

КРАТКОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ  $F_2$ 

© 2022 г. Н. П. Сергеенко\*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия**\*e-mail: serg@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 10.06.2022 г.

После доработки 19.07.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

Описаны предикторы магнитоионосферных возмущений в явлениях на Солнце и в солнечном ветре, которые позволяют прогнозировать вероятность появления магнитоионосферных возмущений. При исследовании связи ионосферных бурь с магнитными установлена эмпирическая зависимость начала, интенсивности и продолжительности ионосферных возмущений от магнитных. Рассмотрены методы глобального представления пространственно-временных вариаций параметров слоя  $F_2$  во время возмущений с использованием как эмпирических, так и физических моделей. Показана возможность использования упрощенной одноионной модели, которая состоит из системы двух дифференциальных уравнений для  $N_m F_2$  и  $h_m F_2$ , в краткосрочном прогнозировании параметров максимума слоя  $F_2$  среднеширотной ионосферы. Входными параметрами модели являются координаты, солнечная и магнитная активность, а также прогноз начала, типа и интенсивности возмущения. Коррекция при прогнозе осуществляется по скорости дрейфа и коэффициенту рекомбинации в соответствии с текущими наблюдениями. Проведено сравнение эпигнозов, выполненных по этой модели, с прогнозами, использующими эмпирическую модель, построенную в ИЗМИРАН по методу выделения регулярных возмущенных вариаций. Показано, что точности этих моделей сопоставимы. На основании статистического анализа гистограм  $\delta f_o F_2$ , показано, что закон распределения совокупности  $\delta f_o F_2$  во время возмущений далек от нормального. Предложен способ интерпретации экспериментальных функций плотности вероятности с помощью модели с эксцессом и асимметрией, построенной на базе пуассонова случайного процесса как для данных с часовым разрешением, так и по учащенным пятиминутным наблюдениям. Предложены основные этапы дальнейшего развития краткосрочного ионосферного прогнозирования на основе численных теоретических моделей ионосферы.

DOI: 10.31857/S001679402206013X

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В краткосрочных ионосферных прогнозах определяются периоды возмущений, их интенсивность и вариации параметров ионосферы в конкретные периоды времени. Их физической основой является совокупность сведений о взаимодействии системы Солнце—солнечный ветер—магнитосфера—ионосфера Земли. Качество, оправданность и точность таких прогнозов в значительной мере зависят от степени знания этих связей и от качества прогнозов солнечной активности и возмущений магнитосферы. Другой особенностью ионосферных прогнозов является их многообразие, связанное с различными требованиями потребителей по параметрам, заблаговременности, точности. В связи с этим методические подходы могут быть разными в зависимости от типа прогнозов. Физические основы и методы краткосрочных прогнозов изложены во многих работах, например, [Методика ..., 2020; Зевакина, 1987; Зе-

вакина и др., 1990; Marin et al., 2000; Mikhailov et al., 2007; Барабашов и Мальцева, 2003; Двинских и Найденова, 1985].

С целью разработки прогнозов глобального развития ионосферных бурь продолжаются работы по моделированию возмущенных вариаций области  $F$ . Предложены методы глобального прогноза области  $F$  при спокойных и возмущенных условиях на основе эмпирических и физических моделей ионосферы [Намгаладзе, 1978].

Наиболее значительными возмущениями являются: внезапные ионосферные возмущения SID, поглощение полярной шапки PCA, авроральное поглощение AA и возмущения области  $F$  (ионосферные бури). Их прогнозирование можно разделить на два этапа:

— прогноз вероятности появления возмущения, его типа, начала, интенсивности и продолжительности;

– прогноз пространственно-временных вариаций параметров ионосферы во время возмущений.

Основными исходными данными для первого этапа являются гелиогеофизические связи, для второго – закономерности ионосферы. SID и PCA связаны непосредственно со вспышками, SID – с усилением X-лучей, PCA – с излучением энергичных протонов с энергией 5–30 МэВ. Прогноз вспышек одновременно является прогнозом SID, поскольку они наблюдаются почти одновременно, с запаздыванием на 7 мин, соответствующим времени прохождения X-лучей от Солнца до Земли.

Энергичные протоны излучаются только из очень активных протонных вспышек и достигают полярных областей через 1–6 ч после их начала. Акиньян и Черток [1980] разработали метод прогноза PCA непосредственно по данным микроволновых и метровых радиовсплесков. Основой этого метода является зависимость между амплитудой поглощения и параметрами микроволновых радиовсплесков, которые характеризуют количество частиц, ускоренных во вспышке. Индикатором условий выхода частиц из области вспышек служит интенсивность метровой компоненты радиоизлучения (всплески II, IV типов). Временные параметры (начало и время максимума поглощения относительно времени максимума микроволнового всплеска) определяются главным образом гелиодолготой вспышки.

Авроральное поглощение и ионосферные бури связаны с излучением высокоскоростных потоков низкоэнергичной солнечной плазмы из активных областей Солнца как во время вспышек, так и без них, если область геоэффективна. Они возникают в результате взаимодействия высокоскоростных потоков с магнитосферой Земли. Авроральное поглощение увеличивается при внедрении в авроральную зону ускоренных в магнитосфере энергичных электронов с энергией десятки килоэлектронвольт. Между АА и потоками таких электронов установлены эмпирические соотношения.

Наиболее сложным и глобальным является возмущение области  $F$ , когда происходит значительное изменение электронной концентрации, высоты главного максимума, состава и температуры верхней атмосферы на всех широтах.

Как известно, ионосферные бури очень разнообразны и по-разному проявляются на разных широтах. Их можно разделить на несколько типов, основным типом является двухфазное возмущение. Положительная фаза, как правило, наблюдается в начале возмущения на дневной стороне Земли со средней продолжительностью ~8 ч. Отрицательная фаза развивается в первые сутки возмущения только на ночной стороне, во вторые и последующие сутки – и на ночной, и дневной

сторонах Земли. Иногда наблюдается только одна из фаз. Смешанные возмущения (чередование положительных и отрицательных фаз) обычно связаны с последовательностью ряда следующих друг за другом суббурь со слабой и умеренной активностью.

Разнообразие ионосферных возмущений связано с многообразием механизмов передачи энергии высокоскоростных потоков солнечного ветра через магнитосферу ионосфере. Основными из них являются: электродинамический дрейф ионосферной плазмы, связанный с усилением электрических полей на границе и внутри магнитосферы; усиление термосферных ветров вследствие джоулева разогрева при диссипации авроральных токов; изменение состава верхней атмосферы вследствие ее разогрева при диссипации авроральных токов и экваториального кольцевого тока; эффекты внутренних гравитационных волн, генерируемых в авроральной зоне во время бурь и суббурь.

Положительная фаза формируется в основном электродинамическим дрейфом и усилением термосферных ветров [Evans, 1973; Намгаладзе и Захаров, 1979]. Оба механизма вызывают подъем плазмы  $F_2$ -слоя в область меньшей скорости химических потерь, создавая тем самым увеличение электронной концентрации. Отрицательная фаза связана главным образом с изменением состава верхней атмосферы. Вследствие значительного разогрева атмосферы в главную фазу бури область  $F$  обогащается молекулярными составляющими  $O_2$  и  $N_2$ , что приводит к увеличению скорости химических потерь и уменьшению электронной концентрации. Роль различных механизмов в формировании возмущений наиболее полно изложена в обзорах [Намгаладзе, 1978; Prolls, 1980; Данилов и Морозова, 1985].

В данной статье продолжены работы по совершенствованию краткосрочных прогнозов ионосферных возмущений в слое  $F_2$ . В поисках более точного способа определения начала возмущений области  $F$ , в разделе 2 приведено краткое изложение имеющихся к данному моменту сведений об эмпирических связях магнитоионосферных возмущений с параметрами Солнца и солнечного ветра [Зевакина и др., 1990]. В разделе 3 перечислены эмпирические модели возмущенных вариаций электронной концентрации и описан прогностический аспект простой физической модели. Четвертый раздел посвящен вероятностно-статистической модели вариаций критической частоты во время бурь.

## 2. ПРОГНОЗ ВЕРОЯТНОСТИ МАГНИТОИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

### 2.1. Предикторы возмущений в солнечных параметрах

Вероятность появления магнитных и ионосферных бурь прогнозируется по данным диагностики и прогноза солнечной активности. Эта задача фактически сводится к определению геоэффективности вспышек и активных областей: учитывается вся совокупность данных об активных областях на Солнце, включающая в себя эволюцию и динамику активных областей, активные долготы, текущую вспышечную активность, исчезновение волокон, корональные дыры (по наблюдениям линии 10830 Å), структуру крупномасштабных солнечных магнитных полей, их направление, радиовсплески, рекуррентность и ее тенденции, прямые спутниковые данные о параметрах солнечного ветра.

