

Параметры крупномасштабных тепловых возмущений околоземной плазмы при реализации перспективных уровней мощности среднеширотного нагревного стенда «Сура»

А.С. Белов 

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС имени Ю.Е. Седакова»
603137, Россия, г. Нижний Новгород,
ул. Тропинина, 47

Аннотация – Обоснование. Создание и развитие экспериментальных установок для исследований в области физики околоземной плазмы является крайне актуальной задачей. Коротковолновый нагревный стенд «Сура» является единственной в мире действующей среднеширотной исследовательской установкой по активному воздействию на ионосферу Земли. Новые физические результаты, полученные на стенде HAARP, обладающем более высокой мощностью излучения передатчиков, стимулируют работы по оценке возможностей модернизации и определению достижимых параметров возмущений околоземной плазмы для других установок, в том числе и для стенда «Сура». **Цель.** Численное моделирование и анализ достижимых параметров крупномасштабных тепловых возмущений околоземной плазмы при проведении модернизации установки и реализации перспективных уровней мощности излучения стенда «Сура». **Методы.** Моделирование проводилось с использованием открытого программного кода SAMI2, дополненного модифицированной моделью источника нагрева, использующей непосредственный расчет коэффициента аномального поглощения для приближения холодной плазмы при гауссовом спектре вытянутых неоднородностей. **Результаты.** Исследованы эффекты воздействия как в дневные часы, так и в условиях, соответствующих позднему вечернему времени. Для дневных условий получено, что реализация перспективных уровней мощности на стенде «Сура» приводит к практически двукратному возрастанию возмущений плотности и температуры электронов в области искусственного дакта на высотах внешней ионосферы Земли. Для условий позднего вечернего времени получено, что осуществление модернизации нагревного стенда приводит также к двукратному возрастанию возмущений температуры электронов. При этом увеличение уровня относительных возмущений плотности электронов не столь значительное и составляет не более 20 % относительно действующих характеристик стенда. **Заключение.** Показано, что параметры создаваемых тепловых возмущений нелинейно зависят от мощности излучения волны накачки и их рост насыщается вследствие перераспределения плазмы в области аномального поглощения.

Ключевые слова – моделирование ионосферы; нагрев околоземной плазмы; тепловые возмущения; крупномасштабные неоднородности.

Введение

Создание и развитие установок для исследований в области физики околоземной плазмы является крайне актуальной задачей. Интерес к данному направлению обусловлен как разнообразными практическими приложениями, включающими активную диагностику и мониторинг состояния околоземного пространства, задачи телекоммуникаций и радиолокации, так и необходимостью решения фундаментальной задачи построения полной физической картины развивающихся явлений в неоднородной магнитоактивной плазме [1; 2].

В настоящее время коротковолновый нагревный стенд «Сура» [3] (56,15° N, 46,11° E) является единственной в мире действующей среднеширотной исследовательской установкой по активному воздействию на околоземную плазму. Расположение стенда в средних широтах позволяет обеспечить высокую воспроизводимость и достоверность получаемых результатов, т. к. экваториальная и

высокоширотная области ионосферы Земли значительно сильнее подвержены разнообразным геофизическим возмущениям [4; 5].

Действующий нагревный стенд «Сура» включает в себя три коротковолновых передатчика ПКВ-250 с непрерывной мощностью излучения 250 кВт каждый ($P_{0_SURA} = 750$ кВт), нагруженных на фазированную антенную решетку, состоящую из 144 горизонтальных скрещенных широкополосных вибраторов. