circ \text{N}$ ,  $\lambda = 157.61^\circ \text{E}$ ,  $h = 76 \text{ км}$ ,  $M = 5.6$  и 12.24:50.07 UT,  $\varphi = 52.23^\circ \text{N}$ ,  $\lambda = 159.65^\circ \text{E}$ ,  $h = 44 \text{ км}$ ,  $M = 5.3$  соответственно. Оценка спектральной плотности мощности исходных записей (далее для краткости, спектров мощности) выполнена методом периодограмм с прямоугольным временным “окном” длительностью  $t_i = 8$  суток, которое, по аналогии с работой [Михайлова и др., 2009], смещалось на одни сутки вдоль временного ряда данных. При этом исходные значения с дискретностью в 1 мин усреднялись на интервале в 8 мин и дополнялись нулями до 2048 точек.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Спектры мощности квазистатического электрического поля ( $SEz^2$ ).* На рис. 1 приведена дина-

мика спектров мощности за сентябрь месяц. Спектры построены в линейном по частоте масштабе. Метки на оси абсцисс указывают частоты, совпадающие с периодами  $T = 8, 12, 24, 48, 72, 192$  ч. На осях ординат приведен одинаковый масштаб  $2 \times 10^8 \text{ В}^2/\text{м}^2 \text{ Гц}$  для фрагментов (а) и (б) и масштаб  $8 \times 10^8 \text{ В}^2/\text{м}^2 \text{ Гц}$  для фрагмента (в). Анализ рисунка показывает следующее. При спокойных геомагнитных условиях и относительно слабых осадках (кривые 01–08 и 02–09) в фоновых спектрах мощности выделены преимущественно полусуточная гармоника ( $T = 12$  ч) теплового прилива и относительно слабые гармоники с  $T \sim 24, 48, 72$  и  $192$  ч. С усилением геомагнитной активности во всех последующих восьмисуточных интервалах наблюдалось, во-первых, увеличение интенсивности спектров в несколько раз по сравнению с фоновым уровнем в полосе периодов 48–192 ч; во-вторых, смещение максимума компонента на  $T \sim 12$  ч в сторону больших значений с одновременным усилением его интенсивности; в-третьих, появление дополнительных максимумов на  $T \sim 16$  и  $18$  ч. В интервалах 10–17 и 11–18 характер спектров в полосе периодов 8–24 ч изменился незначительно, а в полосе 24–192 ч интенсивность заметно уменьшилась по сравнению с предыдущими и последующими графиками. В этих интервалах на фоне высокой геомагнитной активности произошло



**Рис. 2.** Вариации интенсивности максимумов в спектре мощности ( $SEz^2$ ) и длительности периодов  $T$  этих максимумов вблизи  $T \sim 12, 24$  ч и более (последовательность соответствующих кривых сверху вниз). На рисунке приведены кривые среднесуточных значений давления  $P$ , гПа, осадков в  $\text{мм}/\text{м}^2$ , минутные значения  $Dst$ -вариаций в нТл и суточные значения  $\Sigma Kp$ -индекса.

сильное землетрясение, которое привело к подавлению волновых возмущений в полосе периодов волн планетарного масштаба, т.е. сейсмический эффект локального источника оказался сильнее эффекта глобальной геомагнитной активности. С дальнейшим ростом геомагнитной активности (интервалы 12–19; 13–20; 14–21) наблюдалось усиление компонентов на  $T \sim 8, 12, 24$  ч. А в периоды, включающие изолированную магнитную бурю 22 сентября (15–22; 16–23; 17–24; 18–25), в спектрах мощности возросла интенсивность компонентов с  $T \sim 8, 12$  и  $24$  ч, но особенно сильно на  $T \sim 48$  ч. Следующая последовательность спектров (19–26; 20–27; 21–28; 22–29) включает в себя, кроме высокой геомагнитной активности, мощный всплеск осадков. Их эффект проявился в подавлении колебаний на  $T \sim 8, 12, 24$  ч и в усилении колебаний на  $T \geq 48$  ч. Причем, интенсивность их почти на порядок по величине превышает соответствующую интенсивность при других геофизических условиях.

Более детально вариации интенсивностей максимумов в спектрах мощности  $SEz^2$  и их периодов  $T$  показаны на рис. 2 отдельно для компонентов с периодами вблизи 12, 24 ч и выше. Каждое значение на графике приведено к середине интервала в 8 суток, на котором оценивалась спектральная плотность мощности. На этом же рисунке для контроля геофизических условий эксперимента приведены среднесуточные значения давления, уровня осадков и  $\Sigma Kr$ -индекса, а также минутные значения  $Dst$ -вариаций для сентября–октября 1999 г. Из анализа кривых рисунка можно сделать следующий вывод: во-первых, эффект высокой геомагнитной активности в поведении спектров проявляется прежде всего в существенном увеличении периода с 12 до 14 ч и одновременно в незначительном уменьшении периода  $T \sim 24$  ч при слабом увеличении их интенсивностей; во-вторых, в день с сильным землетрясением 18 сентября эффект проявляется в резком уменьшении периода максимума спектра до 12 ч при незначительном увеличении его интенсивности. В день со слабым землетрясением 6 сентября эффект практически отсутствует. Эффект магнитной бури 22 сентября проявляется в резком усилении интенсивности (в два – три раза по сравнению с фоновым уровнем) обоих компонентов и в увеличении скачком длительности периодов этих компонентов до 14 и 26 ч соответственно. С одной стороны, продолжительности существования аномалий максимумов в спектрах мощности (06.09–16.09), как видно из рисунка, совпадают с продолжительностью высокой геомагнитной активности. Несовпадение периодов 14 и 26 ч с параметрами тепловых приливных колебаний и их не кратность между собой, с другой стороны, указывают на их различные источники. Можно полагать, что этот эффект связан не с теп-

