

УДК 551.510.522;551.510.535

## ПРОХОЖДЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА ВЫСОТЫ *D*- И ДИНАМО-ОБЛАСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНОМ РЕГИОНЕ (КАМЧАТКА): ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2008 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.).

<sup>2</sup>Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
пос. Паратунка (Камчатский край).

e-mail.: yumikh@izmiran.ru

e-mail: drug@ikir.kamchatka.ru

Поступила в редакцию 07.08.2007 г.

Выполнен спектральный анализ одновременных суточных вариаций  $Ez$ -компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере, ОНЧ – радишумов и горизонтальной компоненты геомагнитного поля, наблюдаемых на Камчатке в сентябре 1999 г. Эти геофизические параметры использованы в качестве косвенного средства изучения волновых процессов в приземной атмосфере, в *D*- и динамо-областях ионосферы в полосе периодов внутренних гравитационных волн ( $T = 0.5–3.5$  ч). Для анализа взаимосвязи волновых процессов в этих областях атмосферы использован корреляционный метод в частотной области. Исследованы взаимные спектры мощности различных пар геофизических параметров в зависимости от метеорологической, сейсмической и геомагнитной активностей. Показано, что колебания в спектрах мощности в полосе периодов  $T \sim 1–1.5$  ч вызваны источниками внутренних гравитационных волн в приземной атмосфере, а в полосе периодов  $T \sim 1.5–3$  ч – удаленными источниками выше динамо-области ионосферы.

PACS: 94.20.Ee, 94.20.Gg, 94.10.Jd

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема литосферно-ионосферного взаимодействия остается актуальной в настоящее время и активно исследуется многочисленными коллективами и теоретиков, и экспериментаторов. Предложено несколько возможных моделей этого взаимодействия [Гохберг и др., 1988; Липеровский и др., 1992; Pulinets and Boyarchuk, 2004, и цитируемая там литература]. В одной из них в качестве главного фактора, модифицирующего ионосферу по всей ее высоте в период подготовки землетрясений (ЗТ), рассматриваются преимущественно вариации напряженности квазистатического электрического поля в приземной атмосфере. Вместе с тем в одном из возможных механизмов литосферно-ионосферного взаимодействия рассматривается также канал связи через атмосферные волны, в частности, через внутренние гравитационные волны (ВГВ), возбуждаемые у поверхности Земли перед землетрясениями (ЗТ) и распространяющиеся до высот ионосферы [Гохберг, 1999; Margeev et al., 2002]. Для проверки этих моделей требовался анализ результатов наблюдений как во временной, так и в частотной области, проводимых одновременно в комплексных наземных экспери-

ментах. Такая возможность в настоящее время реализуется в Институте космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН в обсерваториях “Паратунка” ( $\varphi = 52^{\circ}58.3'N$ ;  $\lambda = 158^{\circ}14.9'E$ ) и “Карымшина” ( $\varphi = 52.8^{\circ}N$ ;  $\lambda = 158.15^{\circ}E$ ). В качестве исходных данных используются суточные вариации напряженности квазистатического электрического поля ( $Ez$ -компонента), ОНЧ-радишумов и горизонтальной компоненты геомагнитного поля. В спектрах мощности суточных вариаций этих параметров нами впервые были выделены колебания, совпадающие с периодами ВГВ ( $T = 0.5–3.5$  ч). Более того, было обнаружено усиление интенсивности этих колебаний и изменение спектрального распределения перед ЗТ [Михайлов и др., 2003; Михайлов и др., 2004; Михайлов и др., 2008]. С другой стороны, эти колебания совпадают с сейсмогравитационными колебаниями Земли, которые возбуждают колебания атмосферного давления в приземной атмосфере и усиливаются в период подготовки ЗТ [Гармаш и др., 1989; Линьков и др., 1990]. Это позволило нам сделать вывод, что обнаруженные аномальные эффекты в колебаниях  $Ez$ -компоненты поля, ОНЧ-радишумов и гори-

зонтальной компоненты геомагнитного поля перед ЗТ являются эффектами литосферной природы. Возбуждаемые у поверхности Земли атмосферные волны, усиливаясь, распространяются до высот ионосферы. Возмущения нейтральной компоненты ионосферной плазмы благодаря столкновениям вызывают колебания заряженных частиц на различных высотах ионосферы. *D*-область ионосферы (60–90 км) ответственна за распространение ОНЧ-электромагнитных волн в приземном волноводе, а процессы в динамо-области (100–130 км) проявляются в вариациях горизонтальной компоненты геомагнитного поля. Поэтому суточные вариации ОНЧ-радишумов и горизонтальной компоненты геомагнитного поля были использованы нами в качестве косвенного средства изучения волновых процессов на соответствующих высотах ионосферы. Полагая, что аномальные эффекты в рассматриваемых параметрах вызваны ВГВ, возбуждаемыми в приземной атмосфере, представляло интерес детально исследовать в комплексе вариации их спектров мощности в полосе 0.5–3.5 ч и взаимосвязь между ними.

Цель работы: во-первых, оценить вклад различных источников ВГВ в колебания спектров мощности этих параметров и, во-вторых, выделить ожидаемые эффекты литосферной природы и тем самым проследить прохождение ВГВ на указанные выше высоты ионосферы. Для этой цели в работе применяются корреляционные методы анализа экспериментальных данных в частотной области, которые позволяют оценивать авто- и взаимные спектры мощности различных пар параметров, квадрат функции когерентности, а также частотные характеристики каналов связи: приземная атмосфера – соответствующий уровень ионосферы. Эта работа является продолжением исследований электрических и электромагнитных процессов и их взаимодействия в сейсмоактивном регионе на Камчатке, начатых авторами в 1999 г. [Михайлов и др., 2002].

