

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНОГО КОРОТКОВОЛНОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

А. С. Белов*

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
603950, Нижний Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 28 марта 2015 г.

Представлены результаты численного моделирования возмущений околоземной плазмы, возбуждаемых мощным КВ-радиоизлучением нагревного стенда «Сура». Моделирование проводилось с использованием модифицированной версии ионосферной модели SAMI2 для входных параметров, соответствующих серии натуральных экспериментов «Сура»–DEMETER. Исследованы пространственная структура и динамика развития крупномасштабных возмущений температуры и плотности плазмы. Определены характерные времена формирования и релаксации возбуждаемых крупномасштабных плазменных возмущений на высотах внешней ионосферы Земли.

DOI: 10.7868/S0044451015100132

1. ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное увеличение количества излучающих и ретранслирующих технических средств приводит к значительному росту техногенной электромагнитной нагрузки на окружающую среду. Это вызывает необходимость своевременного обнаружения, контроля и понимания процессов в околоземном пространстве, обусловленных электромагнитными воздействиями.

Наиболее результативным методом, позволяющим проводить регулярные исследования околоземной плазмы с контролируемыми параметрами воздействия, является нагрев ионосферы мощным КВ-радиоизлучением специальных установок (стендов).

Воздействие мощного коротковолнового радиоизлучения О-поляризации на F-область ионосферы может приводить к значительным возмущениям не только в области отражения волны накачки, но и во всей толще ионосферы.

Ранее полученные экспериментальные результаты по воздействию мощного КВ-радиоизлучения на

околоземную плазму позволили определить параметры плазменно-волновых возмущений в нижней части ионосферы, ниже главного максимума ионизации [1]. В тоже время характеристики возмущений выше F-области остаются сравнительно малоизученными.

Непосредственные (in situ) измерения с использованием бортовой аппаратуры искусственных спутников Земли позволили получить информацию только о локальных характеристиках турбулентности на высотах внешней ионосферы [2–4]. Для определения же пространственной структуры и динамики развития искусственной ионосферной турбулентности во всей толще ионосферы требуется проведение измерений с высоким пространственным (по высоте, широте и долготе) и временным разрешением, что в настоящее время не представляется возможным. Это обуславливает необходимость проведения численного моделирования процессов, связанных с взаимодействием мощного КВ-радиоизлучения с околоземной плазмой.

В настоящей работе с помощью модифицированной версии открытого кода двумерной ионосферной модели SAMI2 (Sami2 is Another Model of the Ionosphere) проведены исследования пространственной структуры и временных характеристик развития и релаксации возмущений, создаваемых при

*E-mail: alexis-belov@yandex.ru

воздействии мощного КВ-радиоизлучения. В качестве входных параметров моделирования использованы данные серии натуральных экспериментов «Сура»–DEMETER.

2. ИОНОСФЕРНАЯ МОДЕЛЬ SAMI2

Моделирование эффектов нагрева околоземной плазмы мощным коротковолновым радиоизлучением наземных передатчиков базируется на численных моделях ионосферы. За последние десятилетия был разработан целый ряд таких ионосферных моделей, предназначенных для описания низко-, средне- и высокоширотной областей ионосферы Земли.

На первом этапе моделирование ионосферной плазмы в условиях мощных электромагнитных воздействий выполнялось с использованием одномерных моделей [5–7]. В настоящее же время практически все исследования в данной области базируются на двумерной ионосферной модели SAMI2. Однако ранее проведенные расчеты касались в основном только валидации параметров модели [8, 9].

Модель SAMI2 [10] описывает динамику плазмы и химические процессы для ионосферы, содержащей семь основных сортов ионов (H^+ , He^+ , N^+ , O^+ , N_2^+ , NO^+ и O_2^+), в высотном интервале от 100 км до нескольких тысяч километров. Околоземная плазма описывается гидродинамическими уравнениями переноса ионов и электронов, дополненных условием квазинейтральности. Поведение нейтральной компоненты ионосферы описывается с помощью эмпирических моделей NRLMSIS00 и HWM93.

Эксперименты по воздействию мощным радиоизлучением О-поляризации на плазму F-области ионосферы показали, что основная доля энергии волны накачки вблизи уровня ее отражения поглощается за счет развития целого комплекса нелинейных процессов, основным из которых является стрикционная параметрическая неустойчивость [11, 12]. Неустойчивость носит характер индуцированного рассеяния электромагнитной волны в ленгмюровские (плазменные) волны и образования непосредственно вблизи уровня отражения мощного радиоизлучения узкого слоя с высоким уровнем высокочастотной плазменной турбулентности. В этом слое за счет диссипации энергии плазменных волн происходит сильный разогрев электронов фоновой плазмы.

Введение дополнительного источника, связанного с нагревом тепловых электронов при воздействии мощного радиоизлучения, приводит к модификации уравнения теплопроводности для электронов:

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} - \frac{2}{3N_e} \nabla(k_e \nabla T_e) = Q_{en} + Q_{ei} + Q_{phe} + Q_{HF}, \quad (1)$$

где k_e — тензор теплопроводности электронов, Q_{en} , Q_{ei} — члены, определяющие процессы нагрева при столкновениях электронов с нейтральными частицами и ионами, Q_{phe} — член, определяющий нагрев фотоэлектронами, Q_{HF} — источник, связанный с нагревом электронов под действием волны накачки.