ловым излучением от Солнца, а с воздействием на нижнюю атмосферу корпускулярных потоков, которое было обнаружено сравнительно давно. В частности, в работе [Митра, 1977] были выделены полугодовые вариации плотности, давления и температуры в тропосфере в фазе с геомагнитными индексами, и во время сильных геомагнитных возмущений при этом было обнаружено увеличение давления. Мустель [Мустель, 1973, 1974] методом наложения эпох относительно начала магнитной бури обнаружил суточный перепад давления по абсолютной величине разного знака в зависимости от региона и времени года. Вслед за этими работами последовала серия работ, в которых исследовалось влияние солнечной активности на метеорологические параметры нижней атмосферы [Мустель и др., 1977; Мустель и др., 1979; Чертопруд и др., 1979; Пудовкин и Бабушкина, 1990]. В них рассматривались преимущественно долговременные колебания, такие, как 22-летние, 11-летние, 5-летние. В данной работе приведены эффекты высокой геомагнитной активности в спектрах мощности квазистатического электрического поля, но в полосе более коротких периодов, включая периоды тепловых приливных волн и волн планетарного масштаба. Обнаружено усиление колебаний спектров мощности в широкой полосе периодов волн планетарного масштаба (от 48 до 288 ч). Этот результат подтверждает ранее полученный эффект усиления циркуляции в приземной атмосфере при высокой геомагнитной активности, который проявился в вариациях индекса площади завихренности [Михневич, 1970; Ластовичка, 1990] и связан с корпускулярными потоками от Солнца [Смирнов и Кононович, 1984]. Вместе тем известно, что вариации напряженности  $Ez$ -компоненты квазистатического электрического поля косвенно через вариации объемного заряда связаны с вариациями атмосферного давления. Эта связь прослеживается в среднесуточных колебаниях этих параметров, приведенных в работах [Борисенков и др., 2000; Борисенков и др., 2003], а также в параметрах, измеренных непосредственно в сентябре–октябре 1999 г. и показанных на рис. 1 в работе [Михайлов и др., 2002]. Учитывая эту зависимость, следует ожидать подобных вариаций в спектрах мощности приземного давления в различных геофизических условиях.

При обильных осадках, как видно на рис. 1, эффект проявляется сильнее в полосе периодов 48–144 ч с подавлением колебаний в полосе периодов тепловых приливных волн и имеет, по-видимому, локальный характер.

*Спектры мощности атмосферного радишума на частоте 5.3 кГц.* На рис. 3 выборочно показана динамика спектров мощности суточных вариаций радишумов ( $SV^2$ ) на тех же интервалах по времени 8 суток, но для двух месяцев: сентябрь–октябрь

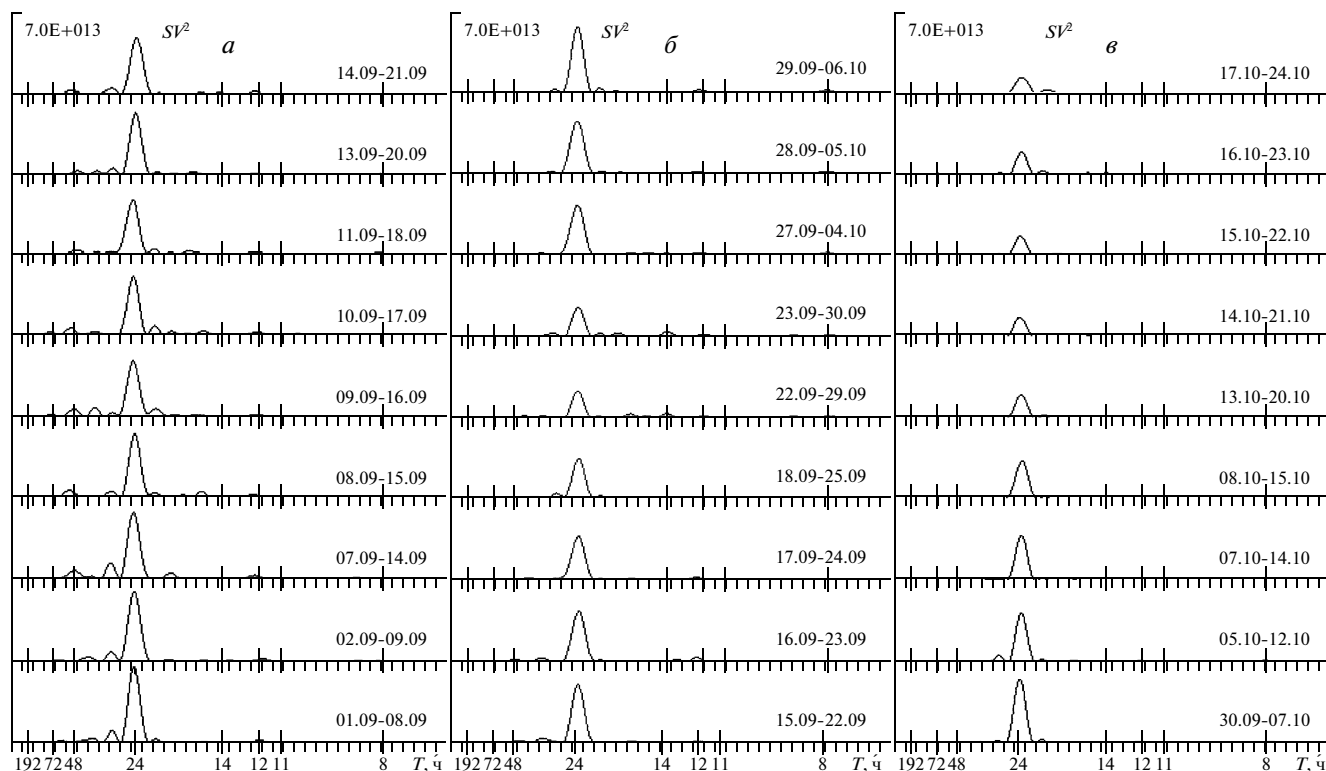
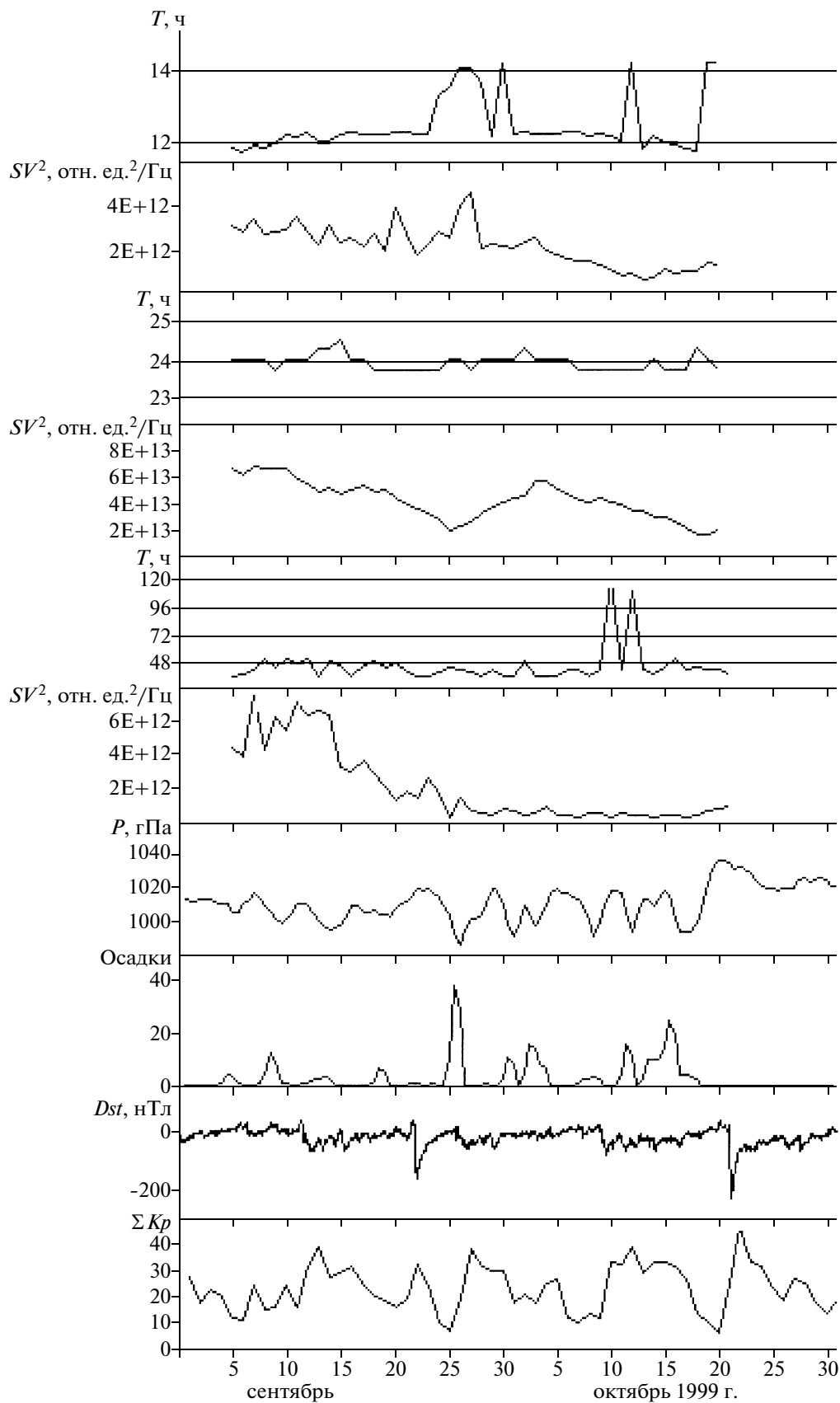