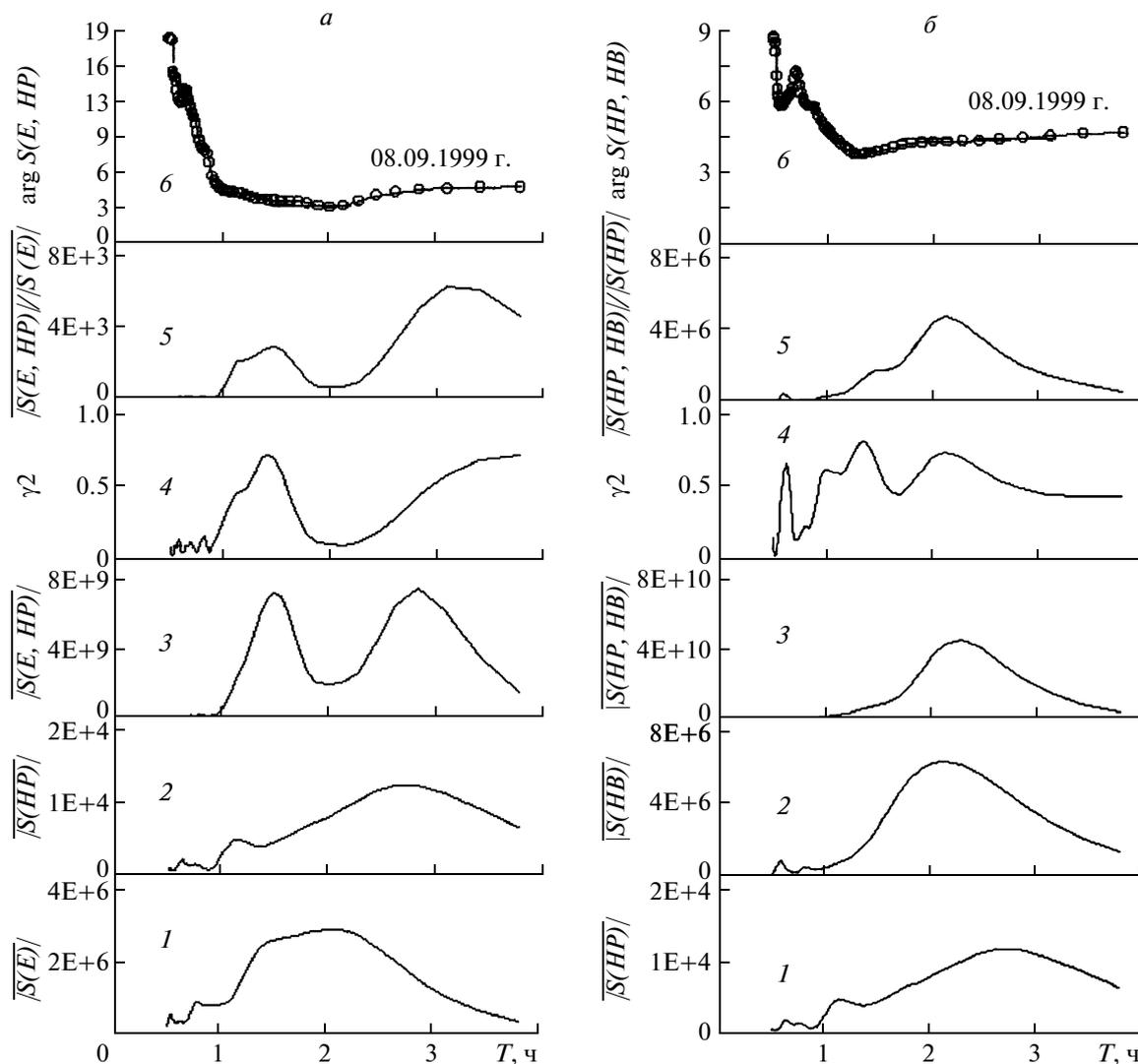
## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ОБРАБОТКИ

В качестве исходных данных использованы суточные вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере (*E<sub>z</sub>*-компонента), ОНЧ-радишумов и горизонтальной компоненты (*H*) геомагнитного поля, измеренные одновременно с одинаковой дискретностью по времени в одну минуту. Во временной области колебания в полосе периодов 0.5–3.5 ч представляют собой короткопериодные вариации шумового характера, наложенные на регулярные суточные вариации рассматриваемых параметров. Метод их выделения описан в работе [Михайлов и др.,

2003], а алгоритм их последующего спектрально-го анализа состоял в следующем:

1. Для оценки авто- и взаимной спектральной плотности мощности (далее, для краткости, спектров мощности) этих шумовых колебаний использован метод модифицированных периодограмм Уэлча [Welch, 1967]. В этом методе исходная суточная вариация разделялась на *n* коротких сегментов длительностью *T<sub>i</sub>* (с перекрытием на половину интервала). Для каждого сегмента рассчитывалась модифицированная периодограмма введением временного “окна” Ханна:  $u(t) = 0.5(1 - \cos \pi t / T_i)$  при  $0 < t \leq T_i$ . Для более детального расчета спектров по частоте на интервале *T<sub>i</sub>* использовалась процедура дополнения этого интервала нулями. Далее спектр мощности исходной суточной реализации определялся путем усреднения спектров, рассчитанных для этих коротких сегментов. Известно, что метод Уэлча при увеличении количества коротких сегментов при заданной длительности исходной реализации уменьшает дисперсию оценки мощности и повышает ее устойчивость, но при этом понижает разрешение спектров по частоте. Между длительностью *T<sub>i</sub>* и величиной *n* существует своего рода соотношение неопределенности. Нами были рассмотрены различные варианты этого соотношения. В результате для дальнейшей обработки были выбраны значения *T<sub>i</sub>* = 8 ч и *n* = 5.