Q_{HF} представляется в виде модельного гауссовского источника:

$$Q_{HF} = \left(\frac{dT_e}{dt} \right)_0 \exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{\Delta z^2}\right) \times \exp\left(-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{\Delta \theta^2}\right), \quad (2)$$

где (z_0, θ_0) и $(\Delta z, \Delta \theta)$ — координаты центра и характерные размеры области нагрева.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ «СУРА»–DEMETER

В период с 2005 по 2010 гг. была проведена серия экспериментов по спутниковым измерениям параметров плазменно-волновых возмущений, индуцируемых во внешней ионосфере Земли при нагреве ее F-области мощным КВ-радиоизлучением среднеширотного нагревного стенда «Сура» ($59.15^\circ N$, $46.1^\circ E$) [3, 13, 14]. In situ измерения выполнялись с использованием бортовой аппаратуры французского микроспутника DEMETER (высота орбиты спутника приблизительно 660 км) при его пролете через возмущенную магнитную силовую трубку.

Всего было проведено порядка ста экспериментов, в десяти из которых были зарегистрированы крупномасштабные плазменные возмущения на высотах внешней ионосферы Земли.

Наиболее характерные результаты были получены для спокойных геомагнитных условий в эксперименте, проведенном в поздние вечерние часы 01.05.2006 г.

При проведении эксперимента нагревный стенд «Сура» работал в режиме непрерывного излучения волны накачки на частоте $f_{HF} = 4.3$ МГц с эффективной излучаемой мощностью 80 МВт. Диаграмма направленности стенда была наклонена на 12° на юг, чтобы усилить генерацию искусственной ионосферной турбулентности за счет эффекта «магнитного зенита» [15, 16]. Стенд включался на 20 мин за 10 мин до расчетного времени пролета спутника вблизи оси возмущенной магнитной силовой трубки $T \approx 18 : 28 : 30$ UT (LT = UT + 4 ч).

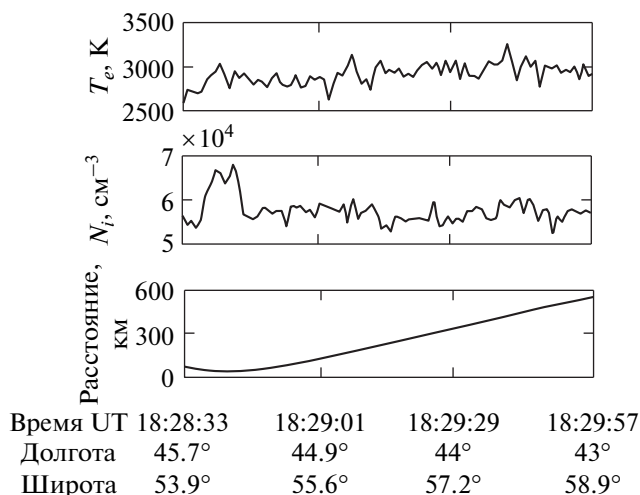


Рис. 1. Результаты измерений на высотах внешней ионосферы Земли параметров плазменных возмущений для эксперимента, проведенного 01.05.2006 г.

На рис. 1 представлены зарегистрированные в эксперименте вдоль траектории пролета спутника распределения температуры электронов T_e и концентрации ионов N_i . На нижней панели рисунка представлена зависимость от времени расстояния от траектории спутника DEMETER до оси возмущенной магнитной силовой трубки. По горизонтальной оси отложены время, значения долготы и широты положения спутника в указанный момент.

Согласно выполненным измерениям на высоте орбиты спутника DEMETER в области возмущенной мощным КВ-радиоизлучением нагревного стенда «Сура» магнитной силовой трубки наблюдается формирование искусственного дакта плотности с повышенной примерно на 25 % относительно фонового уровня плотностью плазмы и характерным поперечным масштабом порядка 100 км. Кроме того, в возмущенной области ионосферы наблюдается незначительное увеличение (около 5 %) температуры электронов T_e .

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве входных параметров для проведения моделирования с использованием программного кода модифицированной ионосферной модели SAMI2 выступают дата и время проведения эксперимента, данные о состоянии ионосферы, параметры источника нагрева и параметры расчетной сетки (число