Рис. 3. Динамика выборочных спектров мощности суточных вариаций атмосферного радишума на частоте 5.3 кГц ( $SV^2$ , произвольные единицы) на тех же временных интервалах, что и на рис. 1.

1999 г. Обозначения на рис. 3 те же, что и на рис. 1. Видно, что на всех графиках, независимо от геофизических и метеорологических условий, в спектрах мощности преобладает компонент с периодом  $T \sim 24$  ч, а также колебания с  $T \sim 12$  и 48 ч, но с интенсивностью существенно ниже. Более детальная картина вариаций параметров ( $SV^2$  и  $T$ ) в спектрах мощности приведена на рис. 4. Во-первых, период компонентов с  $T \sim 12$  и 24 ч сохраняется практически постоянным. Интенсивность же их с ростом  $\Sigma Kp$ -индекса в интервале (05.09–15.09) последовательно уменьшается (особенно ярко выражено для компонента с  $T \sim 24$  ч), в день с сильным землетрясением 18 сентября на этом фоне слабо возрастает и затем резко падает в день с магнитной бурей. В целом же интенсивность этого компонента на протяжении двухмесячного периода следует за вариациями  $Kp$ -индекса, т.е. с ростом его величины интенсивность радишума последовательно падает. Этот эффект известен давно: а именно, высыпание корпускулярных частиц вызывает увеличение концентрации электронов в три–четыре раза в  $D$ -слое ионосферы и понижение его высоты [Lastovichka, 1996]. Это, в свою очередь, приводит к усилению затухания ОНЧ-электромагнитных волн, распространяющихся в приземном волноводе. Этот эффект отчетливо проявляется на рис. 3 и рис. 4 в падении интенсивности компонентов с периодами суточного и

полусуточного приливов. Даже незначительное увеличение интенсивности в день с сильным землетрясением означает, что сейсмические и геомагнитные эффекты в  $D$ -области ионосферы проявляются в противофазе. Подобный эффект ранее был обнаружен в работе [Михайлов и др., 1997]. В полосе периодов более 24 ч в спектрах мощности атмосферного радишума при усилении геомагнитной активности в интервале (05.09–15.09) наблюдается усиление колебаний с последующим ослаблением на протяжении всего периода наблюдений. Период этих колебаний составляет величину порядка 48 ч. Он совпадает с периодом квазидвухдневных волн планетарного масштаба, вызванных влиянием теплового излучения Солнца на атмосферную циркуляцию. Скачкообразное возрастание периода максимума  $\sim 120$  ч, по-видимому, связано с очень слабой интенсивностью колебаний на временном интервале 10.10–14.10.

*Сравнительный анализ спектров мощности  $E_z$ -компоненты электрического поля ( $SE_z^2$ ), атмосферного радишума ( $SV^2$ ) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля, измеренных одновременно в обс. "Паратунка" ( $SHp^2$ ) и Barrow ( $SHb^2$ ) ( $\varphi = 71.32^\circ N$ ,  $\lambda = 203.38^\circ E$ ) в сентябре 1999 г. Данные для горизонтальной компоненты геомагнитного поля в обс. "Паратунка" и в обс. Barrow взяты из работы*



**Рис. 4.** То же, что и на рис. 2, но для спектров мощности атмосферного радишума на частоте 5.3 кГц и для периода наблюдений сентябрь–октябрь 1999 г.

[Михайлова и др., 2009]. Это сравнение показано на рис. 5 для наиболее интересных и одних и тех же интервалов по времени с 07–14 по 18–25 сентября, за исключением фоновых спектров (01–07 сентября). Кривые ( $SHp^2$ ) и ( $SHb^2$ ) для этого периода смотри в работе [Михайлова и др., 2009]. Из сравнения кривых рис. 5 видно, что в периоды высокой геомагнитной активности 07–16 сентября в спектрах мощности  $SEz^2$ ,  $SV^2$ ,  $SHp^2$  и  $SHb^2$  присутствует разной интенсивности компонент с  $T \sim 24$  ч, совпадающий с периодом суточного теплового прилива. В спектре мощности  $SHp^2$  к этому компоненту добавляются гармоники с периодами  $T \sim 8$  и  $12$  ч. Этот результат свидетельствует о том, что основным ионизирующим агентом на высотах  $D$ - и динамо-областей ионосферы даже при высокой геомагнитной активности является волновое излучение Солнца. Совершенно другая картина спектров мощности имеет место в приземной атмосфере. Как видно на рис. 1 и 2, в спектрах мощности компонент с периодом  $T \sim 24$  ч выражен слабее по сравнению с компонентом с  $T \sim 12$  ч. Это означает, что вариации  $Ez$ -компоненты поля непосредственно слабо связаны с волновым излучением Солнца и определяются другими источниками ионизации в приземной атмосфере.