2. Для оценки связи между двумя волновыми процессами рассчитывался их взаимный спектр мощности также с использованием метода Уэлча. В качестве базового процесса рассмотрены колебания *E<sub>z</sub>*-компоненты электрического поля. Аргумент взаимного спектра различных пар геофизических параметров позволяет определять, например, запаздывание или опережение волновых процессов в *D*- и динамо-областях ионосферы относительно колебаний электрического поля. Кроме того, рассчитывался взаимный спектр горизонтальных компонент геомагнитного поля, зарегистрированного на Камчатке в obs. “Паратунка” и в полярной obs. “Barrow” ( $\varphi = 71.32^\circ \text{N}$ ;  $\lambda = 203.38^\circ \text{E}$ ), для того, чтобы отделить на рассматриваемых высотах атмосферы эффекты источников ВГВ в приземной атмосфере от эффектов суббурь и геомагнитных возмущений. Взаимный спектр мощности, как известно [Бендат и Пирсол, 1983], является комплексной величиной  $S_{x,y}(f) = |S_{x,y}(f)| \exp(-j\theta_{x,y})$ , где  $|S_{x,y}(f)| = \sqrt{\text{Re} S_{x,y}^2 + \text{Im} S_{x,y}^2}$ , а аргумент  $\theta_{x,y}(f) = \arctg(\text{Im} S_{x,y} / \text{Re} S_{x,y})$ . В относительных единицах связь двух волновых процессов характеризуется величиной квадрата функции когерентности  $\gamma^2(f) = |S_{x,y}(f)|^2 / S_{x,x}(f) S_{y,y}(f)$ . Квадрат функции когерентности аналогичен квадрату нормированной корреляционной функции на данной частоте. Величина его мала, когда мало отношение полезного



**Рис. 1.** Пример корреляционной обработки в полосе периодов 0.5–3.5 ч суточных вариаций  $E_z$ -компоненты электрического поля в приземной атмосфере и  $H$ -компоненты геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” и “Barrow” 8 сентября 1999 г.:  $S(E)$  – средний спектр мощности  $E_z$ -компоненты;  $S(HP)$  – средний спектр мощности  $H$  в обс. “Паратунка”;  $S(HB)$  – соответственно в обс. Барроу;  $S(E, HP)$  и  $S(HP, HB)$  – средние взаимные спектры мощности, где  $|S(E, HP)|$ ,  $|S(HP, HB)|$  и  $\arg$  – соответственно их модули и аргументы;  $\frac{|S(E, HP)|}{S(E)}$  и  $\frac{|S(HP, HB)|}{S(HP)}$  – квадрат функции прохождения ВГВ;  $\gamma^2$  – квадрат функции когерентности.

сигнала к шуму, когда два процесса между собой не связаны линейно и когда второй процесс зависит не только от базового процесса, но и от других источников [Бендат и Пирсол, 1983]. Такие ситуации реализовались в анализируемых нами данных. Квадрат функции прохождения волн через атмосферу оценивается следующим образом:  $H(f)^2 = S_{x,y}(f)/S_{x,x}(f)$ .

Пример предложенного метода обработки исходных данных  $E_z$ -компоненты  $S(E)$  и  $H$ -компоненты  $S(HP)$  приведен на рис. 1. (Из-за малости значений частоты в полосе периодов 0.5–3.5 ч спектры мощности представлены более наглядно

в зависимости от периодов.) На левом фрагменте рисунка (а) показаны автоспектры  $E_z$ -компоненты электрического поля  $S(E)$  и горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $S(HP)$ , которые содержат интенсивные колебания в широкой полосе периодов от 1 до 3.5 ч. Вместе с тем во взаимном спектре  $S(E, HP)$  четко выделились две полосы колебаний: вблизи  $T = 1.5$  и  $2.8$  ч, аргументы которых имеют производные по периоду противоположного знака, что указывает на различные источники этих колебаний. Отрицательный наклон фазы вблизи  $T = 1.5$  ч свидетельствует о том, что процесс в  $H$ -спектре запаздывает относительно