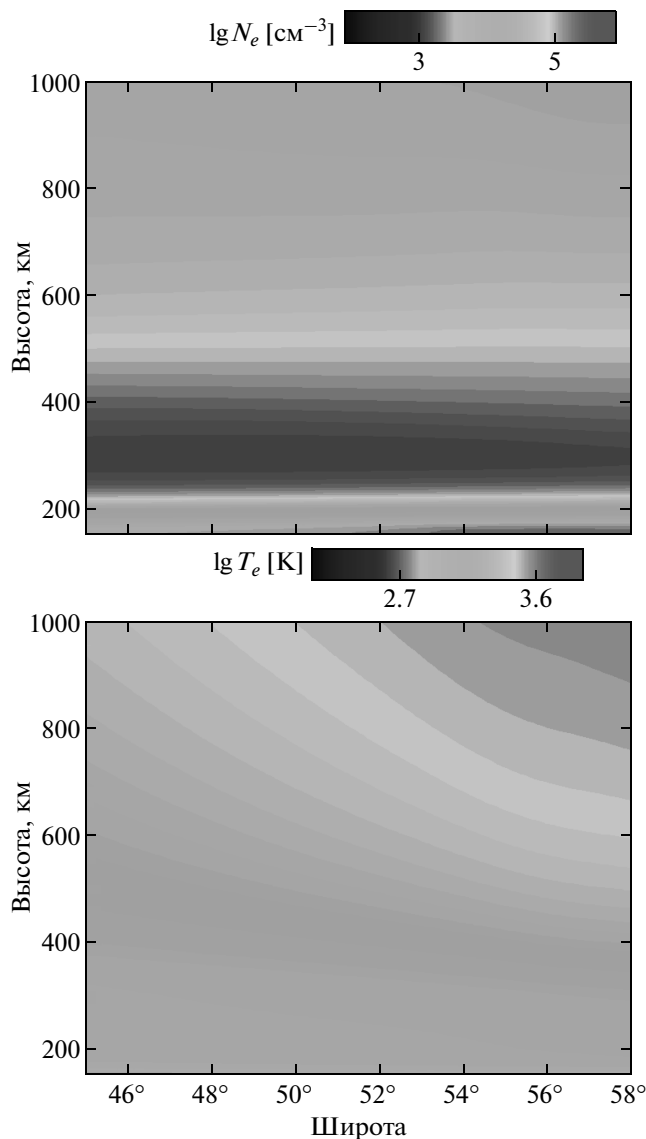


Рис. 2. Высотно-широтные распределения концентрации и температуры электронов для момента времени, соответствующего включению источника нагрева, $T = 18 : 18 : 00$ UT

ячеек вдоль геомагнитного поля n_z , число силовых линий n_f).

Для условий проведения эксперимента 01.05.2006 г. значения основных параметров моделирования имеют вид $A_p = 1$, $F_{10.7} = 99.9$, $(dT_e/dt)_0 = 1000$ К/с, $\theta_0 = 55.71^\circ$, $\Delta\theta = 0.25^\circ$, $\Delta z = 10$ км, $(n_z, n_f) = (1601, 202)$.

Значение высоты центра области нагрева z_0 определялось на каждом расчетном шаге из условия $f_{pe}(z_0, t) = f_{HF}$.

При моделировании программный код запускался за 24 ч до времени включения источника нагрева

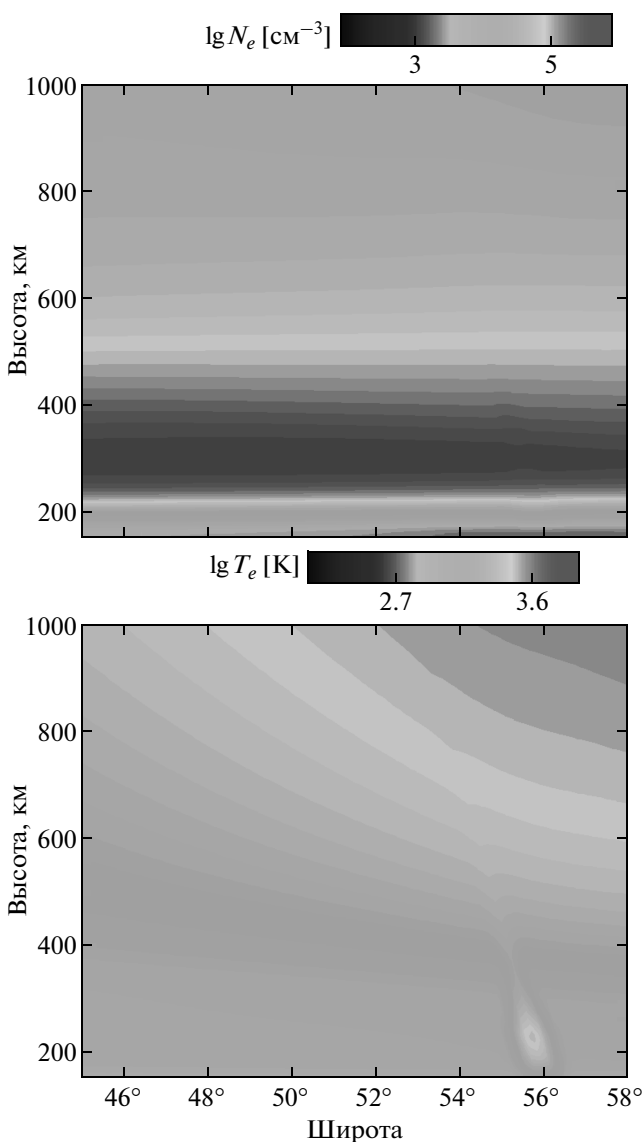


Рис. 3. Высотно-широтные распределения концентрации и температуры электронов для момента времени $T = 18 : 20 : 00$ UT