Для более детального сравнения характера волновых возмущений в широком диапазоне периодов атмосферных волн представляло интерес по данным рис. 5 построить кривые спектров мощности  $SHp^2$ , аналогичные кривым  $SEz^2$  и  $SV^2$  и показанные на рис. 2 и рис. 4. Эти кривые приведены на рис. 6. Видно, что действие корпускулярных потоков от Солнца проявляется в следующем:

1) увеличение периодов суточного и полусуточного приливов совпадает по фазе с максимумами значений  $\Sigma Kp$ -индекса.

2) увеличение интенсивности максимальных компонентов в спектре и ее модуляция колебаниями с периодом  $T \sim 15$ –20 суток, близко совпадающим с периодом волн планетарного масштаба  $\sim 18$  суток. Присутствие этих колебаний на высотах  $E$ -области ионосферы ранее было обнаружено и в других работах, например, [Хантадзе и Шарадзе, 1980; Forbes and Leveroni, 1999]. Визуально периодичность изменения  $Kp$ -индекса, как видно на нижней кривой рисунка, составляет 10–12 суток, которая не совпадает с периодом модуляции интенсивности колебаний суточного прилива. Несовпадение периодов изменчивости интенсивности суточного прилива с его собственным периодом указывает на различные источники этих колебаний.

В полосе периодов выше 24 ч при высокой геомагнитной активности наблюдается усиление интенсивности колебаний в широкой полосе от 48 до 288 ч синхронно с максимумами  $\Sigma Kp$ -индекса.

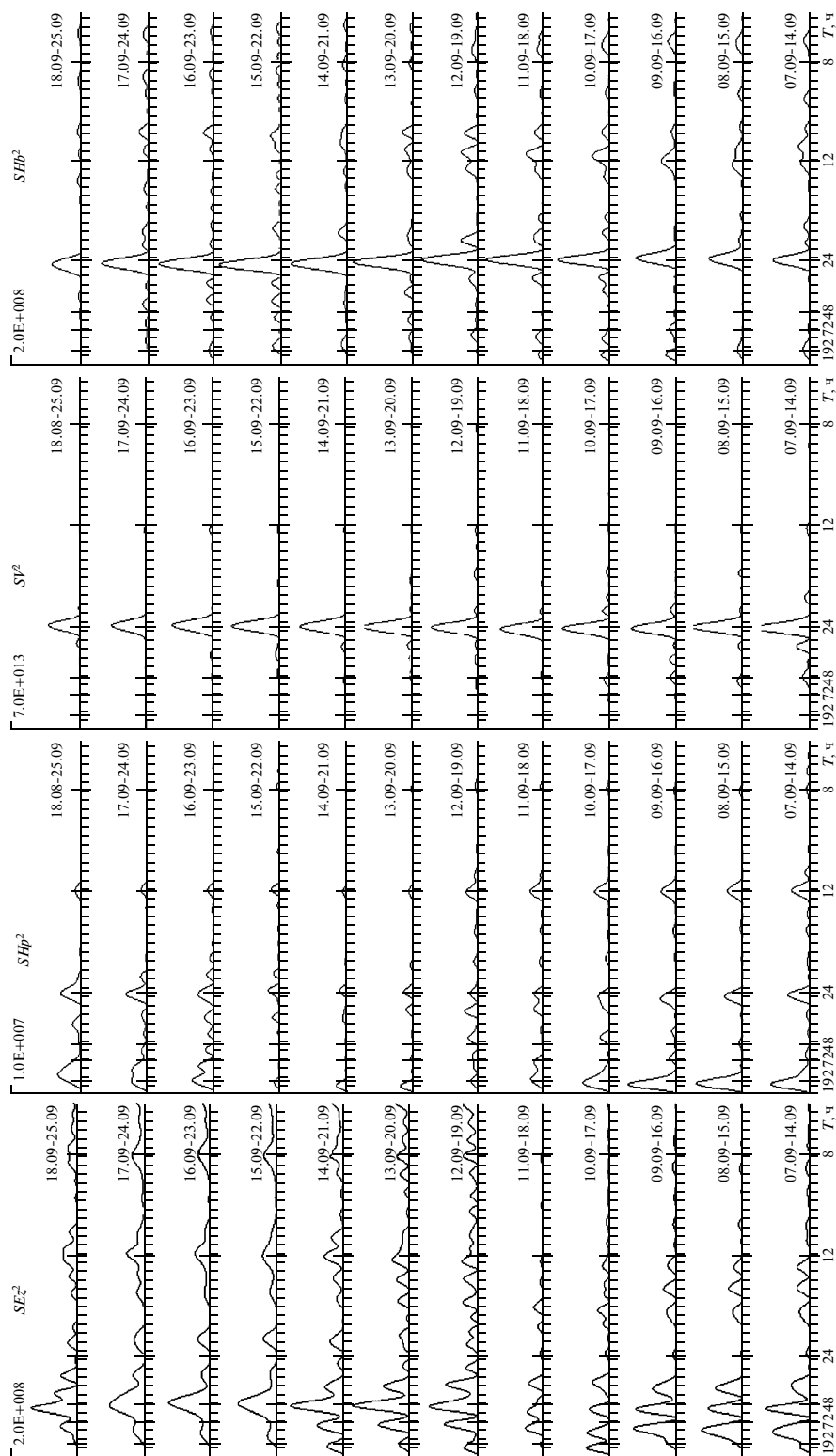
В спектрах мощности горизонтальной компоненты геомагнитного поля эффекты сильного землетрясения не были обнаружены.

На рис. 7 показаны детально вариации периода колебаний суточной гармоник и ее интенсивности в спектрах мощности этих трех параметров. Видна существенная разница в эффектах сейсмической и высокой геомагнитной активностей в поведении этих параметров, обсужденная выше.

Следующий рис. 8 показывает вариации величины периодов и интенсивностей в максимумах спектров мощности в полосе 48–240 ч. Как видно на рисунке, эффекты сейсмической и высокой геомагнитной активностей проявляются в спектрах мощности совершенно по-разному как в вариациях длительности периодов максимумов, так и в вариациях их интенсивностей.