Joselyn and McIntosh [1981] показали, что основными источниками магнитосферных бурь являются вспышки, корональные дыры и исчезновение волокон. Показано, что только ~ 50% бурь можно связать с одним из источников. Большую часть возмущений можно связать одновременно с двумя источниками. 10% бурь не удается связать ни с одним из источников. Это показывает, что прогнозирование вероятности возмущения по солнечным данным является весьма трудной задачей.

Тип, продолжительность и интенсивность возмущения в большой мере определяются источником геоэффективного излучения и его координатами. Как известно, большие возмущения с внезапным началом обычно связаны со вспышками. Возмущения с постепенным началом в основном связаны с корональными дырами и исчезновением волокон. Важное значение для определения геоэффективности вспышек имеют радиовсплески.

Распространение ударных волн в короне и межпланетном пространстве проявляется в генерации радиовсплесков второго типа. Учитывая это, Skirgiello [1980] получил соотношения, позволяющие по радиовсплескам оценить запаздывание SC-бури от вспышки  $\Delta t = 68.1 - 11.6 \lg E$ , где  $\Delta t$  – в ч,  $E$  – энергия микроволнового всплеска на 3 ГГц, которая определяется как произведение максимальной интенсивности на полную продолжительность всплеска, выражена в единицах  $10^{-17}$  Дж/(м<sup>2</sup> Гц).

Фролов [1978] определил наиболее информативные предикторы и получил регрессионные соотношения, позволяющие оценить задержку  $\Delta t$  между вспышкой и SC и интенсивность магнитного возмущения во время главной фазы  $Ap$ :

$$\Delta t = 51 - 6.4X_2 - 28X_5 + 12X_7 + 13X_8 - 10X_9,$$

$$Ap = -30 + 25X_1 + 94X_5,$$

где  $Ap$  – индекс геомагнитной активности;  $X_1$  и  $X_2$  – площадь и яркость вспышки в  $N\alpha$  – спектральной линии серии Бальмера атома водорода;  $X_5$  – отношение времени нарастания ко времени спада всплеска мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 2–12 Å;  $X_7$ ,  $X_8$  и  $X_9$  – наличие радиовсплесков II, III, IV типов. Эти соотношения позволяют определять время запаздывания с ошибкой ~20–30%,  $Ap$  – с точностью до 50%.

McNamara [1980] разработал алгоритм определения вероятности возникновения геомагнитной бури (с амплитудой  $Ap > 100$ ), где учитывается оптический балл вспышки по мягкому рентгену, условная энергия метрового радиовсплеска IV типа (произведение длительности всплеска в минутах на балл) и гелиодолгота вспышки (расстояние от центрального меридиана).

Кроме электромагнитного излучения, важное значение для определения геоэффективности вспышек имеют интенсивность и направление крупномасштабного магнитного поля в области вспышки, от которой зависит знак меридиональной  $Bz$ -компоненты поля во вспышечном потоке [Пудовкин и др., 1977]. Прогноз знака  $Bz$  возможен с заблаговременностью 2–5 сут (время транспортировки возмущения солнечного ветра до Земли).

### 2.2. Предикторы возмущений в вариациях солнечного ветра

Развитие и интенсивность магнитных и ионосферных бурь контролируются величиной межпланетного электрического поля  $E_y = -VBz$ . Появлению возмущенных значений  $B$  и  $V$  обычно предшествует всплеск плотности  $n$  на фронте высокоскоростных потоков, который начинается на несколько часов раньше возмущения  $B$  и  $V$ . За сутки до начала магнито-ионосферного возмущения наблюдается увеличение плотности солнечного ветра ( $n \geq 10 \text{ см}^{-3}$ ). Оно вызывает изменение только на границе магнитосферы, о чем свидетельствует положительная фаза  $Dst(H)$ . Увеличение  $AE$  и  $Dst(H)$  ( $AE$  и  $Dst$  – индексы геомагнитной активности) начинается через 1–2 ч после изменения направления  $Bz$  ММП (межпланетного магнитного поля) с северного на южное. Положительная фаза ионосферного возмущения хорошо коррелирует с увеличением ММП, она существует, пока увеличено ММП.

В работах [Шеломенцев и др., 1982; Rosenberg, 1982] на обширном материале показано, что 90% бурь с  $Dst < -30$  нТл связано с появлением  $Bz < -5$  нТл. 10% бурь развивается при более слабом ММП ( $Bz \sim 2-4$  нТл), но при большей скорости солнечного ветра ( $V \geq 500$  км/с); ~80% всплесков  $Bz \leq -5$  нТл следует за увеличением плотности  $n \geq$

$\geq 7-10 \text{ см}^{-3}$ . Заблаговременность прогноза бурь на основе всплесков  $n$  в среднем равна 8–12 ч.

Рост плотности солнечного ветра имеет отклик в геомагнитных вариациях полярной шапки. Используя связь  $n$  с индексами магнитосферной щели PE и полярной шапки PC, можно определять  $n \geq 7 \text{ см}^{-3}$  и вероятность появления возмущений PE, PC =  $\sum_{i=1}^n (H_i - H_i^0)$ , где  $H_i$  – часовые значения  $H$ -компоненты на соответствующих обсерваториях ( $n = 6$  для PE на широтах  $\Phi \sim 75^\circ-81^\circ$ ,  $n = 3$  для PC,  $H_i^0$  – в спокойный день в соответствующий час). Успешность такого прогноза 80%, индексы PE и PC не уступают по информативности параметрам солнечного ветра.

Итак, основными предикторами магнитных и ионосферных бурь являются увеличение плотности солнечного ветра ( $n > 7-10 \text{ см}^{-3}$ ) за 8–12 ч и южной компоненты ММП ( $> 5 \text{ нТл}$ ) за 30–60 мин до начала бури. Всплески  $n$  и  $Bz$  могут определяться с помощью внемагнитосферного спутника и по наземным геомагнитным данным в полярной шапке.

### 2.3. Прогноз начала, интенсивности и продолжительности ионосферных возмущений

Интенсивность магнитных и ионосферных бурь определяется энергией солнечного ветра, которая может быть представлена индексом Акасофу  $e = VB^2 \sin^4 \theta J_0^2$  ( $\text{Дж с}^{-1}$ ), где  $V$  – скорость солнечного ветра;  $B$  – величина ММП;  $\theta$  – угол между полным вектором ММП и  $Bz$ ;  $J_0 = 7 \text{ PE}$ . Акасофу [1980] показал, как изменение энергии солнечного ветра контролирует вариации  $AE$  и развитие главной фазы бури  $Dst$ . Между индексами магнитосферных возмущений  $AE$ ,  $Kp$  и  $Dst$  и параметрами солнечного ветра установлены эмпирические соотношения, которые позволяют определять интенсивность возмущений с большой точностью. Например, в работе [Пудовкин и др., 1980] для среднесуточных значений индексов они представлены в виде:

$$AE = 43.8 + (13.0 \pm 0.6)V\sigma - (10.7 \pm 0.6)VBz,$$

$$Kp = 5.1 + (1.03 \pm 0.03)V\sigma - (0.51 \pm 0.03)VBz,$$

где  $V$  – скорость солнечного ветра;  $\sigma$  – изменчивость ММП. Отмечено, что наиболее геоэффективными параметрами являются южная компонента ММП, ее изменчивость  $\sigma$  и скорость солнечного ветра.

Для определения интенсивности ионосферных возмущений установлены корреляционные соотношения максимальных значений  $\delta foF2$  ( $foF2$  – критическая частота слоя F2) с  $AE$ ,  $Dst$ ,  $Kp$  (индексы геомагнитной активности) и  $Bz$  (вертикальная компонента индукции магнитного по-

ля) [Зевакина, 1987]. Коэффициенты регрессии меняются с широтой. Довольно высокая корреляция  $\delta foF2$  со всеми характеристиками магнитосферной возмущенности и с  $Bz$  ММП обусловлена тем, что все магнитосферные характеристики контролируются  $Bz$ -компонентой ММП [Пудовкин и др., 1977]. Интенсивность положительных ионосферных возмущений коррелирует непосредственно с параметрами солнечного ветра: скоростью  $V$  и величиной ММП.

В работе [Sergeenko and Kuleshova, 1990] была разработана формализованная методика диагностики параметров магнитной бури по наземной регистрации магнитного поля Земли.

Методика позволяет по цифровой магнитограмме автоматически определять начало, конец, тип начала, интенсивность магнитной бури и начало ее главной фазы. Предвестниками бурь являются внезапные импульсы в магнитном поле (SI, SC). Положительная фаза ионосферного возмущения наступает при  $\Delta H \sim 10 \text{ нТл}$  на близлежащей магнитной обсерватории и увеличении  $AE$ -индекса за 3–7 ч. Отрицательная фаза ионосферной бури прогнозируется по установленным феноменологическим связям геомагнитных и ионосферных возмущений. Начало и тип отрицательной фазы ионосферного возмущения, прогноз которой наиболее важен для радиосистем, определяется по времени начала главной фазы магнитной бури с точностью 1–2 ч.