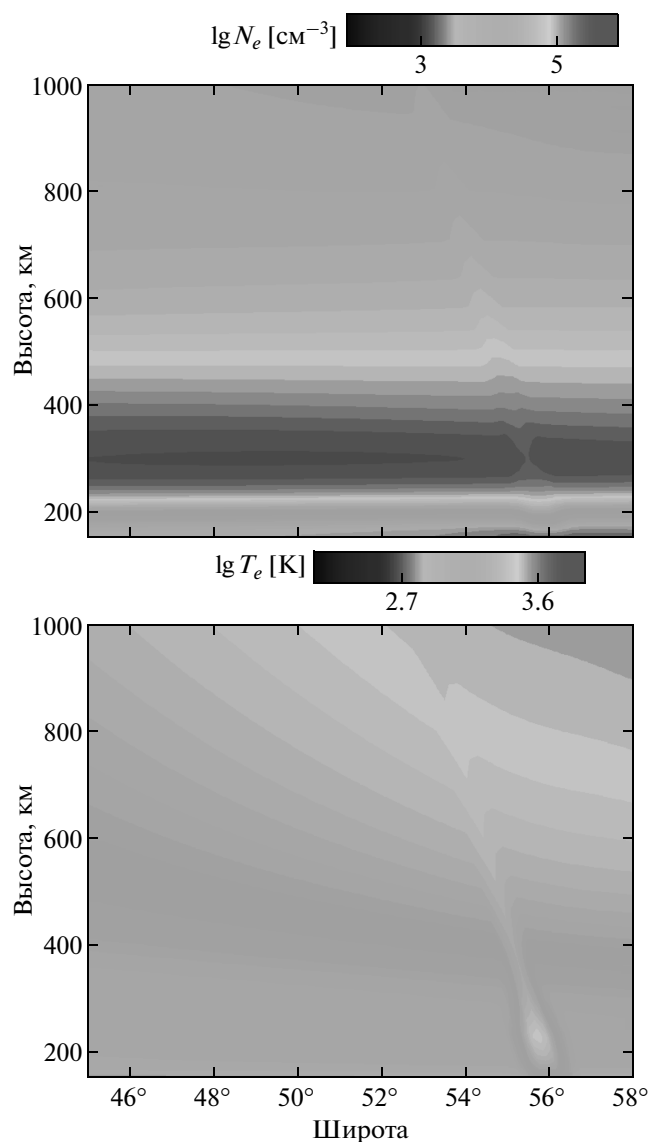


Рис. 4. Высотно-широтные распределения концентрации и температуры электронов для момента времени, соответствующего пролету спутника DEMETER в окрестности возмущенной магнитной силовой трубки, $T = 18 : 28 : 30$ UT

ва, что позволяло системе релаксировать к невозмущенным условиям и уменьшало влияние инициализации.

На рис. 2–5 представлены полученные при моделировании высотно-широтные распределения концентрации N_e (в модели ионосферная плазма считается квазинейтральной $N_e = N_i$) и температуры T_e электронов для следующих моментов времени: 18:18:00 UT (рис. 2), 18:20:00 UT (рис. 3), 18:28:30 UT (рис. 4) и 18:38:00 UT (рис. 5).

На рис. 3–5 хорошо видно, что индуцируемые возмущения плазмы локализованы в достаточно узкой

силовой трубке геомагнитного поля с характерным поперечным масштабом порядка 100 км.

Согласно существующим теоретическим представлениям поперечный размер возмущений концентрации и температуры электронов на высотах отражения волны накачки повторяет распределение поля E и составляет величину порядка диаметра области нагрева, что для условий проведения эксперимента 01.05.2006 г. соответствует приблизительно 60 км. С удалением от области отражения поперечный масштаб индуцируемых возмущений концентра-