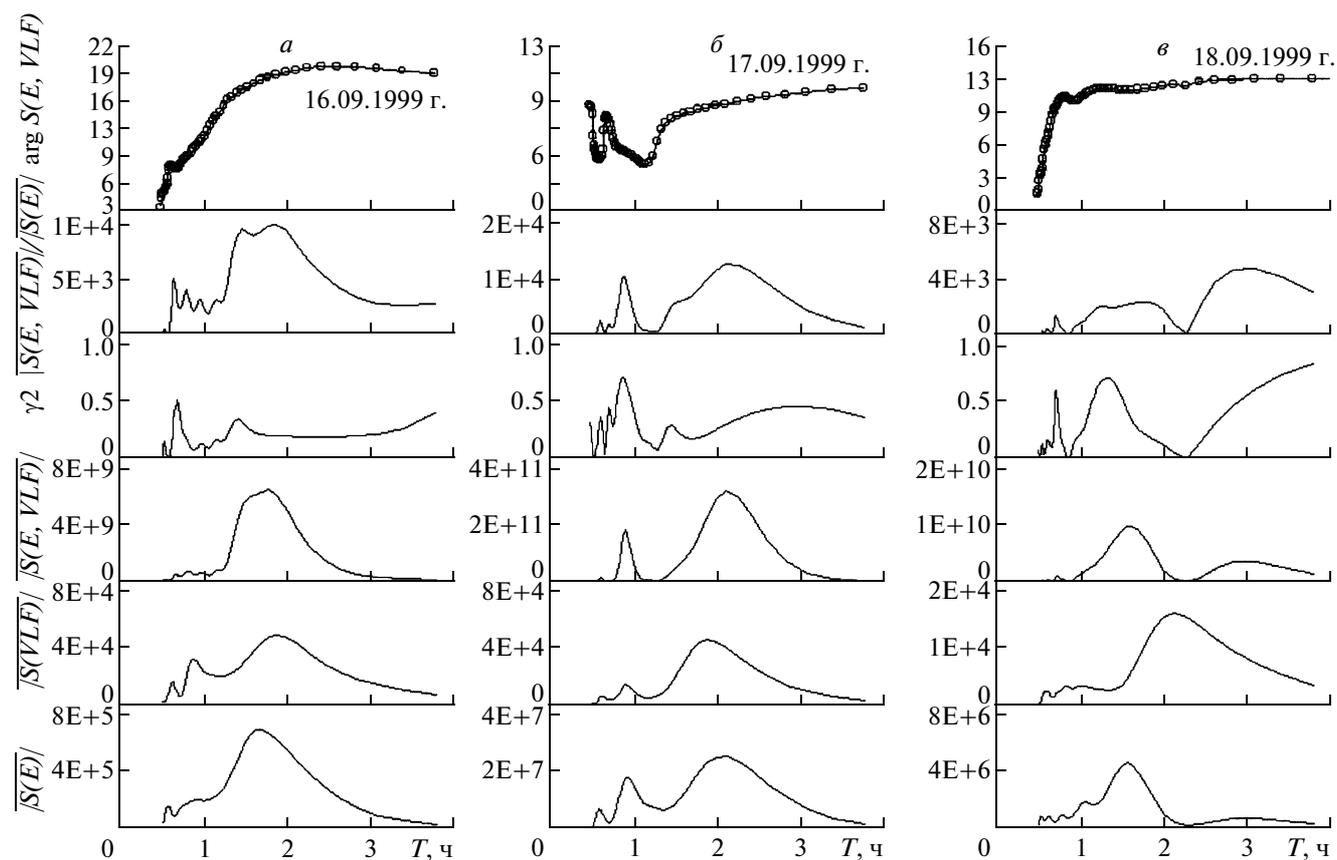


Рис. 2. Совокупность спектральных характеристик для последовательности дней: 16, 17, 18 сентября 1999 г. для пары:  $Ez$ -компоненты и ОНЧ-радишума (VLF).

но колебаний в  $E$ -спектре с величиной квадрата функции когерентности  $\sim 0.7$ . Это указывает на тесную связь волновых процессов в приземной атмосфере и на уровне динамо-области ионосферы. Квадрат функции прохождения волн из приземной атмосферы до уровня динамо-области ионосферы “вырезал” из спектра мощности электрического поля компоненты вблизи  $T = 2$  ч. Положительный наклон фазы на периоде  $T = 2.8$  ч указывает на то, что волновые процессы в приземной атмосфере запаздывают относительно процессов в динамо-области. На правом фрагменте рисунка (б) показаны соответствующие спектральные характеристики при взаимодействии процессов в динамо-областях на Камчатке и в полярной ионосфере в обл. “Barrow”,  $S(HB)$ . Максимумы в автоспектрах мощности  $S(HP)$  и  $S(HB)$  смещены относительно друг друга, а их взаимный спектр  $|S(HP, HB)|$  имеет всего лишь один максимум на  $T = 2.4$  ч с положительным наклоном фазы, указывающим, что волновой процесс в динамо-области на Камчатке запаздывает относительно процесса в полярной ионосфере с величиной функции когерентности также порядка 0.7, т.е. источник максимальной мощности в спектрах горизонтальной компоненты геомагнитного поля

на Камчатке находится выше в полярной области, где в этот день в суточной вариации горизонтальной компоненты наблюдались эффекты суббури. Из анализа всех спектров, приведенных на рисунке, следует, что колебания в спектрах мощности электрического поля и горизонтальной компоненты геомагнитного поля на Камчатке на  $T \sim 1.5$  ч вызваны источниками ВГВ в приземной атмосфере, а на  $T \sim 2.4\text{--}2.8$  ч — источником в полярной области или выше.

### 3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Во время непрерывных наблюдений в сентябре и октябре 1999 г. одновременно проводилась регистрация напряженности  $Ez$ -компоненты электрического поля, величины осадков, существенно влияющих на вариации его напряженности в полосе периодов 0.5–3.5 ч [Михайлов и др., 2003], атмосферного давления, интенсивности ОНЧ-радишумов ( $f = 5.3$  кГц), значений геомагнитного поля на Камчатке и в обл. “Barrow”, а также уровня глобальной геомагнитной активности через величину  $Kp$ -индекса. Среднесуточные вариации этих параметров показаны на рис. 1 в работе [Михай-

