

Возможные атмосферные эффекты в нижней ионосфере по наблюдениям
атмосферных радиошумов на Камчатке во время тропических циклонов

Ю.М.Михайлов¹, Г.А.Михайлова¹, О.В.Капустина¹, Г.И.Дружин²,
Н.В.Чернева²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.
Н.В.Пушкова, РАН, Троицк (Московская обл.) e-mail: yumikh@izmiran.ru

² Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО
РАН, пос.Паратунка (Петропавловск-Камчатская обл.) e-mail:
ikir@ikir.kamchatka.ru

Поступила в редакцию

Выполнен временной и спектральный анализ суточных вариаций атмосферных радиошумов на частоте 4,65 кГц, наблюдаемых на Камчатке в августе и октябре месяцах 2002 г. во время сильных тропических циклонов. Показано, что тропические циклоны являются мощным источником внутренних гравитационных волн, способных проникать до высот 60-90 км нижней ионосферы. Максимумы в спектрах мощности атмосферных радиошумов приходятся на периоды $T=2-3$ ч, интенсивность которых в 1.5-2 раза превышают фоновый уровень и заметно изменяются в процессе развития циклонов. В полосе спектров с $T=0.5-36$ ч выделена основная компонента с $T=24$ ч, в то время как вторая и третья гармоники сильно изменяются и по величине периодов, и по интенсивности. Проведена пеленгация электромагнитных излучений в диапазоне 3 – 60 кГц. Показано, что наиболее интенсивные грозовые разряды наблюдаются вблизи эпицентра циклона, перемещение циклона происходит синхронно с перемещением грозовых разрядов, мощные акусто-гравитационные волны, вероятно, возникают вблизи эпицентра циклона от частых грозовых разрядов.

Выполненная работа показала эффективность использования косвенных методов изучения метеорологических эффектов в нижней ионосфере.

1. Введение

Тропические циклоны (ураганы и тайфуны) способны воздействовать на самые нижние слои атмосферы, сильно изменяя такие метеорологические параметры, как давление и ветер. Известно, что эти атмосферные волны, усиливаясь с высотой, проникают в ионосферу. Поскольку на высотах нижней ионосферы ($h = 55-90$ км) концентрация нейтральных частиц более чем на десять порядков превышает концентрацию заряженных частиц, волновые движения в этой среде были уверенно обнаружены прямыми методами измерения температуры, давления, плотности и скоростей ветра сравнительно давно (Госсард и Хук, 1978; Метеорологические ...1987).

Был обнаружен широкий спектр атмосферных волн: планетарные волны, солнечно-суточные тепловые приливные и гравитационные, акустико-гравитационные волны, турбулентность и т.д., т.е. весь спектр атмосферных волн в нейтральной компоненте нижней ионосферы. Вместе с тем в результате столкновения нейтральных частиц с заряженными, последние вовлекаются в движение с нейтральными частицами. Это позволяет использовать радиофизические методы для исследования волновых процессов в нижней ионосфере. Кроме метода частичных отражений КВ-радиоволн [Беликович и др., 1986; Бахметьева и др., 1977], широко используются для этих целей наблюдения вариаций амплитуды и фазы радиосигналов СДВ [Безродный и др., 1977)], ДВ [Takadi et al. 1980] (см. Метеорологические ...1987). Кроме прямых радиофизических методов для исследований нижней ионосферы с давних пор традиционно используются косвенные методы. В качестве косвенных средств используются электромагнитные сигналы, генерируемые молниевыми разрядами, так называемые атмосферерики и атмосферные радишумы.

Свойства их распространения в волноводе Земля-ионосфера определяются параметрами нижней ионосферы ($h = 60-90$ км, области D и E) [Краснушкин, 1961]. Используя записи атмосферных радишумов на Камчатке на частотах 4,65 и 5,3 кГц, в спектрах мощности суточных вариаций этих излучений были выделены устойчивые регулярные компоненты, совпадающие с периодами солнечно-суточных тепловых приливов с периодами $T = 4, 8, 12, 16, 24$ ч, а также компоненты, совпадающие с периодами внутренних гравитационных волн (ВГВ) в полосе $T = 0,5-3$ ч (Михайлов и др., 2004). Особенностью ВГВ является их сильная изменчивость по спектру и интенсивности в зависимости от различных геофизических параметров, а также отсутствие каких-либо структурированных периодических составляющих (Госсард и Хук, 1978; Метеорологические... 1987).