Тип ионосферного возмущения также связан с характером развития главной фазы магнитной бури: основные типы (с одним или несколькими активными периодами) наблюдаются во время геомагнитных бурь с четко выраженной главной фазой, начинающейся сразу после начала бури (с внезапным или постепенным началом); другие типы наблюдаются, когда начало главной фазы задерживается относительно начала магнитной бури. Для рекуррентных возмущений учитывается их тип в предшествующих оборотах, так как при 27-дневной повторяемости характер возмущений обычно сохраняется.

Ионосферные возмущения большой интенсивности обычно следуют за большими магнитными бурями. Очень большие и большие магнитные возмущения с внезапным началом обычно связаны со вспышками, умеренные и малые с постепенным началом – с корональными дырами и исчезновением волокон. При этом развитие главной фазы бури зависит от расположения вспышек относительно центрального меридиана Солнца. Большие бури с  $Dst > 100 \text{ нТл}$  чаще вызываются вспышками, расположенными между гелиодолготами  $45^\circ \text{ E}$  и  $70^\circ \text{ W}$ .

Анализ показал, что наиболее удачным показателем возмущенности магнитного поля является скользящая сумма модулей градиентов  $H$ -со-

ставляющей  $M = \sum_i |\Delta H|_{i \text{ скользя}} \cdot$ . Отметим, что, количественно признаки меняются с широтой, так как магнитная возмущенность меняется с широтой.

### 3. ПРОГНОЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВО ВРЕМЯ ВОЗМУЩЕНИЙ

#### 3.1. Эмпирические модели прогноза возмущенных вариаций слоя F2

Прогноз пространственно-временных вариаций параметров ионосферы во время возмущений возможен как с использованием корреляционных, регрессионных методов [Двинских и Найденова, 1985; Marin et al., 2000; Mikhailov et al., 2007; Барабашов и Мальцева, 2003], так и на основе эмпирических и физических моделей ионосферы.

Эмпирические модели возмущенной ионосферы с адаптацией для краткосрочных прогнозов известны: модель ИЗМИРАН [Kuleshova et al., 1986, 1987; Lavrova et al., 1985; Сергеевко и Депенева, 2021], позволяющая прогнозировать  $f_oF2$ ,  $h_mF2$  (высота максимума слоя F2),  $N(h)$ -профили на возмущенные периоды от часа к часу; модель ААНИИ для высокоширотной ионосферы [Беспрозрачная и др., 1985].  $f_oF2$  в этой модели представлены в виде карт электронной плотности в максимуме слоя F2 для спокойных и возмущенных условий. Карты построены на основе эмпирической зависимости  $f_oF2$  от зенитного угла Солнца и широты. Прогноз ИСЗФ [Двинских и Найденова, 1985] осуществляется по методу оптимальной интерполяции, строятся прогностические карты ионосферных параметров по данным наблюдений за предшествующие часы в пунктах наблюдения. С помощью этих моделей можно прогнозировать глобальное развитие возмущения от часа к часу на весь период возмущения по ограниченной ионосферной информации. Среднеквадратичные отклонения модельного прогноза от наблюдений находятся в основном в пределах 10%.

В работе [Mendillo and Klobuchar, 1980] для прогноза пространственно-временных вариаций области F рекомендуется использовать карты усредненных отклонений полного содержания электронов  $\delta\text{TEC}$  во время бурь. Они представляют  $\delta\text{TEC}$  (в %) как функцию инвариантной широты  $\lambda$  и местного времени в период бури, такие карты построены для всех сезонов Северного полушария.

Прогнозирование ионосферы с использованием физических моделей обладает рядом преимуществ перед традиционным эмпирико-статисти-

ческим подходом. Эти преимущества заключаются в следующем.

1. Модели, основанные на численном интегрировании уравнений, формулирующих физические законы для ионосферной плазмы, представляют собой более высокую степень обобщения наших знаний об ионосфере по сравнению с эмпирическими моделями.

2. Они позволяют с наибольшей степенью достоверности, отвечающей природе явления, экстраполировать развитие событий в будущем при наличии известного начального распределения прогнозируемых параметров, а также проводить интерполяцию между отдельными измерениями.

3. Физические модели дают почти непрерывное описание в любой пространственно-временной области, что позволяет использовать их в задачах прогноза, тогда как эмпирические модели содержат большие пробелы в информации; существуют вообще не охваченные регулярными наблюдениями обширные регионы Арктики, Антарктики и Мирового океана; дискретные спутниковые пролеты не восполняют эту нехватку информации.

Однако эти преимущества могут быть в полной мере реализованы при практическом использовании физических моделей лишь при условии достижения определенного уровня развития этих моделей – по степени физической адекватности среде или точности ее описания. Отставание в этих направлениях сдерживает внедрение физических ионосферных моделей в практику ионосферного прогнозирования.

К настоящему времени разработано большое количество численных физических моделей ионосферы, относящихся к различным широтным регионам и интервалам высот. Отметим здесь отечественные физические модели для расчета параметров слоя F2:

– одноионная модель F2-слоя среднеширотной ионосферы (200–600 км) [Иванов-Холодный и Михайлов, 1980];

– многокомпонентные модели среднеширотной ионосферы (120–500 км [Колесник и Чернышов, 1981]; 120–1000 км [Гинзбург и Гуляев, 1982]; 100–1000 км [Namgaladze et al., 1977]);

– многокомпонентные модели низкоширотной ионосферы [Сироткин и др., 1979; Коен и Сидоров, 1985];

– одноионные модели F2-слоя высокоширотной ионосферы [Осипов и др., 1983; Беспрозрачная и др., 1982].

Эти модели являются исследовательскими и пригодны для прогностических целей в отдельных регионах и в спокойных условиях. Что касается возмущений, то они могут быть основой для построения модели, пригодной для описания и во

время бурь. Ниже предпринята попытка адаптировать для прогноза параметров максимума слоя F2 упрощенную одноионную модель F2-слоя ионосферы [Саенко и др., 1988].

3.2. Прогностический аспект простой физической модели

В работах [Саенко и др., 1988, 1985] предложена упрощенная модель поведения параметров максимума слоя F2  $N_m F2$  и  $h_m F2$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial h} = Q - \beta N \\ F = wN - D\left(\frac{N}{H} + \frac{\partial N}{\partial h}\right). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $H$  – плазменная шкала высот;  $w$  – вертикальная составляющая дрейфов в ионосфере, принятая независимой от высоты;  $D$  – коэффициент диффузии;  $F$  – поток плазмы;  $Q$  и  $\beta$  – коэффициенты ионизации и рекомбинации.

Решение системы искалось в виде  $N = N_m f(z)$ , где  $N_m$  – концентрация в максимуме слоя,  $f(z)$  – профильная функция,

$$z = \exp\left(-\frac{h - h_m}{H}\right).$$

После подстановки система (1) приводится к уравнению

$$\begin{aligned} -z^2 \frac{d^2 N}{dz^2} + (2 - z^3 w_0) \frac{dN}{dz} + \\ + (Lz^2 - 2)N = Qz^4 - \beta z^6 N. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} w_0 = \frac{1}{H} \left( w - \frac{dh_m}{dt} \right) \frac{H^2}{D_m}, \quad L = \frac{d \ln N_m H^2}{dt} \frac{H^2}{D_m}, \\ Q = Q_m \frac{H^2}{D_m}, \quad \beta = \beta_m \frac{H^2}{D_m}. \end{aligned}$$

Уравнение (2) не имеет точных решений. Метод поиска приближенного решения заключается в следующем: задавая высотным профилем  $N(z)$  и подставляя его в (2), потребуем, чтобы уравнение удовлетворялось на высоте максимума слоя F2. Это позволяет записать два независимых соотношения между параметрами задачи. Высотный профиль задавался в виде функции Чепмена и использовались условия для максимума F2-слоя:

$$\left. \frac{dN}{dz} \right|_{h_m} = 0, \quad \left. \frac{d^2 N}{dz^2} \right|_{h_m} = -2N_m, \quad N|_{h_m} = N_m, \quad z = 1.$$

Из условия равенства потоков плазмы, полученных из уравнения непрерывности и уравнения движения в максимуме слоя, получена система уравнений, связывающая ионосферные и аэро-

номические параметры на высоте максимума F2-слоя [Саенко и др., 1988]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_m}{dt} = Q_m - \beta_m N_m, \\ \frac{1}{H} \frac{dh_m}{dt} = \frac{w_0}{H} - \frac{D_m}{H^2} + 1.2\beta - 0.9 \frac{Q_m}{N_m}. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты  $Q_m$ ,  $\beta_m$ ,  $D_m$  в максимуме слоя выражаются через их значения на некоторой опорной высоте  $h_0$ :

$$Q_m = Q_0 z_m^2, \quad \beta_m = \beta_0 z_m^4, \quad D_m = D_0 z_m^{-2}.$$

Поведение функции ионообразования со временем и скорости ветра задавалось в виде:

$$\begin{aligned} Q = \begin{cases} q_0 \cos \frac{\pi LT}{12} \cos \varphi, & 6 \leq LT \leq 18 \\ 0, & 18 < LT < 6 \end{cases} \\ w_0 = w_0 f(t), \quad f(t) = \cos \frac{\pi}{6} \left( \frac{LT}{2} - 1 \right). \end{aligned}$$

В работе [Саенко и др., 1985] показано, что система (3), являясь нестационарной, в то же время удовлетворяет известным стационарным соотношениям между ионосферными и аэрономическими параметрами в максимуме слоя F2 в спокойных условиях, о чем указывается, например, в работах [Ришбет и Гарриот, 1975; Иванов-Холодный и Михайлов, 1980]. Ее можно использовать для решения прикладных задач, в частности, она может служить детерминированной основой в планетарных гибридных моделях спокойной ионосферы.