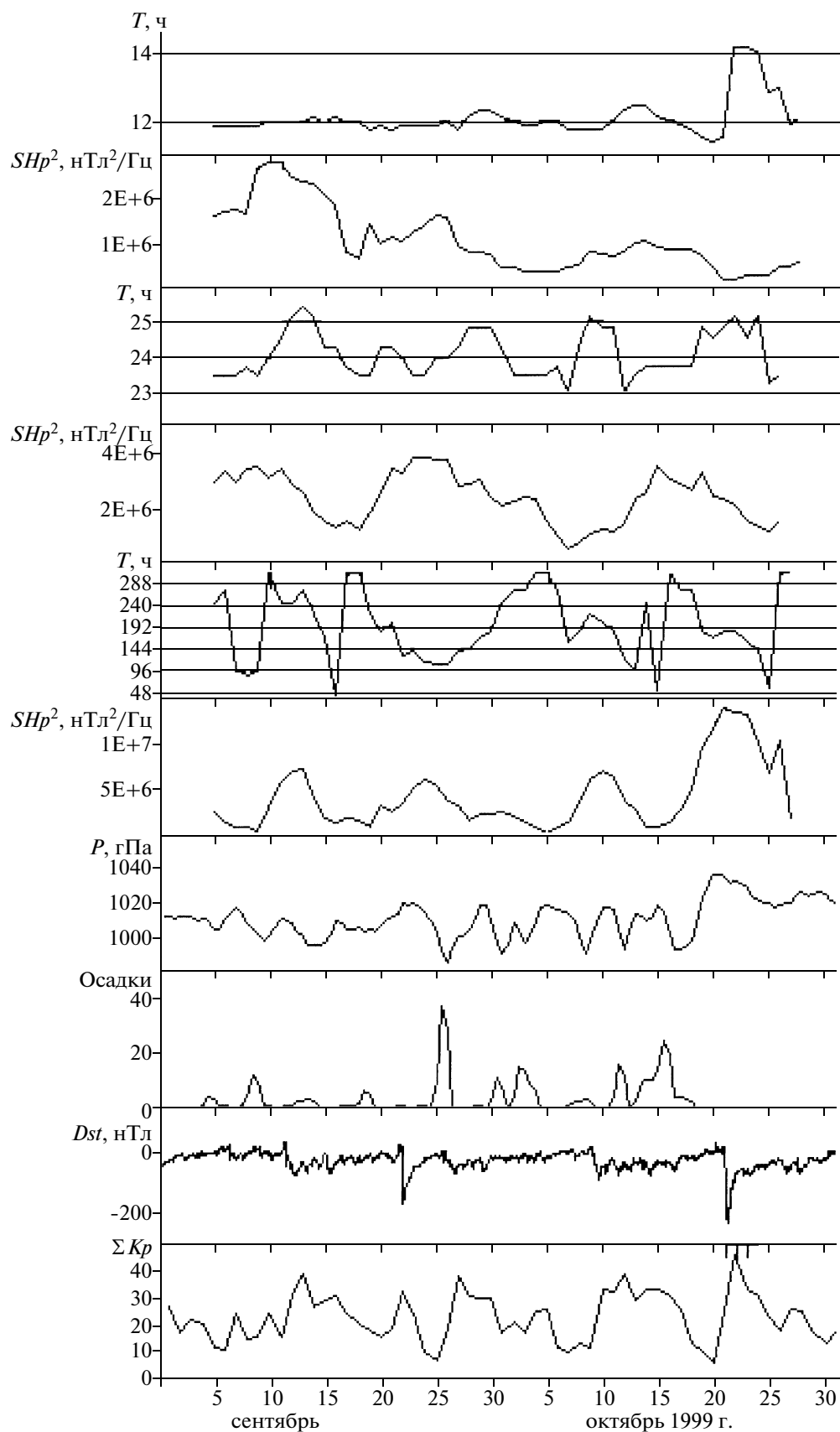
Представляло интерес рассмотреть природу этих различий. Для этой цели выполнен спектральный анализ трехчасового  $Kp$ -индекса за сентябрь–октябрь 1999 г. (рис. 9а). Квадрат спектральной плотности показан на рис. 9 в полосе периодов 3–960 ч (б) и 3–96 ч (в). Наиболее интенсивный максимум в спектре приходится на период  $T \sim 330$  ч, предыдущие и последующий максимумы меньшей интенсивности — на  $T \sim 680$ , 250, 150, 120 ч. Периоды этих колебаний близко совпадают со средними значениями собственных колебаний Солнца ( $T_1 \sim 27$  суток (648 ч),  $T_2 \sim 13$ –14 суток (312–336 ч),  $T_3 \sim 9$ –10 суток (216–240 ч),  $T_4 \sim 7$  суток (168 ч),  $T_5 \sim 5$ –5.5 суток (120–132 ч). Не исключено, что первая резонансная гармоника в спектре на рис. 9б оказалась слабо выделенной по интенсивности из-за ограниченной длительности исходного ряда значений  $Kp$ -индекса (всего 61 сутки). Интенсивность колебаний на периодах  $T$  менее 96 ч значительно ниже по сравнению с колебаниями более длительных периодов, и спектр имеет более сложный характер. Сравнение рис. 9 и рис. 2 показывает, что при высокой геомагнитной активности как в спектрах  $Kp$ -индекса, так и в спектрах мощности  $Ez$ -компоненты поля присутствуют волны с периодами от 48 до 288 ч. Это позволяет полагать, что эти колебания вызваны корпускулярными потоками от Солнца. Возбуждение широкого спектра колебаний в динамо-области ионосферы в полосе от 48 до 288 ч (см. рис. 6) и модуляция их интенсивности с периодом 10–12 суток наводит на мысль, что эти колебания также вызваны корпускулярными потоками от Солнца.

Несовпадение спектров мощности волновых возмущений в приземной атмосфере и на высотах  $D$ - и динамо-областей ионосферы, по-видимому, может быть связано как с различными источниками этих волн, так и с особенностями их распространения в атмосфере [Charney and Drazin, 1961]. Не исключено, что усиление планетарных