Цель работы: изучение реакции нижней ионосферы на сильные атмосферные возмущения (тропические циклоны) в Тихом океане по наблюдениям атмосферных радишумов на Камчатке в августе и октябре месяцах 2002 г. Интерес к этой задаче возник в связи с тем, что перед землетрясением 18 сентября 1999 г. с $M=6.1$ при наличии аномалии в квазистатическом электрическом поле в спектре мощности атмосферных радиопомех было обнаружено усиление интенсивности в полосе периодов 0.5-3 ч.

2. Методы регистрации и обработки экспериментальных данных

Метод регистрации атмосферных шумов. Условия наблюдений требовали длительной работы аппаратуры в автономном режиме при минимальном уровне промышленных помех. В качестве пункта измерений был выбран район Левая Авача ($\varphi = 54^\circ\text{N}$, $\lambda = 158^\circ\text{E}$). Питание аппаратуры осуществлялось от аккумуляторов, подзаряжаемых с помощью комплекта солнечных батарей. В качестве приемной аппаратуры использовался комплекс АНЧ-2МЕ, который включал в себя два канала широкополосного

приема в диапазоне частот 20 Гц - 20 кГц и двухканальный спектроанализатор на частотах $f=140, 400, 800$ Гц, 4,65 и 15 кГц. Полосы пропускания фильтров составляют $1/8$ от центральной частоты фильтра [Воробьев и др. 1981]. Такого типа приемные устройства были установлены на борту спутников «Интеркосмос-18, -19», «Космос-1809» и «OREOL-3». В качестве датчиков использовались ферритовые антенны с обратной связью типа МПЗ, описанные в цитированной выше работе. Они были ориентированы в направлении N-S, E-W и удалены на расстояние порядка 100 м от регистрирующей аппаратуры. Сигналы с выхода широкополосного приемника через АЦП в течение одной минуты в начале каждого часа записывались на жесткий диск переносного компьютера (ПК). Частота оцифровки входного сигнала – 50 кГц, динамический диапазон цифровой записи по модулю составляет 66 дБ. Сигналы с выходов узкополосных фильтров записывались в память ПК с дискретностью 1 с, далее усреднялись за 1 мин и заносились в файл, где одновременно фиксировались данные месяца, дня, часа, минуты каждого отсчета. Ниже приведены результаты анализа данных, полученных в узкополосном режиме регистрации только для одного канала с антенной, ориентированной в направлении N-S, т.е. практически вдоль меридиана, проходящего через приемный пункт.

Пеленгационный метод. С применением ОНЧ-пеленгатора [Дружин и др, 2001], разработанного и изготовленного в ИКИР ДВО РАН, осуществлялась регистрация импульсных ОНЧ-излучений, превышающих определенный порог, уровень которого можно изменять. ОНЧ-пеленгатор имеет антенную систему, состоящую из штыря и двух вертикально расположенных взаимно-перпендикулярных рамок, предварительные усилители, расположенных у основания антенной системы, кабельную линию для связи с блоками аналоговой и цифровой обработки сигнала. Блок аналоговой обработки сигнала включает в себя усилители, режекторный фильтр, настроенный на частоту 50 Гц, фильтры нижних и верхних частот с

полосой пропускания 3 ± 60 кГц. Цифровая обработка сигнала проводится с применением аналого-цифрового преобразователя и персонального компьютера. Калибровка ОНЧ-пеленгатора осуществляется от генератора, сигнал с которого подается через конденсатор на вход усилителя штыревой антенны, а на рамочные – через калибровочную рамку.

Направление на источник излучения определяется по формуле:

$$\beta = \arctg(H_{C-Ю}/H_{B-З}),$$

где $H_{C-Ю}$ – среднеквадратичное значение напряжения сигнала, зарегистрированное с рамочной антенны, плоскость которой ориентирована в направлении север-юг, $H_{B-З}$ – восток-запад.