Используя эту простую модель, проследим, как изменяется поведение аэрономических параметров во время ионосферных возмущений. Для анализа были отобраны данные о вариациях  $N_m F2(t)$  и  $h_m F2(t)$  различных ионосферных станций за периоды ионосферных возмущений. Были оценены величины аэрономических параметров на высоте 300 км с использованием современных атмосферных моделей [Jacchia, 1977; Kohnlein, 1980; Picone et al., 2002], которые затем использовались в качестве начальных приближений при решении системы (3).

В качестве примера в верхней части рис. 1 штриховыми линиями нанесены результаты расчетов по модели (3) для периода 29.10.–5.11.1989 г. для станций Fort Monmouth ( $\varphi = 40.4$  N;  $\lambda = 285.9$ ;  $\phi = 51.8$ ) и Grand Bahama ( $\varphi = 26.6$  N;  $\lambda = 281.8$ ;  $\phi = 379$ ). Буря началась 30.10. в 01 ч UT и закончилась 5.11. в 23 ч UT,  $Dst_{\max} \sim -80$  нТл,  $Kp_{\max} = 7$ . В ионосфере средних широт по данным станции Fort Monmouth в это время наблюдалось отрицательное возмущение с несколькими активными периодами. Максимальная интенсивность  $\delta foF2_{\max} = -60\%$ . На низкоширотной станции Grand Bahama отмечено положительное

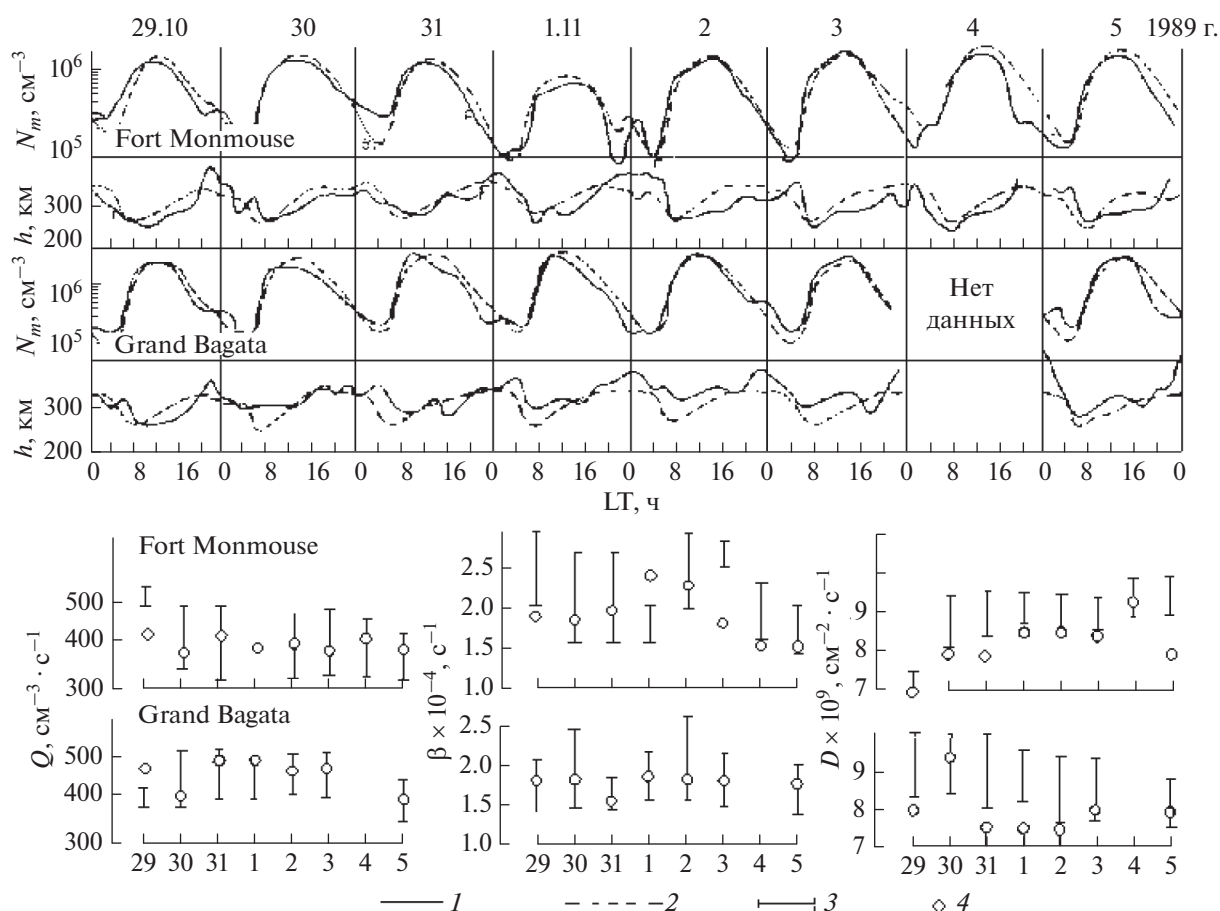


Рис. 1. Вариации  $N_mF2$  и  $h_mF2$  за период 20.10–5.11.1989 г. и поведение среднесуточных аэрономических параметров на высоте 300 км. 1 – наблюдаемые значения; 2 – модельные; 3 – параметры, рассчитанные по нейтральным моделям; 4 – определенные по упрощенной физической модели.

возмущение,  $\delta foF2_{\max}$  достигало 40%. На этом же рисунке сплошными линиями нанесены также результаты измерений  $N_mF2$  и  $h_mF2$ , которые иллюстрируют качество подбора аэрономических параметров. В нижней части рисунка приведены величины среднесуточных аэрономических параметров, при которых решалась система (3) для указанного периода. Там же представлен диапазон суточных изменений этих параметров, определенных по моделям [Jacchia, 1977; Kohnlein, 1980; Picone et al., 2002]. Видно, что во время отрицательных бурь (Fort Monmouth) растет коэффициент рекомбинации, что соответствует росту концентрации  $O_2$  и  $N_2$  в такие периоды. В низких широтах согласие достигается уменьшением коэффициента диффузии и увеличением функции ионообразования, связанное с ростом концентрации атомарного кислорода, вследствие чего возмущения в низких широтах становятся положительными. Среднесуточная скорость  $w_0$  вертикального дрейфа при вариации в пределах  $\pm 10$  м/с не оказывала существенного влияния на поведе-

ние электронной концентрации и высоты максимума слоя  $F2$  по сравнению с изменениями функции ионообразования и коэффициента рекомбинации.

Таким образом, система (3) удовлетворительно описывает поведение  $N_mF2$  и  $h_mF2$  во время бурь во время положительной и отрицательной фазы возмущения. Она отражает широтную зависимость бурь: отрицательные возмущения наблюдаются на средних широтах, положительные – в низких. Летом переходная граница опускается к более низким широтам.