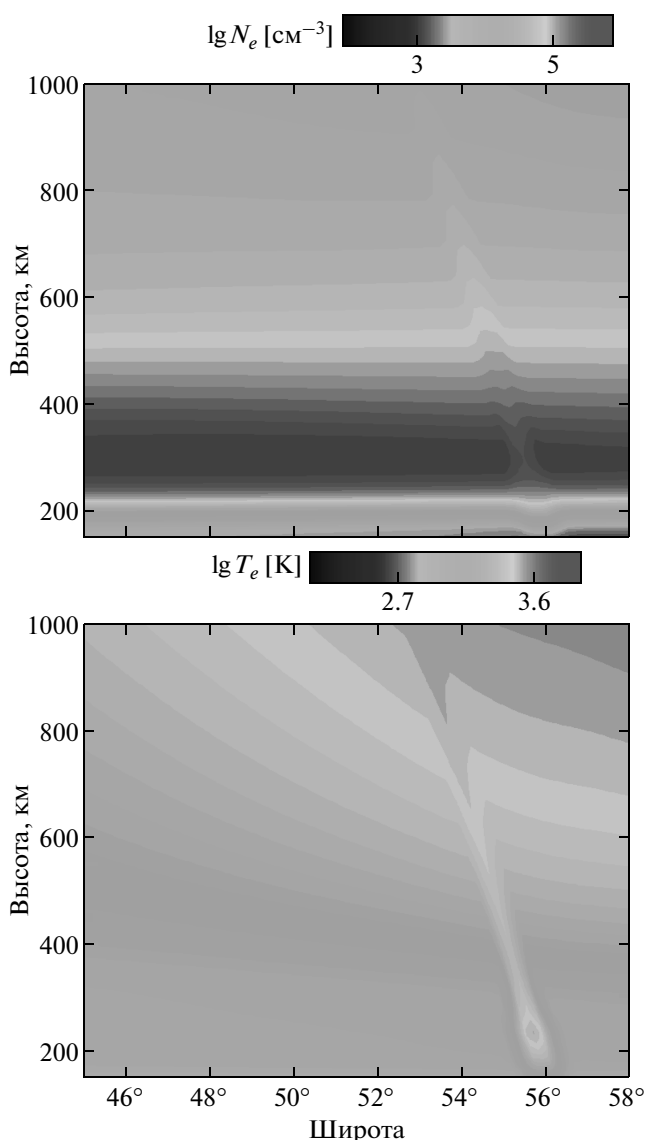


Рис. 5. Высотно-широтные распределения концентрации и температуры электронов для момента времени, соответствующего выключению источника нагрева $T = 18 : 38 : 00$ UT

ции и температуры увеличивается пропорционально $B^{-1/2}$ из-за уменьшения величины геомагнитного поля. Полученная в результате моделирования оценка характерного поперечного масштаба возмущений порядка 100 км, соответствующая результатам *in situ* измерений, несколько превышает теоретически предсказываемую величину, что указывает на значимую роль процессов переноса поперек геомагнитного поля.

Индукцируемые возмущения захватывают практически всю толщу ионосферы и наблюдаются как ниже области отражения волны накачки (примерно

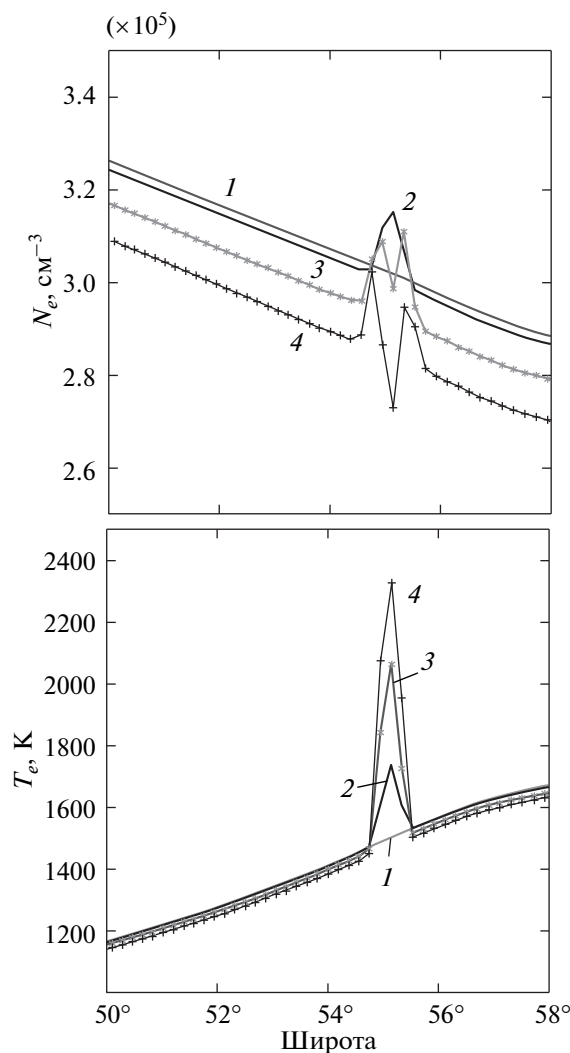


Рис. 6. Широтные профили распределений концентрации и температуры электронов на высоте 400 км для различных моментов времени: 18 : 18 : 00 UT (1), 18 : 20 : 00 UT (2), 18 : 28 : 30 UT (3), 18 : 38 : 00 UT (4)

до 170 км), так и на высотах внешней ионосферы Земли, что также подтверждается результатами ранее проведенных расчетов [7, 17].

На рис. 6 и 7 представлена динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы на высоте 400 км, что соответствует расстоянию от области отражения волны накачки порядка 170 км. Времена включения и выключения источника нагрева отмечены на рис. 7 вертикальными линиями.

Возмущения концентрации электронов N_e проникают на высоту 400 км за время порядка 45 с.