Неоднозначность в определении пеленга на источник излучения устраняется с помощью сигнала, принимаемого со штыревой антенны. Достоверность в определении пеленга проверялась по радиостанциям, работающим в диапазоне СДВ. При этом ошибка пеленга составляла 2 – 3 градуса.

Метод обработки. Для выделения колебаний в спектрах атмосферных радишумов были обработаны их суточные вариации на частоте $f=4,65$ кГц методом, опубликованным ранее (Михайлов и др. 2004). Напомним его на примере записи 22.08.2002г (рис.1). Из суточного хода (кривая 1, произвольные единицы) исключалось его среднее значение $\bar{A}$, равное сумме отдельных измерений с дискретностью $\Delta t=1$ мин, деленной на их число. Полученная разностная кривая 2 дополнялась нулями до 2048 точек, необходимых для использования алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Спектральная плотность мощности (ниже всюду для краткости – спектр мощности) дополненного ряда значений рассчитывалась методом периодограмм с прямоугольным временным «окном» на частотах $f_k = k \Delta f$ с соответствующим шагом по частоте $\Delta f = 1/2048 \Delta t = 8,14 \cdot 10^{-6}$ Гц, где $k = 1, 2, \dots, 1024$ (сплошная кривая на фрагменте 4 с левой осью ординат). Этот спектр в функции периодов ($T_k = 1/f_k$) приведен слева на фрагменте 5. В нем

преобладают колебания с периодами $T \approx 7$ ч, но также присутствуют колебания с более короткими периодами, но более слабой интенсивности. Это, как показали результаты предварительного анализа (Михайлов и др. 2004), наиболее изменчивая часть спектра, совпадающая с периодами ВГВ в атмосфере Земли. Для ее выделения с целью дальнейшего детального изучения выполнена дополнительная фильтрация исходного спектра (сплошная кривая на фрагменте 4) в полосе 0,5-3ч. Результирующий спектр показан на фрагменте 4 (штриховая линия с правой осью ординат) и справа на фрагменте 5 в функции периодов. Соответствующая ему временная форма как обратное преобразование Фурье исходного спектра показана на фрагменте 3. Как видно, это шумового характера сигнал с интенсивностью ~ 100 ед., наложенный на суточную вариацию. Анализ этих шумов во время тропических циклонов и составляет содержание работы. При этом исходные суточные кривые и соответствующие спектры мощности приводятся в произвольных единицах, но при неизменных параметрах приемно-регистрирующего комплекса во время наблюдений.

3. Основные результаты

Максимум в распределении частоты появления и интенсивности тропических циклонов в их сезонном распределении приходится на август-октябрь месяцы, когда поверхность океана достаточно хорошо прогрета (<http://www.npmoc.navy.mil/jtwc/atcr>).

В августе 2002г. в западной части Тихого океана происходили такие тропические циклоны, как Phanfone (10.08-20.08), Rusa (22.08-01.09), Sinlaku (28.08-08.09), траектории которых приведены на рис.2а, 2б, 2в соответственно, а в октябре – Bavi (07.10-14.10) и Maysak (25.10-30.10) (рис.2г). Вместе с тем были и относительно спокойные дни. Это 6-9 и 20-21 августа. Эти данные приняты нами как фоновые при анализе отклика нижней

ионосферы на мощные атмосферные процессы. Кроме того, были выделены дни со слабым циклоном (2-5 августа).

Временной и спектральный анализ атмосферных радиошумов.