Уравнения могут быть использованы в качестве основы в прогностических моделях. Среднесуточные аэрономические параметры  $Q_0$ ,  $\beta_0$ ,  $D_0$  оцениваются по модели нейтральной атмосферы. Обычно при прогнозе управляющие параметры модели – начальные и граничные условия, потоки ионизирующего излучения и т.д. – известны с неопределенностью, что допускает их коррекцию на основе сопоставления прогноза с текущими данными наблюдений прогнозируемых парамет-

**Таблица 1.** Средние и среднеквадратичные отклонения прогнозируемых значений  $h_m F2$  и  $N_m F2$  от наблюдаемых

Станция	Дата бури	Эмпирическая модель				Полуэмпирическая модель			
		$\overline{\Delta h}$ , км	$\sigma \Delta h$ , км	$\overline{\delta N}$ , %	$\sigma \delta N$ , %	$\overline{\Delta h}$ , км	$\sigma \Delta h$ , км	$\overline{\delta N}$ , %	$\sigma \delta N$ , %
Москва	8–10.01.1985 г.	–9	35	15	30	25	34	–29	38
	27–29.01.1985 г.	–27	26	26	27	14	29	–10	20
	19–22.04.1985 г.	18	23	17	39	24	21	–16	36
	9–10.06.1985 г.	24	34	–24	18	19	36	21	24
Ростов	8–10.01.1985 г.	10	31	24	28	15	30	–24	28
	27–29.01.1985 г.	–8	37	17	23	22	30	–11	32
	19–22.04.1985 г.	13	27	–1	34	22	28	–7	30
	9–10.06.1985 г.	28	32	–28	24	19	21	–5	30

ров, электронной концентрации прежде всего. Сравнительно легко такую коррекцию осуществлять для одномерных моделей.

Прогнозируемые значения  $N_m F2$  и  $h_m F2$  корректируются по ходу поступления экспериментальной информации. Коррекция производится по параметрам  $\beta_0$  и  $W_0$ . Значения  $\beta$  рассчитываются по предыдущим суткам после захода Солнца:

$$\beta_0 = \frac{2 \ln \frac{N_0}{N_t}}{(z_t^4 + z_0^4)(t - t_0)},$$

$N_0$  – электронная концентрация в момент захода,  $t$  превышает время захода Солнца на  $h = 300$  км,  $w_0$  может корректироваться по мере поступления наблюдаемых данных  $N_m F2$  и  $h_m F2$ .

Во время ионосферных возмущений модель может удовлетворительно описывать суточные вариации  $N_m F2$  и  $h_m F2$ , но при этом значения аэрономических параметров чаще всего отличаются от значений, определенных по моделям нейтральной атмосферы. Поэтому были определены значения  $Q_0$ ,  $\beta_0$ ,  $D_0$  и  $w_0$  в периоды возмущений по ретроспективным экспериментальным данным  $N_m F2$  и  $h_m F2$ . Значения  $Q_0$ , а также  $\beta_0$  при слабых возмущениях, как правило, соответствуют значениям, определенным по модели атмосферы. При положительных возмущениях  $Q_0$  бывает несколько выше, а  $D_0$  – соответственно ниже, чем при спокойных условиях. Значение среднесуточного коэффициента рекомбинации во время отрицательных возмущений возрастает по сравнению с соответствующими значениями для спокойных условий, причем, чем больше интенсивность ионосферных бурь, тем выше  $\beta_0$ . При очень интенсивных бурях значение  $D_0$  уменьшается за счет значительного увеличения отношения  $[N_2]/[O]$  и  $[O_2]/[O]$ .

Полученные таким образом значения аэрономических параметров использовались в качестве

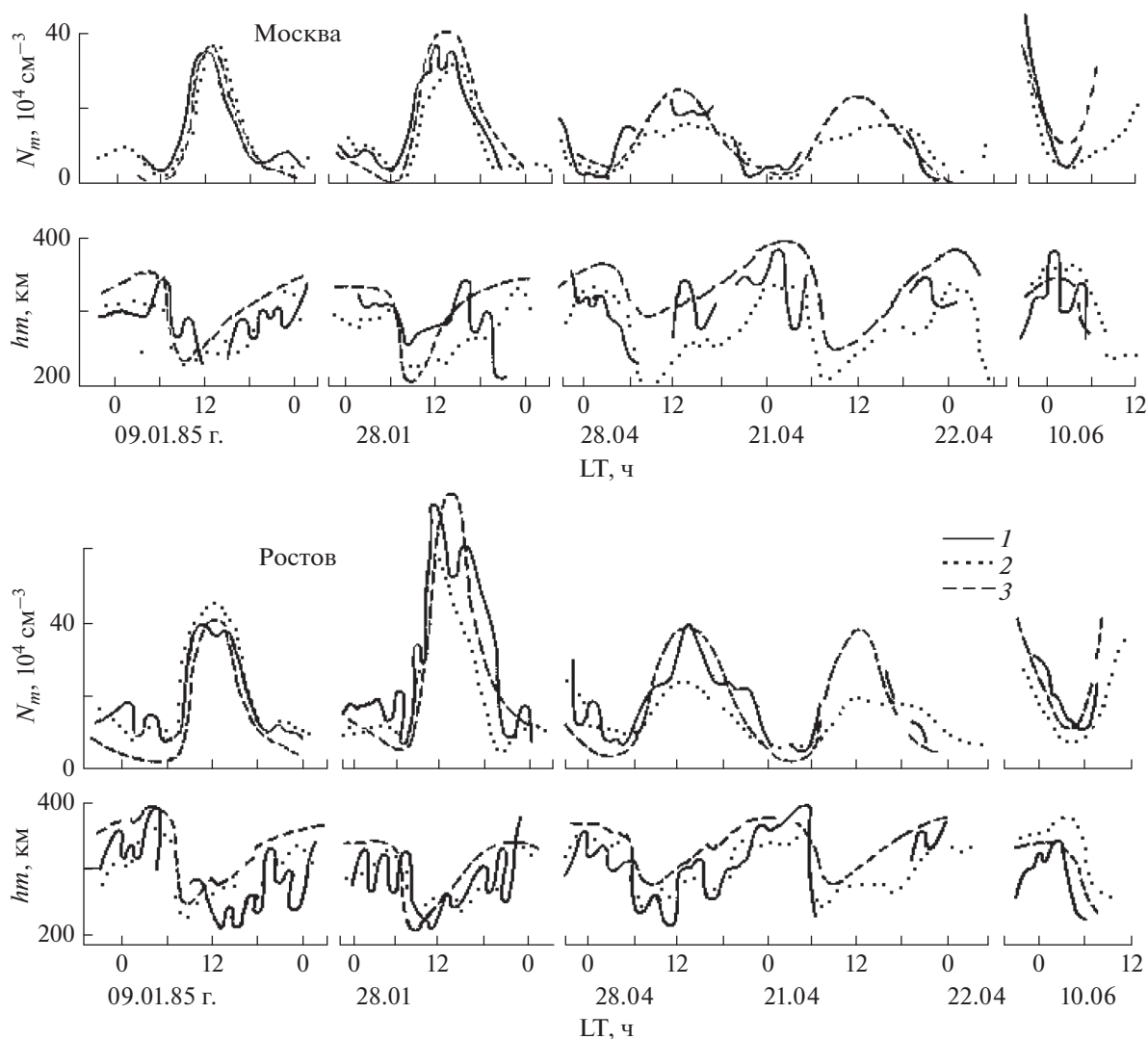
входных данных в уравнения модели для текущего расчета  $N_m F2$  и  $h_m F2$ . При использовании этой модели в качестве расчетной на периоды возмущений также необходим прогноз начала, интенсивности и типа (положительное или отрицательное) ионосферного возмущения.

Расчеты  $N_m F2$  и  $h_m F2$  по описанной модели для конкретных возмущенных периодов сравнивались с расчетами по эмпирической модели [Kuleshova et al., 1986; Sergeenko and Kuleshova, 1990]. На рисунке 2 приведены результаты расчетов, выполненных по обеим моделям для двух среднеширотных станций Москва и Ростов. Сравнение показало, что соответствие обеих моделей экспериментальным данным примерно одинаковое. В таблице 1 приведены значения средних и среднеквадратичных отклонений прогнозируемых значений  $h_m F2$  и  $N_m F2$  от наблюдаемых.

Результаты расчетов показали, что обе модели имеют примерно одинаковые точности расчета. Но в эксплуатации каждая имеет свои преимущества и недостатки. Оперативность прогноза на основе модели складывается из скорости проведения модельных расчетов, а также скорости обеспечения модели текущей информацией об управляющих параметрах модели для коррекции модели. Задачи краткосрочного прогноза вытекают из задач обслуживания радиосистем. В этих задачах зачастую требуется осуществление модельного прогноза в реальном времени.

Описанная выше модель проста математически, очень удобна для временной и пространственной интерполяции, эмпирическая модель более громоздка математически из-за алгоритмов, связанных со сферическим и гармоническим анализом, и сильно зависит от прогноза продолжительности. Вместе с тем, в этой модели были введены уточнения, связанные с магнитной активностью, поэтому наиболее сильные колебания  $h_m F2$ , вызванные увеличением магнитной активности, в модели нашли свои отражения. Отме-





**Рис. 2.** Сравнение экспериментальных временных рядов  $N_m F2(t)$  и  $h_m F2(t)$  по станциям Москва и Ростов (1) и расчетов, выполненных по полуэмпирической модели (2) и по эмпирической модели (3).