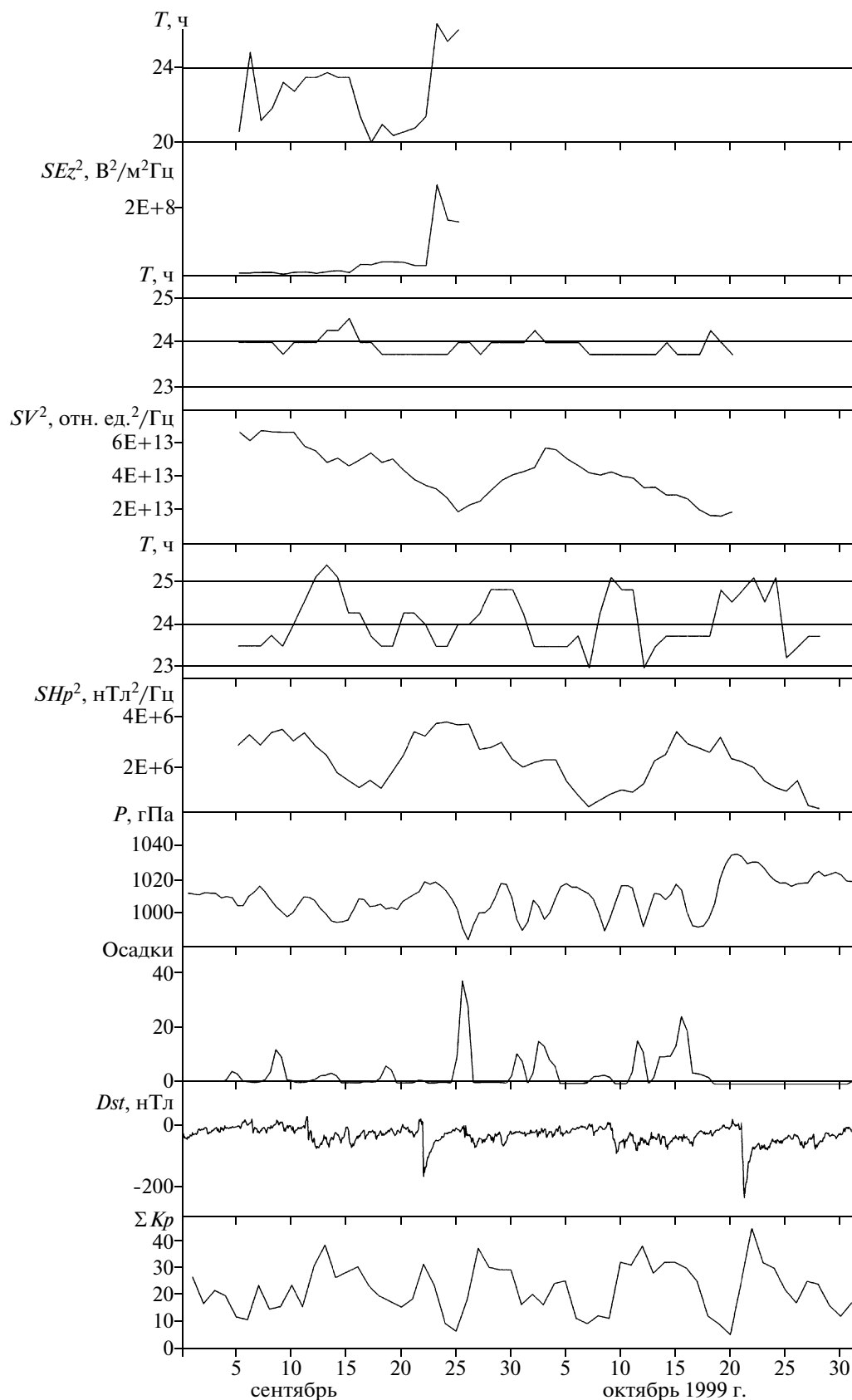


**Рис. 5.** Динамика спектров мощности квазистатического электрического поля ( $SEz^2$ ), атмосферного радиопомеха на частоте 5.3 кГц ( $SHp^2$ ), горизонтальной компоненты геомагнитного поля в obs. "Паратунка" ( $SHp^2$ ) и в obs. Вагтов ( $SHp^2$ ) в период с 07.09 по 25.09 1999 г.





**Рис. 6.** То же, что и на рис. 2, но для спектров мощности горизонтальной компоненты геомагнитного поля ( $SHp^2$ , нТл<sup>2</sup>/Гц), наблюдаемого в obs. “Паратунка” в сентябре–октябре 1999 г.



**Рис. 7.** Вариации интенсивностей колебаний и длительности периодов вблизи  $T \sim 24$  ч в спектрах мощности трех геофизических параметров: квазистатического электрического поля ( $SEz^2$ ), атмосферного радишума на частоте 5.3 кГц ( $SV^2$ ) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля ( $SHp^2$ ).