Результаты детального спектрального анализа в полосе периодов 0,5-3ч. показаны в динамике на рис.3 для циклонов Rusa и Sinlaku, совпадающих по времени в период с 28 августа по 1 сентября (TY Sinlaku следует за TY Rusa почти по тому же маршруту с запаздыванием в шесть суток). На верхнем фрагменте показана последовательность суточных вариаций атмосферных радиошумов. На регулярных суточных кривых четко проявляются наложенные короткопериодные шумы, особенно в дневное местное время. Последовательность спектров этих шумов приведена на нижнем фрагменте рисунка. Видно, что интенсивность отдельных компонент спектров довольно случайным образом изменяется ото дня ко дню. Максимумы в спектрах приходятся на периоды $T = 2-3$ ч, интенсивность которых заметно возросла 29 и 31 августа при совпадении по времени двух циклонов. Аналогичная последовательность спектров получена для сильного тайфуна Phanfone. К сожалению, мы имели данные наблюдений только для начальной стадии его, еще не достигшей своей максимальной интенсивности (16 августа). Характер спектров (рис.4, нижний фрагмент) и их интенсивность совпадают с приведенными на рис.3 для двух других тропических циклонов. Далее были определены средние спектры для следующих периодов: спокойные метеорологические условия (6-9 и 20-21 августа), наличие слабого циклона (2-5 августа), наличие умеренных циклонов Rusa и Sinlaku (с 22 августа по 1 сентября) и период зарождения мощного циклона Phanfone (12-14 августа). Соответствующие средние спектры для этих периодов приведены на рис.5. Характер спектров при тропических циклонах (3 и 4) как по интенсивности, так и по спектральному распределению незначительно отличается от фонового (1). Не исключено, что это может быть вызвано малой статистикой представленных данных. Поэтому была выполнена дополнительная оценка

влияния тропических циклонов на интенсивность радиошумов. А именно, была рассчитана величина энергии их как сумма соответствующих значений спектральной плотности мощности в полосе периодов 0,5-4 ч. Результирующие величины приведены на рис.6. Разрывы в кривой означают отсутствие наблюдений. На этом рисунке более отчетливо проявляется усиление энергии радиошумов во время циклонов Rusa и Sinlaku (22 августа - 1 сентября) по сравнению с фоновым уровнем (6-9 августа).

Представляло интерес выделить в суточных вариациях атмосферных радиошумов наличие солнечно-суточных приливных тепловых колебаний, которые, как уже было показано ранее [Михайлов и др.,2004], постоянно присутствуют в нижней ионосфере. В качестве иллюстрации на рис.7(1) показана последовательность суточных вариаций радиошумов в период 27-30 августа. Выбор интервала обработки длительностью четверо суток необходим для надежного выделения первой суточной гармоник в атмосфере Земли. Результаты спектральной обработки приведены на рисунке: фрагменты 2 – в полосе 0-48 ч; 3 - 0-18 ч; 4 - 0,5-3 ч. Гармоника с $T = 24$ ч преобладает по интенсивности ($S^2 \approx 2 \cdot 10^{13}$) над субгармониками ($T \sim 15; 10; 8$ ч) ($S^2 \approx 1 \cdot 10^{12}$), и на три порядка компоненты, совпадающие с периодами ВГВ ($S^2 \sim 2 \cdot 10^{10}$). В последнем фрагменте (4) преобладают компоненты с $T=2-3$ ч. Отмечается отсутствие в спектрах радиошумов полусуточной гармоник ($T=12$ ч), которая была ранее выделена в работе [Михайлов и др., 2004].

Август месяц был выделен не только наличием трех сильных тропических циклонов, но и спокойными геомагнитными и сейсмическими условиями.

В октябре месяце в наблюдениях атмосферных радиошумов было много перерывов по техническим причинам. Тем не менее удалось детально обработать данные во время тропических циклонов Bavi и Maysak, треки которых показаны на рис.2г., а также во время магнитной бури 24-26 октября. Последовательность суточных вариаций интенсивности

атмосферных радиопомех вместе с их спектрами во время этих событий приведена на рис.8а и б. На рис.6 (нижний фрагмент) показана суточная зависимость величины энергии атмосферных радиошумов для тех же событий.

Для сравнения с кривыми рис.7 выполнен спектральный анализ более продолжительных временных рядов 11-14 октября во время циклона Bavi и 24-26 октября во время магнитной бури. Результаты приведены на рис.9 и 10.