тим, что разработанная в 1986–1990 гг. методика прогноза ионосферных возмущений была проверена как на массиве ретроспективных экспериментальных данных, так при осуществлении опытного прогноза. Был проведен ряд сопоставлений как с прямыми ионосферными наблюдениями [Зевакина и др., 1990], так и с экспериментальными данными по распространению радиоволн [Ануфриева и др., 1987; Ишкова и др., 1993].

Описанные положительные и отрицательные качества обеих моделей приводят к выводу, что для целого ряда задач обе модели применимы, и целесообразность использования той или иной модели зависит от конкретной задачи. Говоря о точности физических моделей, мы сопоставляем результаты численных теоретических расчетов с данными наблюдений или эмпирических моделей. Очевидно, что оцениваемые таким способом

погрешности модели являются интегральными, они включают в себя ошибки численного метода и ошибки, происходящие от ошибок входных параметров, и кроме того, ошибки, связанные с недостаточной физической адекватностью самих уравнений или используемых приближений (из-за отбрасывания второстепенных членов или даже некоторых уравнений системы).

#### 4. ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВАРИАЦИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ВО ВРЕМЯ БУРЬ

В последние десятилетия исследователями достигнут высокий уровень понимания физических процессов в ионосфере во время бурь и суббурь, их морфологическом описании, а также в моделировании, как эмпирическом, так и в теоретиче-

ском. Тем не менее точность прогноза вариаций параметров возмущенной ионосферы, недостаточна для решения многих прикладных задач [Ferguson, 1995; Bilitza, 2002; Аксенов и др., 2017; Беккер, 2018]. В таких случаях полезны вероятностно-статистические модели, которые позволяют получать плотности вероятности ионосферных параметров в различных гелиогеофизических условиях. Полученные плотности вероятности используются в задачах распространения радиоволн в различных гелиогеофизических условиях на разных широтах, в различные сезоны и времена суток.

Для определения вероятностно-статистической модели возмущенных вариаций  $f_oF2$  использованы данные вертикального зондирования ионосферы по мировой сети станций для разных уровней солнечной активности, спокойных и возмущенных гелиогеофизических условий.

По рассчитанным  $\delta f_oF2$  для станций Северного полушария, расположенных на различных широтах – от зоны полярных сияний до экваториальных, получены месячные дифференциальные распределения  $\delta f_oF2$  в периоды максимальной, минимальной и промежуточной солнечной активности для дневных (06–17 ч LT) и ночных (18–05 ч) условий независимо. Генеральная совокупность статистических выборок данных для каждой станции составила  $1.3 \times 10^4$  значений  $\delta f_oF2$ . Рассматривались выборки из 360 значений для каждой станции, включающие дневные или ночные часы данного месяца, исходя из предположения о том, что дневные и ночные условия различны. По этим выборкам кроме функции плотности вероятности  $W(\delta f_oF2)$  считались четыре начальных центральных момента.

Кроме того, статистические свойства рассматривались для нескольких выборок учащенных наблюдений  $f_oF2$  продолжительностью 3–5 сут и временным разрешением 5 мин за 1971–1973 гг. по ст. Москва. По этим данным рассчитаны отклонения  $\delta f_oF2$ , их дифференциальные распределения и моменты.

Выборки, полученные для различных условий, являются статистически независимыми, они дают возможность проследить за временными изменениями статистических характеристик для каждой станции.

Для анализа данных используем представление о стационарном пуассоновском потоке точек, в соответствии с которым ставим моменты появления неоднородностей  $\delta f_oF2$ . В основе этого представления лежат следующие соображения:

- 1) количество неоднородностей электронной концентрации внутри зоны Френеля, формирующей отраженный сигнал, конечно;
- 2) временные зависимости  $\delta f_oF2(t)$  можно представить линейной совокупностью импульсов

с амплитудой  $a$  и длительностью  $t$ :  $X = \sum x_m(a, t)$ , где  $m$  – конечно;

3) моменты появления отдельных импульсов в потоке статистически независимы, т.е. независимы моменты появления отдельных неоднородностей;

4) поток ординарен, т.е. в бесконечно малом интервале времени наблюдается одно воздействие.

Это дает возможность использовать для описания распределения  $\delta f_oF2(t)$  статистическую модель, построенную на основе пуассонова случайного процесса. Такая модель может быть построена на базе характеристической функции, связанной преобразованием Фурье с функцией плотности вероятности процесса, рассматриваемого в работе [Сергеенко, 2017], но с экспоненциальным множителем, создающим асимметрию. Нормированная характеристическая функция несимметричного распределения имеет вид

$$f(\lambda) = \frac{f(\lambda + i\beta)}{f(i\beta)},$$

где  $\beta$  – параметр асимметрии; при  $\beta \rightarrow 0$  функция  $f(\lambda)$  стремится к характеристической функции симметричного процесса.

Фурье-преобразованием с характеристической функцией была получена функция плотности вероятности  $W(\delta f_oF2)$  [Миддлтон, 1999]:

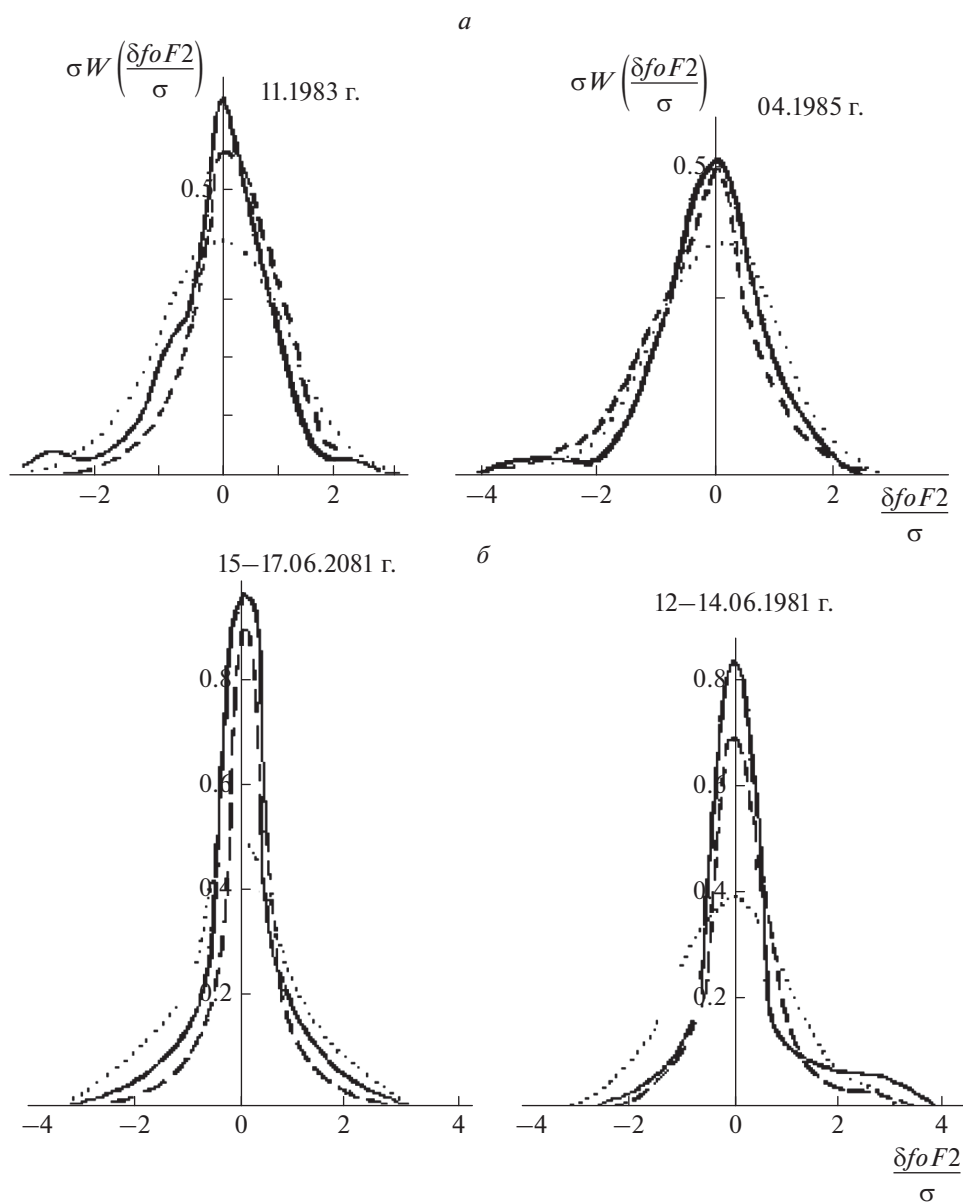
$$W(x) = \frac{\sqrt{3}}{\pi\sigma} \exp\left[\frac{3}{a} + \frac{xm}{\sigma^2 b}\right] \frac{1}{(a)^{1/2} bc} K_1\left\{\frac{3c}{[a(b)]^{1/2}}\right\},$$

где  $x = \delta f_oF2$ ,  $a = E - \frac{4}{3}A^2$ ,  $b = 1 - \frac{Am}{3\sigma}$ ,  $c = \sqrt{1 + \frac{x^2 a}{3\sigma^2 b}}$ .