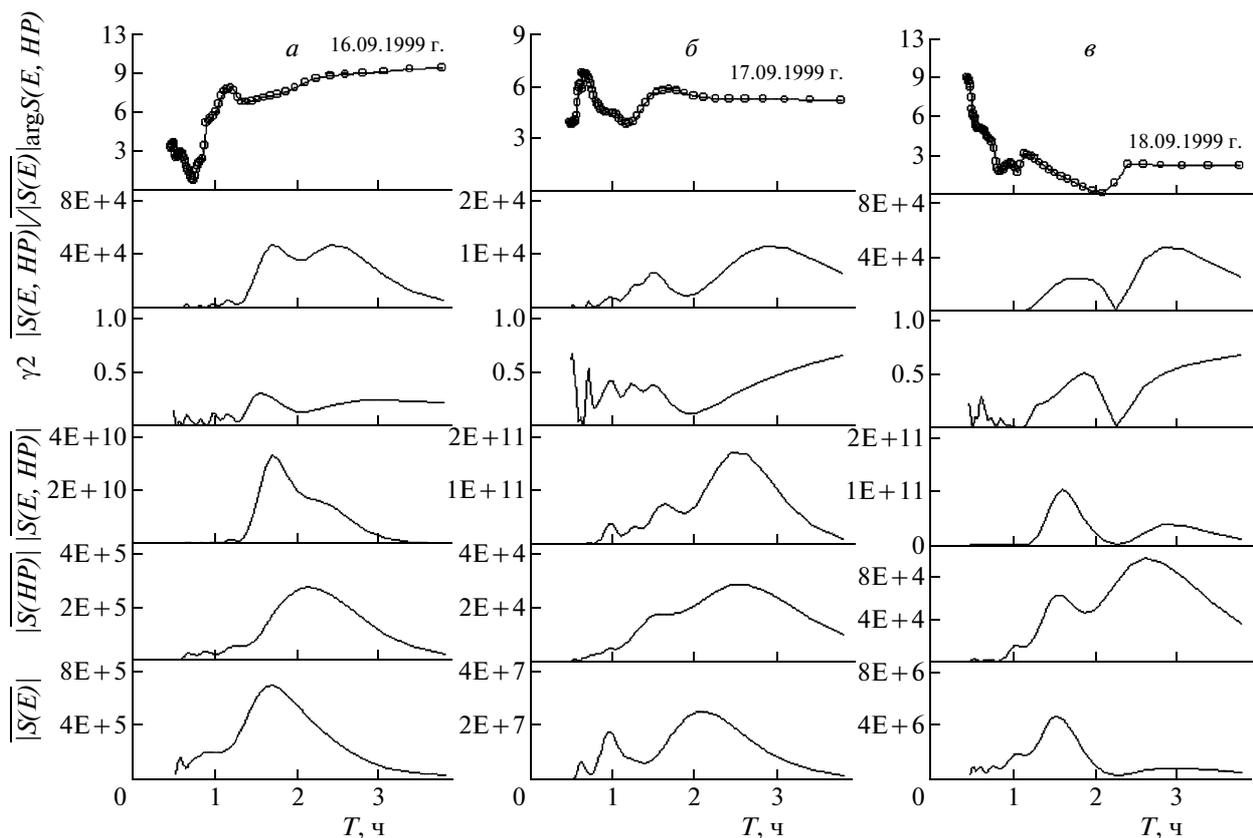


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для пары:  $E_z$ - и  $H$ -компонент в obs. “Паратунка” (HP).

лов и др., 2002]. Для решения поставленной задачи были отобраны дни с одновременными доброкачественными записями четырех параметров с дискретностью по времени 1 мин. Эти дни выпали на сентябрь: пять дней со слабой ( $Kp < 3$ ), шесть дней со средней ( $3 < Kp < 4$ ) и семь дней с высокой геомагнитной активностью ( $Kp > 4$ ). Кроме того, особое внимание уделено дню с сильными осадками 26 сентября и двум дням 5 и 17 сентября, когда при умеренной геомагнитной активности и в отсутствие осадков в вариациях  $E_z$ -компоненты электрического поля наблюдались аномальные эффекты бухтообразного понижения напряженности поля, сопровождаемые ЗТ 6 сентября (15 : 04 : 52.81 UT,  $\varphi = 52.10^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 159.15^\circ\text{E}$ ,  $h = 33$  км,  $Mb = 5.0$ ) и 18 сентября (21 : 28 : 33.17 UT,  $\varphi = 51.21^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 157.56^\circ\text{E}$ ,  $h = 60$  км,  $Mb = 6.0$ ).

Как показали результаты обработки всех данных за сентябрь, характер взаимных и фазовых спектров изменяется по-разному ото дня ко дню, что не позволило из-за ограниченного объема данных выявить какие-либо статистические особенности. Поэтому ниже приводятся спектральные характеристики, типичные для выделенных выше групп дней. Пример для спокойных геомагнитных условий в отсутствии осадков и аномалий в поведении электрического поля приведен на

рис. 1. Выделенные характерные особенности в поведении спектров мощности наблюдались для всех дней этой группы.

Из-за отсутствия фоновых статистических спектральных характеристик влияние сейсмичности на них рассмотрено в последовательности дней (по аналогии с методом наложения эпох): день до аномалии в напряженности  $E_z$ -компоненты поля, день с аномалией и день после нее. Это последовательности дней: 4, 5, 6 и 16, 17, 18 сентября.

На рис. 2–4 показана совокупность спектральных характеристик для землетрясения 18 сентября. На рис. 2 показаны автоспектр электрического поля  $S(E)$ , ОНЧ-радишума  $S(VLF)$ , их взаимный  $|S(E, VLF)|$  и фазовый  $\arg S(E, VLF)$  спектры, а также  $\gamma^2$  и квадрат функции прохождения. На левом фрагменте (a) 16 сентября видно, что во взаимном спектре присутствует максимум интенсивности вблизи периода  $T \sim 1.8$  ч с величиной  $\gamma^2 \sim 0.2$ . Аналогичная картина имеет место и в вариациях взаимного и фазового спектров  $E_z$ -компоненты поля и горизонтальной компоненты геомагнитного поля на Камчатке (рис. 3a). Однако во взаимном спектре горизонтальных компонент геомагнитного поля на Камчатке и в obs. Barrow (рис. 4a) присутствующий единствен-