Пеленгация атмосфериков. В работе [Чернева, Дружин, 2004] показано, что с помощью ОНЧ-пеленгатора, установленного на Камчатке, можно следить за перемещениями циклонов и связанных с ними грозовых разрядов. Проследим за грозовыми излучениями в период времени, соответствующий активности тропического циклона Rusa. На рис. 11 приведено азимутальное распределение атмосфериков, полученное с помощью ОНЧ-пеленгатора. Каждая точка, представленная на рисунке, соответствует одному грозовому разряду (пороговый уровень напряженности электрического поля ~ 1 В/м). В середине каждых суток кружочком обозначено направление на эпицентр циклона Rusa. Из рис. 11, а видно, что грозовые разряды происходят вблизи эпицентра циклона. Фрагмент записи с 23 по 25 августа 2002 г. (рис. 11, б), показывает, что перемещение циклона с южного направления на западное сопровождается таким же перемещением грозовых разрядов. В период же с 26 по 30 августа (рис. 11,б) имелось более «рассеянное» распределение грозовых разрядов вокруг эпицентра циклона, однако синхронное смещение циклона и гроз в западном направлении осталось.

Сравним данные, полученные с помощью ОНЧ-пеленгатора и регистратора шумовых излучений. Из рассмотрения рис. 3 видно, что наибольшая интенсивность в суточных вариациях атмосферных шумов (верхний фрагмент) и в спектральной плотности с периодом $T=(2 \div 3)$ ч (нижний фрагмент) приходится на 23 – 24 августа и 28 – 29 августа. В эти же

дни наблюдалась и значительная плотность грозовых разрядов вблизи эпицентра циклона (рис. 11). Мощный всплеск в спектральной плотности атмосферных шумов с $T=(2\div 3)$ ч наблюдался также 31 августа (рис. 3), а наибольшая плотность грозовых разрядов – с 31 августа по 1 сентября (рис. 11), при одновременном наличии циклонов Rusa и Sinlaku (рис. 2).

Сравнение этих данных показывает, что наиболее мощные акусто-гравитационные волны возникают от частых грозовых разрядов, находящихся в ограниченной пространственной области, вблизи эпицентров циклонов.

4. Обсуждение результатов и заключение

В нижней ионосфере постоянно существуют волновые процессы различной природы в широком диапазоне периодов, включая ВГВ и солнечно-суточные приливные тепловые волны [Госсард и Хук,1978]. Наблюдаемые ВГВ в нейтральной компоненте имеют периоды порядка 0.5-4 ч с максимумом скорости горизонтального ветра (порядка 40 м/с) на высотах 60-70 км [Vincent, 1985]. Отклик заряженной компоненты нижней ионосферы на атмосферные волны был обнаружен не только в прямых измерениях амплитуды и фазы СДВ-передатчиков [Безродный и др.1977], но и в спектрах мощности атмосферных радиошумов [Михайлов и др.2004]. Изначально предполагалось, что источники ВГВ локализованы вблизи циклонов, струйных течений, т.е. источники метеорологической природы. Тропические циклоны как источники мощных атмосферных вихрей с большими скоростями ветров (см. на рис.2), по-видимому, должны генерировать ВГВ большой интенсивности с горизонтальными длинами волн порядка 1000 и более км. Именно такого масштаба ВГВ, проникая в нижнюю ионосферу, способны модифицировать верхнюю стенку волновода Земля-ионосфера на больших горизонтальных масштабах. Этот эффект следовало ожидать в вариациях спектров мощности атмосферных

радишумов, источники которых удалены на расстояния ≥ 4000 км. Хотя уровень атмосферных радишумов в любой точке земного шара формируется совокупностью сигналов от всех грозовых разрядов на Земле, при наличии мощных тропических циклонов их вклад в уровень шумов будет преобладающим. Известно, что тропические циклоны сопровождаются мощными грозовыми процессами. Генерируемые при этом гигантские электромагнитные сигналы в широком диапазоне частот (8 Гц – 15 кГц) способны проникать во внешнюю ионосферу на высоты 500-2500 км, преодолевая сильное затухание в дневной нижней ионосфере [Mikhailova et al.2000; Mikhailova et al.2002]. Положение п/о Камчатка очень благоприятно для изучения отклика нижней ионосферы на атмосферные волны с использованием электромагнитных сигналов грозовой природы. Дело в том, что в спокойных метеорологических условиях молниевые разряды над Тихим океаном случаются крайне редко, и уровень атмосферных помех на полуострове формируется преимущественно удаленными континентальными источниками. Причем из-за более высокого затухания КНЧ-ОНЧ-электромагнитных волн при распространении их над сушей по сравнению с поверхностью океана [Краснушкин и Яблочкин, 1963] их интенсивность составила фоновый уровень для эффектов тропических циклонов в нижней ионосфере.