Условия существования этой функции распределения таковы:  $E - \frac{4}{3}A^2 > 0$ ,  $\frac{Am}{3\sigma} < 1$ .

Для сопоставления экспериментальные и теоретические функции распределения для ст. Алма-Ата приведены на рис. 3. Экспериментальные распределения  $\delta f_oF2$  представлены сплошной кривой, штрихами нанесена теоретическая кривая, точками – нормальный закон для соответствующих  $\sigma$ . Особенно хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными кривыми видно в области отрицательных  $\delta f_oF2$ , наиболее существенной для радиосвязи. Эта модель была рассчитана для массива данных при разных гелиогеофизических ситуациях.

Также представляет интерес провести подобный анализ для мелкомасштабной структуры  $\sim 10^2$  м, для чего достаточно исследовать статистическую изменчивость 5-минутных выборок значений  $\delta f_oF2$ . Рассматривались 6 продолжитель-



**Рис. 3.** (а) — распределения  $\delta fo F2$  для выборок с 1-часовым разрешением для ст. Алма-Ата; (б) — распределения  $\delta fo F2$  для выборок с 5-минутным разрешением для ст. Москва. Экспериментальные распределения — сплошные кривые; теоретические кривые — штриховые линии; точки — нормальный закон.

ных (3–5 сут) сеансов учащенных наблюдений  $\delta fo F2$  (интервал наблюдений 5 мин) по ст. Москва, для которых рассчитаны дифференциальные распределения и моменты.

В таблице 2 приведены периоды, для которых рассчитаны распределения, четыре центральных момента  $m$ ,  $\sigma$ ,  $A$ ,  $E$  и длина выборки  $K$ .

Очевидно, что описанная модель более соответствует экспериментальным распределениям, как в случае крупномасштабной, так и мелкомасштабной структуры, чем нормальное распределение.

Степень ее согласия с эмпирическими гистограммами выше, чем в случае просто нормального распределения. Количественная оценка совпадения апостериорных распределений с теоретическими по критерию Колмогорова достаточно высока ~85–90%. Отметим, что степень согласия эмпирических гистограмм с нормальным законом составляет 48–53%, что значительно ниже представленной здесь модели.

Таким образом, можно утверждать, что модель, построенная на базе пуассонова случайного процесса, является адекватной для описания распределений  $\delta fo F2$  не только для часовых выборок,

**Таблица 2.** Периоды, центральные моменты  $m$ ,  $\sigma$ ,  $A$ ,  $E$  и длина выборки  $K$  для данных учащенных наблюдений  $\delta foF2$

Дата	$m$ , %	$\sigma$ , %	$A$	$E$	$K$
15–17.06.1971 г.	0.51	7.13	0.57	3.68	800
15–17.02.1972 г.	–0.86	12.62	–0.62	2.16	864
1–5.06.1971 г.	3.25	13.96	1.01	1.27	820
27–30.12.1971 г.	–0.22	11.91	0.13	1.19	856
12–14.01.1971 г.	1.07	9.61	0.97	2.19	527
18–20.01.1972 г.	–1.01	14.40	–0.68	2.97	852

соответствующих крупномасштабной неоднородной структуре слоя F2, но и для выборок, соответствующих мелкомасштабной структуре ионосферы.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны предикторы магнитоионосферных возмущений в явлениях на Солнце и в солнечном ветре, которые позволяют прогнозировать вероятность появления магнитоионосферных возмущений.

При исследовании связи ионосферных бурь с магнитными установлена эмпирическая зависимость начала, интенсивности и продолжительности ионосферных возмущений от магнитных.

Рассмотрены методы глобального представления пространственно-временных вариаций параметров слоя F2 во время возмущений с использованием как эмпирических, так и физических моделей. Показана возможность использования в краткосрочном прогнозировании параметров максимума слоя F2 среднеширотной ионосферы упрощенной одноионной модели, которая состоит из системы двух дифференциальных уравнений для  $N_m F2$  и  $h_m F2$ . Коррекция при прогнозе осуществляется по скорости дрейфа и коэффициенту рекомбинации в соответствии с текущими наблюдениями. Входными параметрами модели являются координаты, солнечная и магнитная активность, а также прогноз начала, типа и интенсивности возмущения.

Проведено сравнение эпигнозов, выполненных по этой модели, с прогнозами, использующими эмпирическую модель, построенную в ИЗМИРАН по методу выделения регулярных возмущенных вариаций. Показано, что точности этих моделей сопоставимы.

Подчеркнем, что использование физических моделей даже при реализации всех их потенциальных преимуществ ни в коей мере не означает отказа от эмпирических моделей. Напротив, детерминированные модели не могут существовать

без эмпирических моделей, тогда как последние имеют и самостоятельную ценность.

На основании статистического анализа гистограм  $\delta foF2$ , показано, что закон распределения совокупности  $\delta foF2$  во время возмущений далек от нормального. Предложен способ интерпретации экспериментальных функций плотности вероятности с помощью модели с эксцессом и асимметрией, построенной на базе пуассонова случайного процесса для данных как с часовым разрешением, так и по учащенным пятиминутным наблюдениям.

Резюмируя, можно заключить, что основными этапами дальнейшего развития краткосрочного ионосферного прогнозирования на основе физических моделей ионосферы должны быть следующие.

1. Совершенствование методов прогноза ионосферных возмущений с использованием современных средств диагностики околоземного пространства.

2. Оптимизация моделей по точности и оперативности на основе численных экспериментов для различных конкретных прогностических задач конкретного назначения и разработка алгоритмов их коррекции по текущим данным наблюдений.

Также отметим, что идеальная картина геомагнитной и ионосферной возмущенности может быть получена, если создать обширную сеть магнитных и ионосферных станций, работающих в автоматическом режиме, в различных частотных диапазонах и передающих свои данные в центр сбора данных, где в реальном масштабе времени создаются карты распределения векторов магнитного поля и ионосферных параметров на поверхности земного шара. Однако уровень сбора и обработки геомагнитных данных в настоящее время оставляет желать лучшего, так же как и плотность сети магнитных и ионосферных обсерваторий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акиньян С.Т., Черток И.М. Определение величины поглощения типа ППШ по интегральным параметрам солнечных микроволновых радиовсплесков // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 20. № 2. С. 192–196. 1980.
- Аксенов О.Ю., Беккер С.З., Дюжева М.М., Козлов С.И., Ляхов А.Н., Якубовский С.В. Обоснование необходимости разработки и применения вероятностно-статистических моделей ионосферы в интересах радиолокационных средств РКО // Тр. V Всероссийской научно-технической конференции “РТИ системы ВКО – 2017”. М. С. 18. 2017.
- Ануфриева Т.А., Кулешова В.П., Сергеенко Н.П. Расчет характеристик распространения КВ-радиоволн в периоды магнитосферных возмущений // Техника