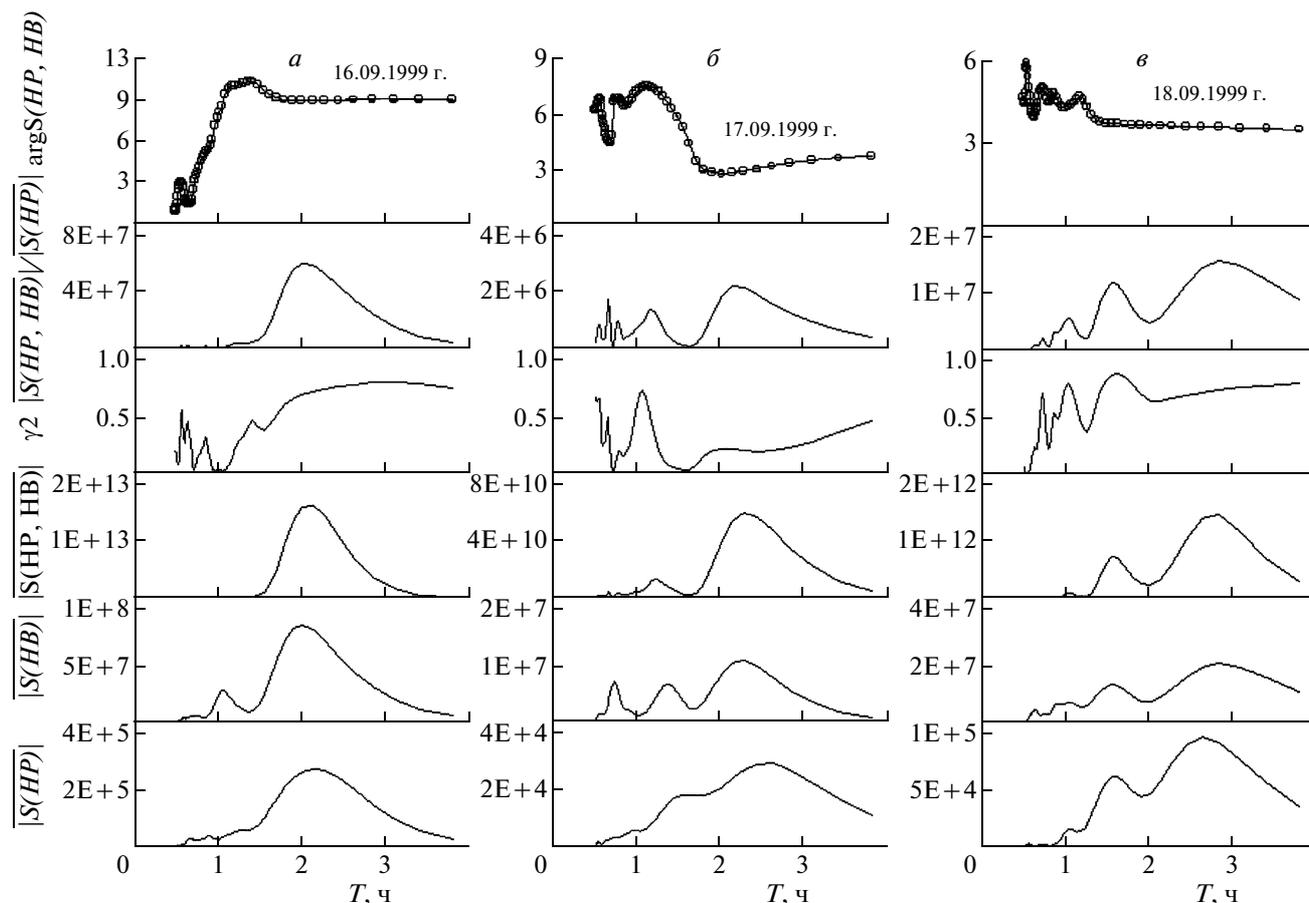


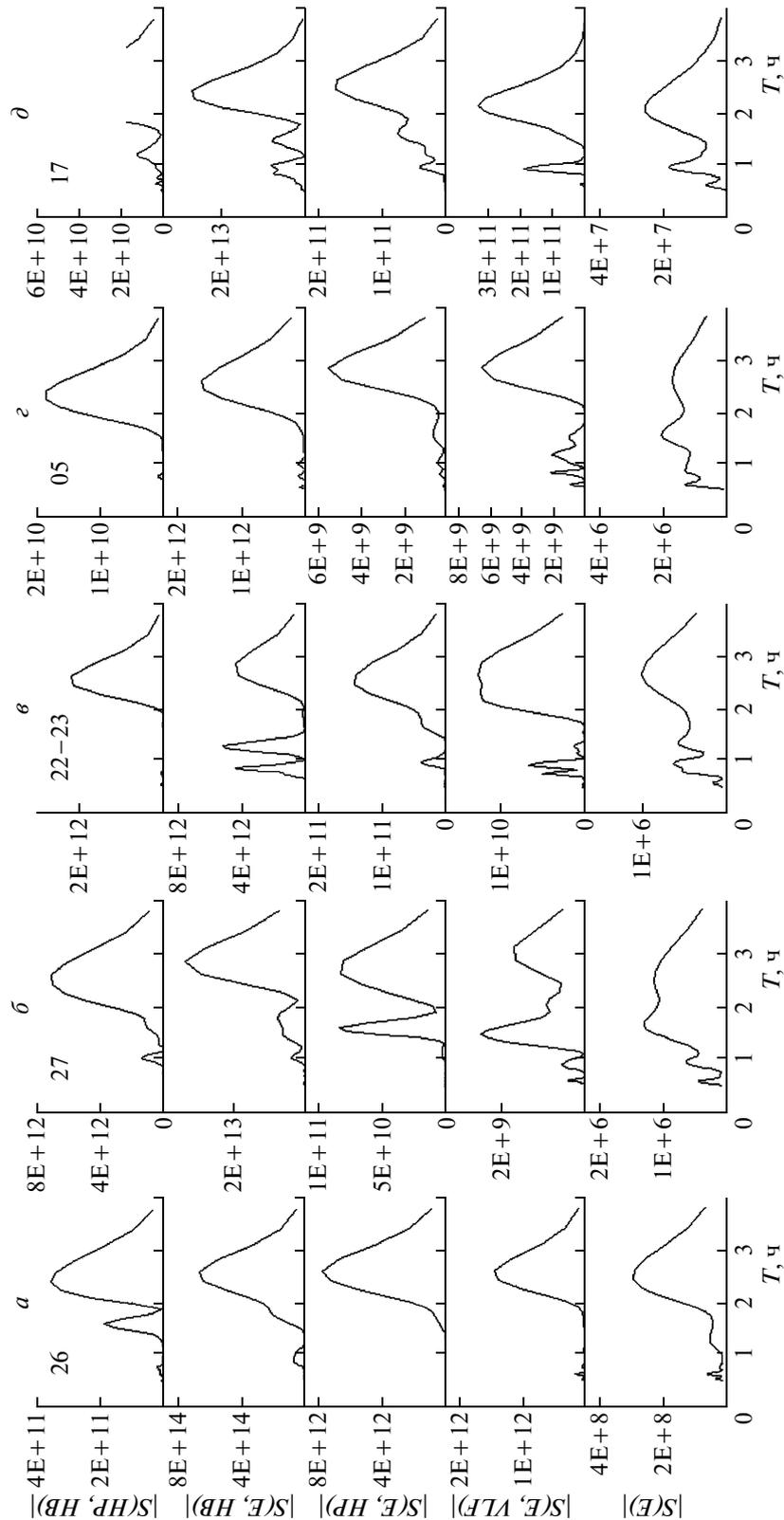
Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для пары  $H$  в obs. “Паратунка” ( $HP$ ) и obs. “Barrow” ( $HB$ ).