Анализ всей совокупности полученных нами результатов спектров мощности атмосферных радиопомех на частоте 4,65 кГц в широкой полосе периодов 0.5-36 ч показал следующее:

- во время тропических циклонов по мере их развития в течение нескольких суток наблюдалось усиление спектральных компонент в полосе 0.5-3 ч с максимумом с $T=2-3$ ч. Интенсивность максимума в 1.5-2 раза превышала фоновые значения;
- энергия атмосферных радишумов в полосе периодов 0.5-4ч возрастала приблизительно в 5-10 раз при усилении интенсивности циклонов;

- во время магнитной бури спектральная плотность мощности в полосе периодов 0.5-3 ч падала ниже фонового уровня.
- необычное поведение спектров мощности в полосе 0.5-36 ч проявилось в том, что только основная компонента с $T=24$ ч оказалась очень устойчивой по периоду с незначительными изменениями по интенсивности. В тоже время как при тропических циклонах, так и во время магнитной бури отмечена сильная изменчивость второй и третьей гармоник ($T=12,8$ ч) как по величине периодов, так и по интенсивности. Детальный анализ этого эффекта выходит за рамки данной работы. Следует только отметить, что этот эффект может быть результатом суперпозиции волн, либо нелинейным взаимодействием волн близких периодов. Изучение этих эффектов требует применение других спектральных методов.

Пеленгация электромагнитных излучений в диапазоне 3 – 60 кГц показала, что:

- наиболее интенсивные грозовые разряды наблюдаются вблизи эпицентра циклона;
- азимутальное перемещение циклона сопровождается синхронно с азимутальным перемещением грозовых разрядов;
- наиболее мощные акусто-гравитационные волны возникают, вероятно, от частых грозовых разрядов, находящихся вблизи эпицентров циклона.

Таким образом, выполненная работа показала эффективность использования спектров мощности суточных вариаций атмосферных радишумов для выделения эффектов атмосферных волн в нижней ионосфере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 02-05-79066; 04-05-65100).

Список литературы

- Безродный В.Г., Синявский С.Н., Шубова Р.С., Ямпольский Ю.М.* Спектральный анализ вариаций СДВ-сигналов в волноводе Земля-ионосфера// Изв.ВУЗов. Радиофизика. Т.15. №6. С.861-867. 1977.
- Беликович В.В., Бенедиктов Е.А.* Исследование нижней части Д-области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей// Изв.ВУЗов. Радиофизика. Т.29. №11. С. 1283-1296. 1986.
- Воробьев О.В., Коробовкин В.В., Лихтер Я.И., Соболев Я.П., Войта Я., Ховарт И.* Аппаратура для низкочастотных волновых исследований на ИСЗ// Диффракционные эффекты коротких радиоволн/ Ред. Ю.Н.Черкашин . М.: ИЗМИРАН.С.173-194. 1981.
- Госсард Э., Хук У.* Волны в атмосфере. М.: Мир. 532 с. 1978.
- Дружин Г.И. Тарасенко Д.В. Пухов В.М. Злыгостев А.В.* Аппаратурный комплекс для определения азимутальных углов прихода импульсных ОНЧ излучений // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений. Тезисы докладов II международного совещания 14-19 августа 2001 года. Петропавловск-Камчатский. 2001. С.32-33.
- Краснушкин П.Е.* Проблема распространения длинных и сверхдлинных радиоволн вокруг Земли и нижние слои ионосферы (С, D, E) в свете теории информации // ДАН. Т.139. №1. С.67-70. 1961.
- Краснушкин П.Е., Яблочкин Н.А.* Теория распространения сверхдлинных волн. М.: Вычисл. Центр АН СССР. 94с. 1963.
- Метеорологические эффекты в ионосфере/ Ред. А.Д.Данилов и др. Л.: Гидрометеиздат. 269 с.1987.
- Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Дружин Г.И., Капустина О.В.* Обнаружение атмосферных волн в спектрах мощности атмосферных помех на Камчатке// Геомагнетизм и аэронавигация. Т.44. №2. С.245-253. 2004.
- Mikhailova G.A., Mikhailov Yu.M., Kapustina O.V.* ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean// Intern. J. Geomagnetism and Aeronomy. V.2. N.2. P. 153-158.2000.
- Mikhailova G.A., Mikhailov Yu.M., Kapustina O.V.* Variations of ULF-VLF electric fields in the external ionosphere over powerful typhoons in Pacific Ocean// Adv. Space Res. V. 30. N.11. P. 2613-2618. 2002.