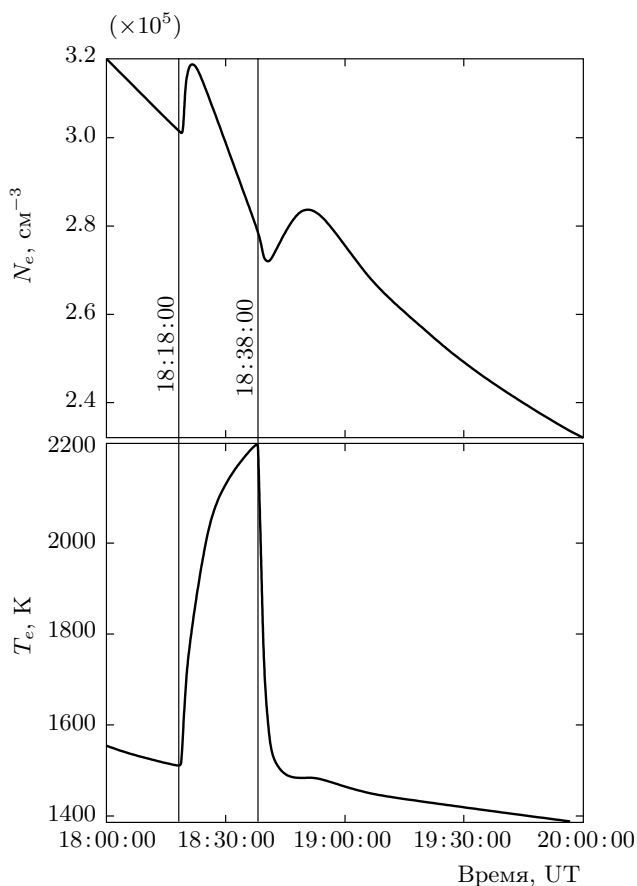


Рис. 7. Зависимости от времени концентрации и температуры электронов на оси возмущенной магнитной силовой трубки на высоте 400 км

Из рис. 6 видно, что в первой фазе нагрева (длительностью приблизительно 5 мин) возмущения наблюдаются в виде локализованного дакта плотности с повышенной относительно фонового уровня концентрацией плазмы. При дальнейшем нагреве происходит вытеснение плазмы из центральной области возмущенной магнитной силовой трубки, которое приводит к формированию двугорбого распределения концентрации.

Время релаксации возмущений к фоновому уровню после выключения нагрева составляет порядка 30 мин.

На рис. 8 и 9 представлена динамика формирования искусственных возмущений плазмы на высоте орбиты спутника DEMETER. Обозначения аналогичны рис. 6 и 7.

Возмущения концентрации электронов достигают высоты 660 км приблизительно за 2.5 мин и наблюдаются в виде локализованного дакта с повышенной до 30 % относительно фонового уровня концентрацией плазмы.

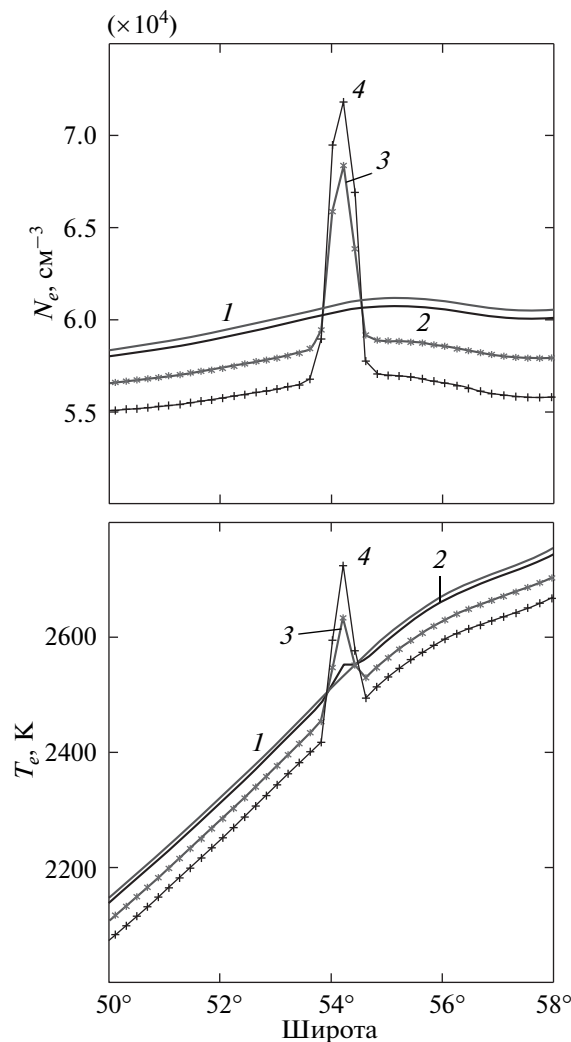


Рис. 8. Широтные профили распределений концентрации и температуры электронов на высоте 660 км. Обозначения кривых, как на рис. 6

Вытеснения плазмы из центра возмущенной магнитной силовой трубки не наблюдается, вероятно, из-за того, что за время нагрева температура электронов T_e на высоте 660 км увеличивается лишь на 10 % относительно фонового уровня.

Представленные на рис. 8 широтные профили распределений концентрации и температуры электронов хорошо коррелируют с данными натурного эксперимента (см. рис. 1).

Рисунки 10 и 11 представляют динамику формирования возмущений плазмы на высоте 1000 км.

Возмущения концентрации достигают высоты 1000 км спустя 4 мин от момента начала нагрева. Максимальное возрастание концентрации в формируемом дакте достигает 10 %, при этом температура электронов T_e увеличивается примерно лишь на 4 %.