ный максимум на  $T \sim 2.2$  ч имеет  $\gamma^2 \sim 0.7$ , указывая на сильную корреляцию волновых процессов в динамо-областях на Камчатке и в полярной ионосфере. Взаимное незначительное смещение максимумов в автоспектрах рассмотренных параметров в полосе периодов 1.8–2.2 ч, возможно, связано с недостаточным разрешением спектров мощности по частоте. Характерно, что фазовый спектр всех пар параметров в этой полосе периодов имеет положительный наклон, указывающий, что источник колебаний в приземной атмосфере, в  $D$ - и динамо-областях ионосферы на Камчатке находится либо в полярной динамо-области ионосферы, либо выше ее.

Средний фрагмент рисунка (б) представляет взаимодействие волновых процессов 17 сентября. В автоспектрах  $S(E)$  и  $S(VLF)$  (рис. 2б) в дополнение к максимумам 16 сентября появился максимум на  $T \sim 1$  ч со значением  $\gamma^2 \sim 0.7$  и с отрицательным фазовым наклоном взаимного спектра, указывающим на источник колебаний в приземном слое атмосферы. Максимум во взаимном спектре на  $T \sim 2.2$  ч имеет положительный наклон фазы. Изменился спектральный состав функции

прохождения волн через атмосферу по сравнению с рис. 1: максимумы имели место на  $T = 1$  и 2 ч, а минимум — на  $T = 1.3$  ч. Во взаимном спектре  $|S(E, HP)|$  (рис. 3б) видна серия слабо разрешенных по периоду всплесков с максимальной интенсивностью на  $T \sim 2.5$  ч и со слабым положительным наклоном фазы. Максимум на  $T \sim 1$  ч также присутствует во взаимном спектре с отрицательным наклоном фазы, но интенсивность его мала. Это указывает на слабый вклад в динамо-область по сравнению с  $D$ -областью источника ВГВ в нижней атмосфере. Об этом свидетельствует и величина  $\gamma^2$ , равная 0.4. Во взаимном спектре  $|S(HP, HB)|$  (рис. 4б) наблюдаются два максимума на  $T \sim 1.3$  и 2.3 с  $\gamma^2 \sim 0.7$  и 0.3 соответственно с положительным наклоном фазового спектра, что указывает на вклад в волновой процесс в динамо-области на Камчатке источников в динамо-области в полярной ионосфере или выше.

18 сентября (правый фрагмент рисунков) динамика спектров всех рассмотренных пар параметров заметно изменилась. Во взаимных спектрах  $|S(E, VLF)|$  рис. 2в,  $|S(E, HP)|$  рис. 3в и  $|S(HP, HB)|$  рис. 4в выделились два максимума на периодах



**Рис. 5.** Автоспектры мощности квазистатического электрического поля и взаимные спектры мощности различных пар геофизических параметров в следующие дни: 26 (а), 27 (б), 22–23 (в), 05 (г) и 17 (д) сентября. Обозначения кривых те же, что и на рис. 1.

1.5 и 2.5 – 3 ч, подобно кривым рис. 1. Знак изменения фазы взаимных спектров на  $T < 2$  ч указывает на источник колебаний в нижней атмосфере, а на периодах 2.5–3 ч – выше динамо-области.

Аналогичная обработка различных пар параметров выполнена для наиболее интересных геофизических условий. На рис. 5 приведены автоспектры электрического поля  $E_z$ , выбранного нами в качестве базового параметра, а также взаимные спектры этого параметра со спектрами ОНЧ-радишумов и горизонтальных компонент геомагнитного поля, наблюдаемого одновременно на Камчатке и в obs. “Ваггов”. В день с сильными осадками 26 сентября в отсутствие геомагнитной и сейсмической активностей на всех уровнях атмосферы присутствуют колебания вблизи периода  $T \sim 2.5$  ч, порожденные удаленными источниками ВГВ выше динамо-области полярной ионосферы. С ростом геомагнитной активности в отсутствие осадков и сейсмической активности 27 сентября ( $\Sigma Kp \sim 30$  при серии суббурь) во взаимных спектрах  $|S(E, VLF)|$  и  $|S(E, HP)|$  появляется дополнительный максимум на  $T \sim 1.5$  ч, также порожденный удаленным источником ВГВ. 22–23 сентября при изолированной магнитной буре ( $Kp \sim 7$ ) в автоспектрах  $S(E)$  и взаимных спектрах  $|S(E, VLF)|$ ,  $|S(E, HP)|$ ,  $|S(E, HB)|$  появился дополнительный максимум на  $T \sim 1$  ч. Источник этих колебаний, как было получено при анализе результатов полной обработки, также расположен выше динамо-области полярной ионосферы. На двух правых фрагментах рисунка приведены спектральные характеристики 5 и 17 сентября накануне двух ЗТ. 5 сентября автоспектр электрического поля  $S(E)$  почти плоский в полосе периодов 0.5–3.5 ч. Во взаимных спектрах всех пар параметров присутствует основной интенсивный максимум на  $T \sim 2.5$  ч. Кроме того, во взаимном спектре  $|S(E, VLF)|$  появился дополнительный максимум относительно слабой интенсивности на  $T \sim 1$  ч, который практически отсутствует во взаимном спектре  $|S(E, HP)|$ . Фазовые спектры в этой полосе периодов имеют отрицательный наклон. 17 сентября накануне более сильного ЗТ с магнитудой порядка 6 в автоспектре электрического поля  $S(E)$  четко выделяются две полосы колебаний вблизи  $T \sim 1$  и 2.5 ч с практически равной интенсивностью. Эта особенность повторяется и во взаимном спектре  $|S(E, VLF)|$ , но интенсивность на  $T \sim 1$  ч во взаимном спектре  $|S(E, HP)|$  заметно уменьшается по сравнению с интенсивностью на  $T \sim 2.5$  ч. Сравнение спектров мощности этих двух фрагментов позволяет сделать вывод, что ВГВ источников в нижней атмосфере при высокой сейсмической активности ( $Mb = 6$ ) способны достигать высот  $D$ - и частично динамо-областей ионосферы, а при слабой активности ( $Mb = 5$ ) только высот  $D$ -области.