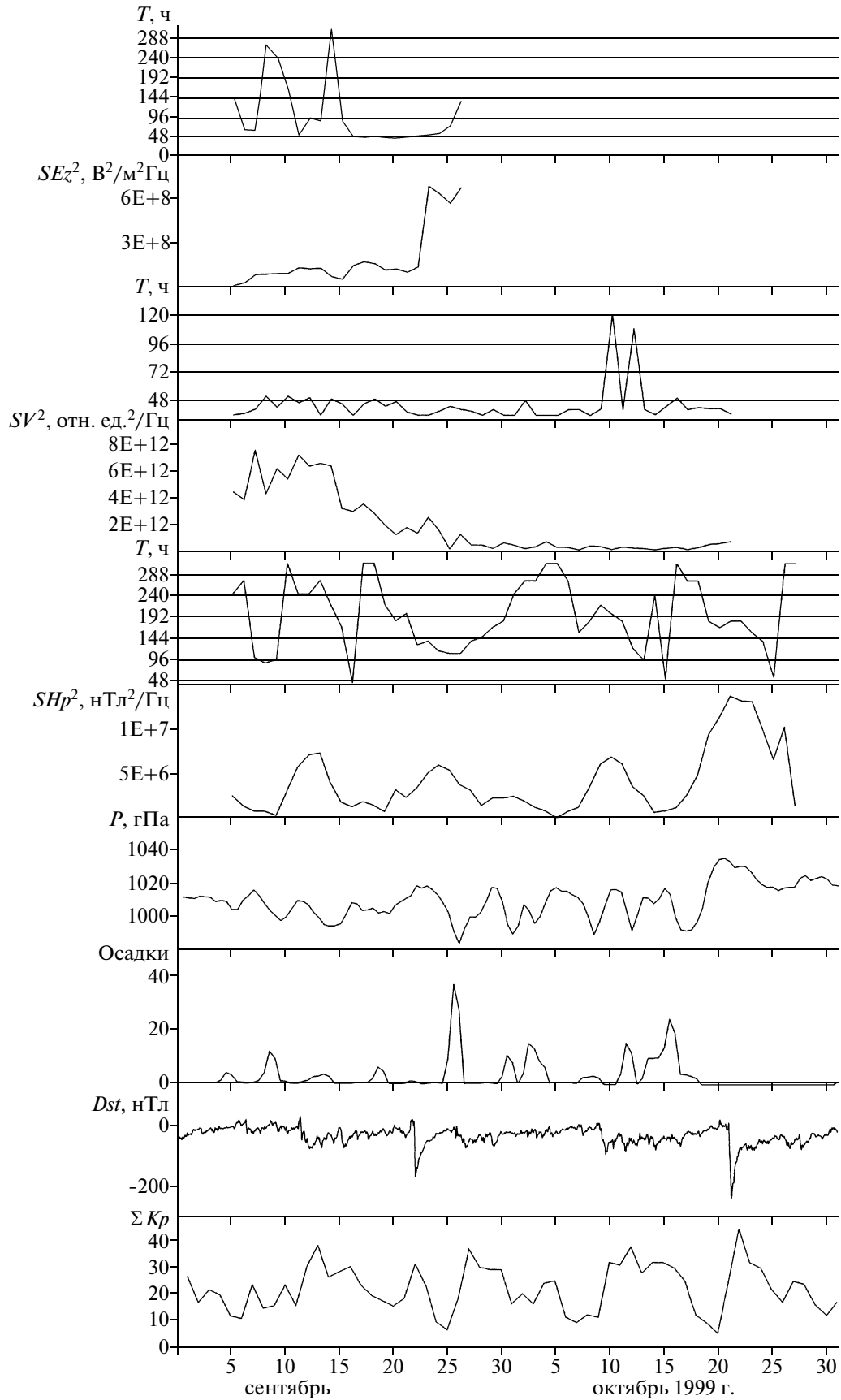


Рис. 8. То же, что и на рис. 7, но для колебаний в спектрах мощности с периодами  $T > 24$  ч.

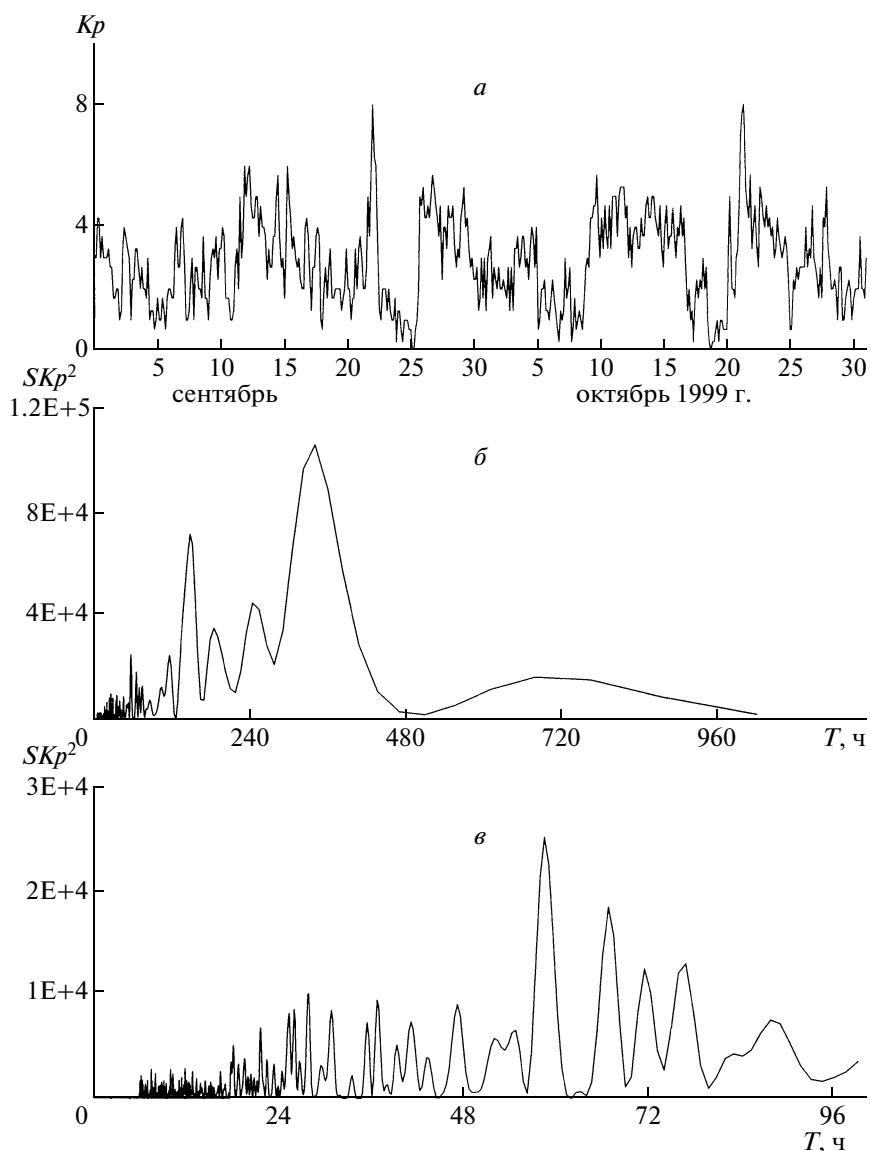


Рис. 9. Временные вариации трехчасового  $Kp$ -индекса в сентябре–октябре 1999 г. (а) и спектральная плотность в полосе периодов 3–960 ч (б) и 3–96 ч (в).

волн в приземной атмосфере связано с усилением глобальной циркуляции в тропосфере во время геомагнитных возмущений, а в динамо-области — с локальной неустойчивостью, вызванной выпадением корпускулярных потоков и нарушением ветрового режима. Более детальное обсуждение этого вопроса выходит за рамки данной статьи.

### 3. ВЫВОДЫ

Вся совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод об особенностях волновых процессов в приземной атмосфере и на высотах  $D$ - и динамо-областей ионосферы в спокойных геофизических условиях, при высокой геомагнитной активности и при единичных событиях (зем-

летрясения и магнитная буря) по вариациям спектральной плотности мощности квазистатического электрического поля, ОНЧ-атмосферных радиопомех и горизонтальной компоненты геомагнитного поля, измеренных одновременно.

1. В спокойных геомагнитных условиях в спектрах мощности этих трех параметров присутствуют компоненты, период которых близко совпадает с периодом вращения Земли. Это периоды тепловых приливных волн и волн планетарного масштаба, обусловленные волновым излучением Солнца.