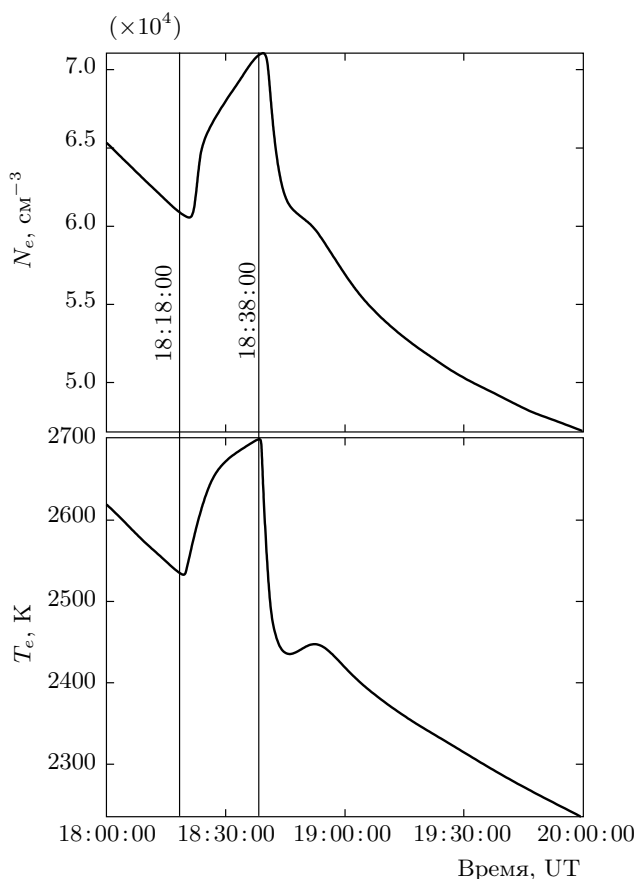


Рис. 9. Зависимости от времени концентрации и температуры электронов на оси возмущенной магнитной силовой трубки на высоте 660 км

Максимальное значение температуры электронов в области нагрева составляет 3100 К. Невозмущенная температура электронов на высотах более 1000 км оказывается выше этого значения и в результате тепловая волна в плазмосфере не возбуждается и возмущения на большие высоты не проникают.

Представленные на рис. 7, 9 и 11 зависимости показывают, что возмущения концентрации развиваются сравнительно медленно — значительно медленнее, чем возмущения температуры электронов T_e . В области F-слоя изменения N_e происходят со скоростью амбиполярной диффузии, а на высотах внешней ионосферы Земли — со скоростью ионного звука.

Полученные характерные времена развития возмущений соответствуют результатам расчетов с использованием одномерной модели ионосферы [7].

5. ВЫВОДЫ

В настоящей работе рассмотрены тепловые эффекты, связанные с нагревом электронов в резуль-

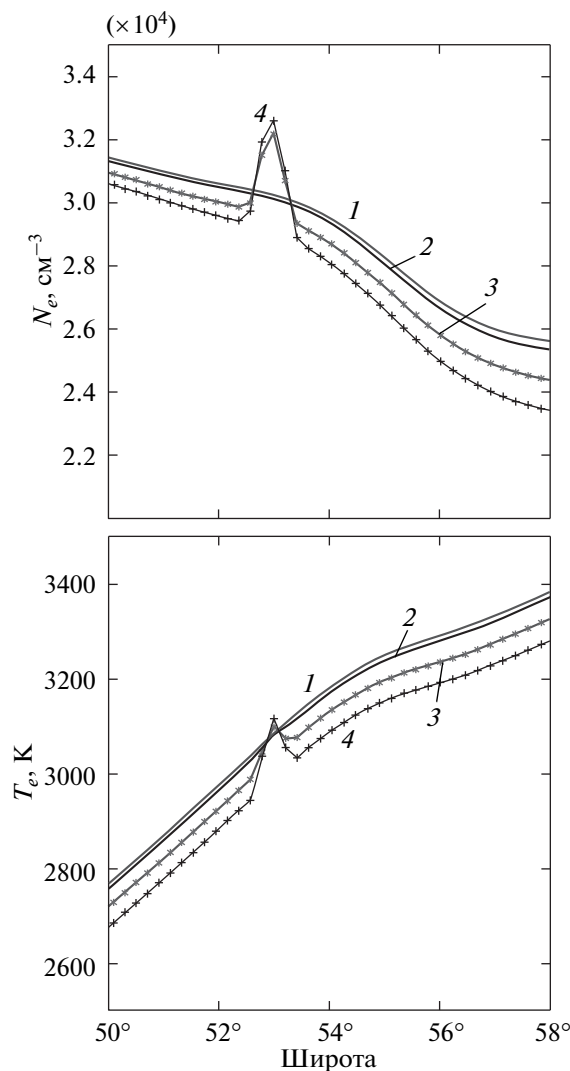


Рис. 10. Широтные профили распределений концентрации и температуры электронов на высоте 1000 км. Обозначения кривых, как на рис. 6

тате аномального поглощения мощной радиоволны в области ее отражения от ионосферы и распространением индуцируемых возмущений температуры и концентрации плазмы. Эффективное формирование крупномасштабных возмущений плазмы происходит при воздействии в направлении магнитного зенита, так как в этом случае из-за анизотропии процесса самофокусировки волны накачки имеет место наиболее значительный омический нагрев электронов.