- средств связи. Серия системы связи (СС). Вып. 6. С. 14–23. 1987.
- *Барабашов Б.Г., Мальцева О. А.* Возможности описания ионосферы в реальном времени и ее прогнозирования // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. № 2. С. 33–38. 2003.
- *Беккер С.З.* Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной ионосферы верифицированные по данным наземных радиофизических измерений // Дисс. канд. физ.-мат. наук. 129 с. М. 2018.
- *Беккер С.З., Козлов С.И., Ляхов А.Н.* Вопросы моделирования ионосферы для расчета распространения радиоволн при решении прикладных задач // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Вып. 3–4. С. 85–88. 2013.
- *Беспрозванная А.С., Крупицкая Т.М., Макарова Л.Н. и др.* Расчет пространственно-временного распределения максимума ионизации полярного слоя  $F2$  // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 22. № 3. С. 383–391. 1982.
- *Беспрозванная А.С., Широков А.В., Шука Т.И.* Эмпирические модели электронной концентрации в полярной ионосфере при различных гелиогеофизических условиях / Прогнозирование ионосферы и условий распространения радиоволн. М.: Наука. С. 29–39. 1985.
- *Гинзбург Э.И., Гуляев В.Т.* Нестационарная одномерная полумпирическая модель  $F2$ -области ионосферы // Исследования нижней ионосферы. Новосибирск. С. 97–120. 1982.
- *Данилов А.Д., Морозова Л.Д.* Ионосферные бури в области  $F2$ : Морфология и физика: (Обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 25. № 5. С. 705–721. 1985.
- *Двинских Н.И., Найденова Н.Я.* Метод прогнозирования  $\delta f_oF2$  с адаптацией к конкретным геофизическим условиям / Прогнозирование ионосферы и условий распространения радиоволн. М.: Наука. С. 54–58. 1985.
- *Зевакина Р.А.* Прогнозирование ионосферных возмущений / Прогнозирование ионосферных, магнитосферных возмущений и солнечной активности. М.: Наука. С. 110–122. 1987.
- *Зевакина Р.А., Жулина Е.М., Носова Г.Н., Сергеев Н.П.* Руководство по краткосрочному прогнозированию ионосферы. Материалы мирового центра данных Б. М.: МГК при През. АН СССР. 71 с. 1990.
- *Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В.* Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеиздат. 190 с. 1980.
- *Ишкова Л.А., Кулешова В.П., Носова Г.Н., Сергеев Н.П., Чернышов О.В.* Прогнозирование условий распространения радиоволн во время ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 33. № 6. С. 155–159. 1993.
- *Коен М.А., Сидоров И.М.* Моделирование экваториальной ионосферы // Моделирование процессов гидросферы, атмосферы и нижнего космоса. Новосибирск: Наука. С. 147–162. 1985.
- *Козлов С.И., Ляхов А.Н., Беккер С.З.* Основные принципы построения вероятностно-статистических моделей ионосферы для решения задач распространения радиоволн // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 54. № 6. С. 767–779. 2014.
- *Колесник А.Г., Чернышов В.И.* Нестационарная самосогласованная модель среднеширотной ионосферы в интервале высот 120–500 км // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 21. № 2. С. 245–249. 1981.
- *Миддлтон Д.* Модели негауссовского шума и обработка сигналов в телекоммуникациях – новые методы и результаты для моделей классов А и В // IEEE Trans. on Information Theory. 4. P. 1129–1140. 1999.
- Методика построения локальных ионосферных моделей на сети ионосферных наблюдательных пунктов Росгидромета. ФГБУ “ИПГ”. 2020 г.
- *Намгаладзе А.А., Захаров Л.П.* Влияние возмущений состава нейтральной атмосферы и термосферных ветров на  $F$ -область ионосферы / Исследование ионосферной динамики. М.: ИЗМИРАН. С. 84–95. 1979.
- *Намгаладзе А.А.* Численное моделирование среднеширотных ионосферных возмущений / Диагностика и моделирование ионосферных возмущений. М.: Наука. С. 57–68. 1978.
- *Осипов Н.К., Безматерных Н.Ф., Максимова Н.М. и др.* Система прогностических моделей полярной конвектирующей ионосферы // Ионосферные исследования. № 37. С. 36–60. 1983.
- *Пудовкин Н.И., Козлов В.Л., Лазутин Л.Л., Трошичев О.А., Чертков А.Д.* Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука. 312 с. 1977.
- *Пудовкин М.И., Шухтина М.А., Понявин Д.И., Зайцева С.А.* Влияние параметров солнечного ветра на геомагнитную активность // Геомагнитные исследования. № 27. С. 69–77. 1980.
- *Ришбет Г., Гарриот О.К.* Введение в физику ионосферы. Л.: Гидрометеиздат, 304 с. 1975.
- *Саенко Ю.С., Намгаладзе А.Н., Сергеев Н.П.* Динамические соотношения между аэронавигационными и ионосферными параметрами в максимуме  $F2$ -слоя / Прогнозирование ионосферы и условий распространения радиоволн. М.: Наука. С. 123–126. 1985.
- *Саенко Ю.С., Намгаладзе А.Н., Сергеев Н.П.* Динамическая модель поведения ионосферных параметров в максимуме  $F2$ -слоя // Препринт № 8(541). М.: ИЗМИРАН. 13 с. 1988.
- *Сергеев Н.П.* Статистическое описание негауссовых выборок в слое  $F2$  ионосферы во время гелиогеофизических возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 6. С. 1–8. 2017.
- *Сергеев Н.П., Денуева А.Х.* Планетарные вариации высоты максимума слоя  $F2$  в периоды ионосферных возмущений // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. № 3. С. 336–346. 2021.
- *Сироткин В.А., Клименко В.В., Намгаладзе А.А.* Численная модель экваториальной ионосферы // Исследования ионосферной динамики. М.: ИЗМИРАН. С. 58–68. 1979.
- *Фролов С.Г.* Диагностика и прогноз геоэффективных ударных волн от солнечных вспышек // Докл. АН СССР. Т. 243. № 3. С. 615–618. 1978.
- *Шеломенцев В.В., Мишин В.М., Сергеева Л.П.* О возможности прогноза бурь на основе геомагнитной диагностики всплесков концентрации солнечного ветра // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука. Вып. 58. С. 15–25. 1982.
- *Akasofu S.I.* Working group report of geomagnetic storm // Solar-terrestrial predictions proceedings. Boulder. V. 4. P. A91–A114. 1980.

- *Bilitza D.* Ionospheric models for radio propagation studies // *Rev. Radio Sci.* 1999–2002. Ed. *W.R. Stone*. IEEE and Wiley. P. 625–679. 2002.
- *Evans J.V.* The causes of short-time increases of the F-layer at mid latitude // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 35. № 4. P. 593–616. 1973.
- *Ferguson J. A.* Ionospheric model validation at VLF and LF // *Radio Sci.* V. 30. № 3. P. 775–782. 1995.
- *Jaccia L.G.* Thermospheric temperature, density and composition / *Spec. Report Smithsonian Inst. Astrophys. Observ.* № 375.105 p. 1977.
- *Joselyn I.A., McIntosh P.S.* Disappearing solar filaments: a useful predictor of geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* A. V. 86. № 6. P. 4555–4564. 1981.
- *Kohnlein W.* A model of thermospheric temperature and composition // *Planet. Space Sci.* V. 28. № 3. P. 225–243. 1980.
- *Kuleshova V.P., Lavrova E.V., Ponomareva L.I., Sergeenko H.P.* Prediction of F-region height profiles of electron concentration for ionospheric disturbances on the basis of empirical models // *Solar-Terrestrial Predictions. Proc. Workshop at Meudon, France, June 18–22.* 1984. Boulder, Colorado, USA. P. 515–518. 1986.
- *Kuleshova T.P., Lavrova E.V., Ponomareva L.I., Sergeenko H.P.* Prediction of F-region height profiles of electron concentration for ionospheric disturbances on the basis of empirical models. *Artificial satellites space physics.* V. 16. Warszawa. P. 333. 1987.
- *Lavrova E.V., Ponomareva L.I., Sergeenko N.P.* About the possibility of the planetary prediction of the F2-region height profiles of electron concentration for ionospheric disturbances. *UAG Report WCD-A Washington USA.* 1985.
- *McNamara.* Geomagnetic effects of solar flares observed during 1968–1978 // *Ionospher. Predict. Ser.* R. 49 p. 1980.
- *Marin D., Miro G., Mikhailov A.V.* A method for foF2 short-term prediction // *Phys. Chem. Earth (C).* V. 25. P. 327–332. 2000.
- *Mendillo M., Klobuchar J.A.* A morphology-based prediction scheme for the coupled latitudinal and local-time development of F-region // *Solar-terrestrial predictions proceeding.* Boulder. V. 4. P. 15–26. 1980.
- *Mikhailov A.V., Depuev V.H., Depueva A.H.* Short-term foF2 forecast: Present day state of art, in space weather: research towards applications in Europe // *Astrophys Space Sci.* V. 344. P. 169–184. 2007.
- *Namgaladze A.A., Latishev K.S., Korenkov Ju.N., Zacharov L.P.* A dynamical model of the midlatitude ionosphere for a height range from 100 to 1000 km // *Acta Geophys.* V. 25. № 3. P. 173–182. 1977.
- *Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* V. 107. № (A12). P. 1–16. 2002. <https://doi.org/10.1029/2002JA009430>
- *Prolls G.W.* Magnetic storm-associated perturbations of the upper atmosphere recent result obtained by satellite-borne gas analyzers // *Rev. Geophys. Space Phys.* V. 18. № 1. P. 183–202. 1980.
- *Rosenberg R.L.* A practical method of predicting geomagnetic storms by using precursory enhancements of solar wind density // *J. Geophys. Res.* V. 87. № A4. P. 2563–2568. 1982.
- *Skirgiello M.* Solar wind velocity influence on shock wave propagation time // *Artif. Satell.* V. 15. № 3. P. 20–26. 1980.
- *Sergeenko N.P., Kuleshova V.P.* The forecasting storm from ground-based recording of the magnetic field. *Solar-Terrestrial predictions proceeding of Workshop 16–20 October, 1989. Leura, Australia. Boulder, Colorado.* V. 2. P. 367–370. 1990.