Чернева Н.В., Дружин Г.И. О возможности регистрации по электромагнитному ОНЧ излучению циклонов Камчатки// Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений. III международная конференция 16 – 21 авг. 2004 г. Сборник докладов. Петропавловск-Камчатский. 2004. С. 258-265.

Takagi M., Iwata A., Masui K. A possible effect of atmospheric waves on 100 kHz Loran – C signals// J. Atmos. Terr. Phys. V.42. N.7. P. 683-686. 1980.

Vincent R.A. Planetary and gravity waves in the mesosphere and lower thermosphere// Handbook for MAP/ Ed. By K. Labitzke et al. V.16. P.269-277. 1985.

Подписи к рисункам в статье Ю.М.Михайлова и др. «Возможные атмосферные эффекты...»

Рис. 1. Иллюстрация метода спектральной обработки суточной вариации (в UT) интенсивности атмосферных ради шумов на частоте $f=4,65$ кГц (в произвольных единицах).

Рис. 2. Треки сильных тропических циклонов в западной части Тихого океана в августе и октябре месяцах 2002 г: а – Phanfone, б – Rusa, в – Sinlaku, г – Bavi и Maysak. Цифры вблизи треков: четырехзначные – дата (месяц, день), двух или трехзначные – значения скорости ветра в узлах (1 узел = 1,87 км/ч). В заголовках указаны дата и время начала и конца каждого циклона по версии **Naval Pacific Meteorology and Oceanography Center**.

Рис. 3. Последовательность суточных вариаций интенсивности атмосферных ради шумов на $f = 4,65$ кГц (в UT) во время тропических циклонов Rusa и Sinlaku (верхний фрагмент) и соответствующих спектров наложенных атмосферных шумов в полосе периодов $T=0,5-3$ ч (нижний фрагмент).

Рис. 4. Последовательность суточных вариаций интенсивности атмосферных ради шумов на $f=4,65$ кГц для стадии зарождения сильного тайфуна Phanfone (верхний фрагмент) и соответствующих спектров наложенных атмосферных шумов в полосе периодов $T=0,5-3$ ч (нижний фрагмент). На среднем фрагменте показана временная форма атмосферных шумов в полосе $0,5-3$ ч.

Рис. 5. Средние спектральные плотности мощности атмосферного ради шума в полосе $0,5-3$ ч для спокойных метеорологических условий (1), для слабого циклона (2), для циклонов Rusa и Sinlaku (3) и для зарождающегося мощного циклона Phanfone (4). Вертикальные отрезки на кривых – СКО, m - число суток.

- Рис. 6. Суточная зависимость величины энергии атмосферных радиошумов на $f=4,65$ кГц в полосе периодов 0,5-4 ч.
- Рис. 7. Спектры мощности атмосферных радиошумов в полосе периодов 0-48 ч (2); 0-18 ч(3) и 0,5-3 ч(4).
- Рис. 8. Последовательность суточных вариаций интенсивности атмосферных радиошумов на частоте $f=4,65$ кГц (UT) и их спектров мощности во время тропического циклона Bavi (10-17 октября) (а), магнитной бури (24-26 октября) и циклона Maysak (27-30 октября)(б).
- Рис. 9. Спектры мощности атмосферных радиошумов в полосе периодов 0-48 ч (2); 0-18 ч (3) и) и 0,5-3 ч(4) во время тропического циклона Bavi.
- Рис. 10. То же, что и на рис.9, но во время магнитной бури.
- Рис. 11. Азимутальное распределение грозowych источников (точки) и эпицентров циклона Rusa (кружочки): а) 22 августа – 1 сентября; б) 23 – 24 августа; в) 28 – 29 августа.