Особый случай составляет день 26 сентября, когда обильные осадки исказили суточный ход

напряженности  $E_z$ -компоненты поля с бухтообразной аномалией и вызвали усиление интенсивности колебаний в полосе периодов 0.5–3.5 ч [Михайлов и др., 2003],  $Kp \sim 3$ –4. Как видно на рисунке (крайний левый фрагмент), в автоспектре  $S(E)$  и во всех взаимных спектрах четко выделяется единственный максимум на  $T \sim 2.5$  ч, источник которого, как показала полная обработка спектров, выше динамо-области на Камчатке. Сравнение этих результатов со спектрами накануне сильного землетрясения 18 сентября показывает, что обильные осадки усиливают интенсивность колебаний в спектре мощности электрического поля на порядок по величине, но при этом и в автоспектре  $S(E)$ , и в соответствующих взаимных спектрах отсутствуют компоненты на периоде  $T \sim 1$  ч. При наличии сильной геомагнитной аномалии взаимодействие волновых процессов в приземной атмосфере и на разных высотах ионосферы, как видно на втором и третьем фрагментах рисунка, довольно сложное и неоднозначное.

#### 4. ВЫВОДЫ

Вся совокупность полученных результатов о взаимосвязи волновых процессов в полосе периодов 0.5–3.5 ч в приземной атмосфере, в  $D$ - и динамо-областях ионосферы по наблюдениям на Камчатке в сентябре 1999 г. позволяет сделать следующие выводы:

- использование в качестве косвенного средства суточных вариаций напряженности квазистатического электрического поля в приземной атмосфере, ОНЧ-радишумов и горизонтальной компоненты геомагнитного поля в обсерваториях “Паратунка” и “Ваггов”, наблюдаемых одновременно, позволило исследовать взаимосвязь волновых процессов в приземной атмосфере и на высотах  $D$ - и динамо-областей ионосферы;

- использование корреляционного анализа данных в частотной области совместно с методом модифицированных периодограмм для оценки авто- и взаимных спектров мощности исследуемых параметров и функций когерентности позволило разделить источники колебаний в их спектрах мощности;

- показано, что колебания в спектрах мощности  $E_z$ -компоненты электрического поля, ОНЧ-радишумов и горизонтальной компоненты геомагнитного поля на Камчатке на периодах  $T < 1.5$  ч в сейсмоактивный период вызваны волновыми процессами в приземной атмосфере, а на  $T > 1.5$  ч – источниками ВГВ в динамо-области в полярной ионосфере или выше ее, независимо от уровня метеорологической, сейсмической и геомагнитной активностей. Авторы работы [Бобова и др., 1990] предполагают, что колебания в спектрах

мощности геомагнитного поля на  $T > 1.5$  ч вызваны процессами солнечного происхождения.

Работа выполнена по поддержке РФФИ (гранты № 00-05-65020 и 04-05-65100).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бендат Дж., Персол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 540 с. 1989.
- Бобова В.П., Осипов К.С., Савина Н.Г., Владимирский Б.М., Пудовкин М.И. О возможной сейсмической природе длиннопериодных ( $T = 1-4$  ч) вариаций геомагнитной возмущенности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 30. № 3. С. 492–494. 1990.
- 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.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука, 174 с. 1988.
- Гохберг М.Б. Взаимодействие процессов в литосфере и у земной поверхности с внешними оболочками земли // Геофизика на рубеже веков/Ред. В.Н. Страхов и др. М.: ОИФЗ РАН. С. 163–169. 1999.
- 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.
- Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 304 с. 1992.
- 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 аэрономия. Т. 42. № 6. С. 805–813. 2002.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Бузевич А.В., Смирнов С.Э. Вариации спектров мощности электрического поля приземной атмосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 3. С. 422–428. 2003.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Дружин Г.И., Капустина О.В. Обнаружение атмосферных волн в спектрах мощности атмосферных помех на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 44. № 2. С. 245–253. 2000.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Спектры атмосферных волн в динамо-области ионосферы на Камчатке // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 1. 2008.
- Mareev E.A., Iudin D.I., Molchanov O.A. Mosaic source of internal gravity waves associated with seismic activity // Seismo – Electromagnetics: Lithosphere – Atmosphere – Ionosphere Coupling/Eds. M. Hayakawa and O.A. Molchanov. Tokyo: TERRAPUB, P. 335–342. 2002.
- Pulinetz S.A., Boyarchuk K.A. Ionosphere precursors of earthquakes. Berlin: Springer, 315 p. 2004.
- Welch P.D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short modified periodograms // IEEE Trans. Audio and Electro acoustic. V. AU-15. № 2. P. 70–75. 1967.