С использованием модифицированной версии модели SAMI2 исследованы пространственная структура и динамика развития крупномасштабных возмущений температуры и плотности плазмы при воздействии мощного КВ-радиоизлучения нагревного стенда «Сура». Показано, что индуцируемые возму-

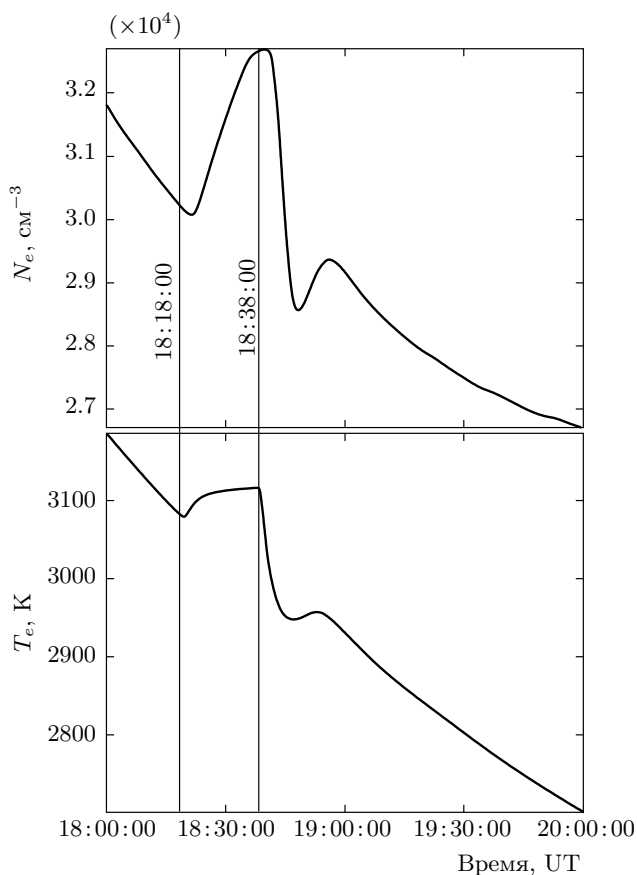


Рис. 11. Зависимости от времени концентрации и температуры электронов на оси возмущенной магнитной силовой трубки на высоте 1000 км

щения плазмы локализованы в узкой силовой трубке геомагнитного поля с характерным поперечным масштабом порядка 100 км. Возмущения захватывают практически всю толщу ионосферы и наблюдаются как ниже области отражения волны накачки, так и на высотах внешней ионосферы Земли.

Искусственные крупномасштабные возмущения имеют неоднородную пространственную структуру. В области высот до 500 км при продолжительном нагреве формируется двугорбое распределение концентрации. На высотах внешней ионосферы Земли формируется уединенный дакт с повышенной концентрацией плазмы.

Возмущения концентрации достигают высот внешней ионосферы Земли за время 1–4 мин. Время релаксации возмущений к фоновому уровню после выключения источника нагрева составляет примерно 30 мин.

Результаты моделирования хорошо коррелируют с данными серии натуральных экспериментов, в значительной мере дополняя их, что обеспечивает

более глубокое понимание процессов, протекающих при взаимодействии мощного радиоизлучения с околоземной плазмой.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации (договор № 14.В25.31.0008).

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ерухимов, С. А. Метелев, Е. Н. Мясников и др., Изв. ВУЗов. Радиофизика **30**, 208 (1987).
2. В. М. Костин, Ю. А. Романовский, В. М. Чмырёв и др., Космич. иссл. **31**, 84 (1993).
3. В. Л. Фролов, В. О. Рапопорт, Г. П. Комраков и др., Письма в ЖЭТФ **88**, 908 (2008).
4. G. M. Milikh, E. Mishin, I. Galkin et al., Geophys. Res. Lett. **37**, L18102 (2010).
5. A. L. Newman, H. C. Carlson, G. P. Mantas et al., Geophys. Res. Lett. **15**, 311 (1988).
6. В. В. Васьков, Я. С. Димант, Н. А. Рябова и др., Геомагнетизм и аэронавигация **32**, 140 (1992).
7. В. В. Васьков, Г. П. Комраков, Н. А. Рябова, Геомагнетизм и аэронавигация **35**, 75 (1995).
8. G. M. Milikh, A. G. Demekhov, K. Papadopoulos et al., Geophys. Res. Lett. **37**, L07803 (2010).
9. G. M. Milikh, A. G. Demekhov, A. Vartanyan et al., Geophys. Res. Lett. **39**, L10102 (2012).
10. J. D. Huba, G. Joyce, and J. A. Fedder, J. Geophys. Res. **105**, 23035 (2000).
11. В. В. Васьков, А. В. Гуревич, Изв. ВУЗов. Радиофизика **16**, 188 (1973).
12. F. W. Perkins, C. R. Oberman, and E. J. Valeo, J. Geophys. Res. **79**, 1478 (1974).
13. В. О. Рапопорт, В. Л. Фролов, Г. П. Комраков и др., Изв. ВУЗов. Радиофизика **50**, 709 (2007).
14. Г. А. Марков, А. С. Белов, В. Л. Фролов и др., ЖЭТФ **138**, 1037 (2010).
15. M. Kosch, M. Rietveld, T. Hagfors et al., Geophys. Res. Lett. **27**, 2817 (2000).
16. A. V. Gurevich, K. P. Zybin, H. C. Carlson et al., Phys. Lett. A **305**, 264 (2002).
17. А. В. Гуревич, А. Б. Шварцбург, *Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере*, Наука, Москва (1973).