2. Под действием корпускулярных потоков от Солнца при высокой геомагнитной активности

характер спектров этих параметров изменяется по-разному:

а) в спектрах мощности квазистатического электрического поля эффект проявляется в увеличении длительности периода колебаний с 12 до 14 ч синхронно с вариациями величины  $\Sigma Kp$ -индекса и в усилении интенсивности этих колебаний;

б) синхронно с вариациями  $\Sigma Kp$ -индекса усиливаются колебания в полосе периодов  $T \sim 48-288$  ч;

в) во время сильной магнитной бури эффект проявляется в резком увеличении длительности периодов с 12 до 14 и с 20 до 26 ч с одновременным усилением интенсивности этих колебаний;

г) эффект сильного землетрясения ( $M = 6$ ) в отличие от более слабого землетрясения проявляется в резком уменьшении периодов с 14 до 12 и с 24 до 20 ч соответственно с одновременно незначительным усилением интенсивности;

д) при наличии обильных осадков существенно возрастает интенсивность колебаний в полосе периодов 24–192 ч как по сравнению с колебаниями с  $T \sim 12$  ч, так и по сравнению с интенсивностью при других геофизических условиях;

е) при высокой геомагнитной активности в спектрах мощности ОНЧ-атмосферного радиопотока на частоте 5.3 кГц длительность периодов колебаний с  $T \sim 12, 24$  и 48 ч сохраняется практически постоянной, а интенсивность этих колебаний последовательно уменьшается с ростом величины  $\Sigma Kp$ -индекса и достигает минимума в день с сильной магнитной бурей. В день с сильным землетрясением отмечено слабое усиление интенсивности колебаний;

ж) при высокой геомагнитной активности в спектрах мощности горизонтальной компоненты геомагнитного поля эффект проявляется в изменении периодов колебаний в полосе 12–192 ч синхронно с изменением величины  $\Sigma Kp$ -индекса. Интенсивность колебаний с периодами 12 и 24 ч модулирована колебаниями с периодом порядка 15–20 суток, в то время как интенсивность колебаний с периодами выше 24 ч модулирована колебаниями с периодом 10–12 суток, совпадающим с периодом изменения  $Kp$ -индекса и с третьей резонансной гармоникой собственных колебаний Солнца;

з) несовпадение спектров мощности волновых возмущений в приземной атмосфере и на высотах ионосферы, по-видимому, может быть связано как с различными источниками этих волн, так и с особенностями их распространения в атмосфере [Charney and Drazin, 1961]. Не исключено, что усиление планетарных волн в приземной атмосфере связано с усилением глобальной циркуляции в тропосфере во время геомагнитных возмущений, а в динамо-области — с локальной неустойчиво-

стью, вызванной высыпанием корпускулярных потоков и нарушением ветрового режима.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенков Е.П., Кобзарева Е.Н., Крушатина И.А., Никифорова Л.Н., Успенская В.Г., Шварц Я.М. Сезонные особенности связи между атмосферно-электрическими факторами и метеотропными реакциями у кардиологических больных // Изв. РГО. Т. 132. Вып. 3. С. 76–85. 2000.
- Борисенков Е.П., Кобзарева Е.Н., Крушатина И.А., Никифорова Л.Н., Успенская В.Г., Шварц Я.М. Значительные изменения градиента потенциала электрического поля атмосферы у Земли и метеотропные реакции у кардиологических больных // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству. Владимир: Вл. ГУ. Сб. труд. Т. 1. С. 136–138. 2003.
- Волновые возмущения в атмосфере/Ред. А.Д. Данилов и др. Алма-Ата: Наука, КазССР, 198 с. 1980.
- Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Т.В., Хачикян Т.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 267 с. 1987.
- Ластовичка Я. Отклик нижней ионосферы, стратосферы и индекса площади завихренности в тропосфере // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 30. № 3. С. 452–456. 1990.
- Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 370 с. 1977 (перевод с англ. А.Р. Mitra. Ionospheric Effects of Solar Flares. Comp. Dordecht-Holland. Boston: D. Reidel Publish. 1974).
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В. КНЧ- и ОНЧ-электромагнитный фон во внешней ионосфере над сейсмоактивными регионами (ИСЗ “Интеркосмос-24”) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 37. № 4. С. 78–84. 1997.
- 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 период подготовки землетрясений на Камчатке: предварительные результаты // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 42. № 6. С. 805–813. 2002.
- Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Дружин Г.И., Смирнов С.Э. Прохождение внутренних гравитационных волн на высоты D- и динамо-областей ионосферы в сейсмически активном регионе (Камчатка): предварительные результаты // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 48. № 2. С. 261–269. 2008.
- Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Смирнов С.Э. Эффекты геомагнитных возмущений в спектрах мощности атмосферных волн в динамо-области ионосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 2. С. 262–266. 2009.
- Михневич В.В. Явления в атмосфере в период магнитных бурь // Исследование атмосферы и ионосферы в период повышенной солнечной активности/Ред. В.В. Михневич и А.Д. Данилов. Л.: Гидрометеиздат. С. 5–14. 1970.

- Мустель Э.Р. О взаимодействии солнечных корпускулярных потоков с нижним слоем земной атмосферы // Тр. Симпозиума по солнечно-корпускулярным эффектам в тропосфере и стратосфере/Ред. Э.Р. Мустель и Л.Р. Ракипова. Л.: Гидрометеоиздат. С. 4–13. 1973.
- Мустель Э.Р. Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогноза погоды. Л.: Гидрометеоиздат, 1974.
- Мустель Э.Р., Чертопруд В.Е., Хведелиане В.А. Сравнение изменений поля приземного атмосферного давления в периоды высокой и низкой геомагнитной активности // Астрон. журн. Т. 54. Вып. 2. С. 682–697. 1977.
- Мустель Э.Р., Чертопруд В.Е., Мулюкова Н.Б. Связь между корпускулярной активностью Солнца и ростом неустойчивости нижней атмосферы Земли в разные сезоны // Астрон. журн. Т. 56. Вып. 4. С. 876–880. 1979.
- Пудовкин М.И., Бабушкина С.В. Эффекты солнечных вспышек в вариациях приземного давления // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 3. С. 469–473. 1990.
- Смирнов Р.В., Кононович Э.В. Частотные характеристики связей между изменением индекса завышенности атмосферы и гелиогеомагнитной активностью // Солнечно-атмосферные связи и геомагнитная активность/Ред. В.В. Михневич и Р.В. Смирнов М.: Гидрометеоиздат. С. 80–92. 1984.
- Хантадзе А.Г., Шарадзе З.С. Ионосферные эффекты планетарных волн // Волновые возмущения в атмосфере/Ред. А.Д. Данилов и др. Алма-Ата: Наука, КазССР. С. 143–158. 1980.
- Чертопруд В.Е., Мустель Э.Р., Мулюкова Н.Б. О неустойчивости тропосферы, связанной с солнечной активностью // Астрон. журн. Т. 56. Вып. 1. С. 106–117. 1979.
- Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // J. Geophys. Res. V. 66. № 1. P. 83–109. 1961.
- Forbes J.M., Leveron S. Quasi 16-day oscillation in the ionosphere // Geophys. Res. Lett. V. 19. № 10. P. 981–984. 1999.
- Lastovička J. Effects geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere // J. Atmos. Terr. Phys. V. 58. № 7. P. 831–843. 1996.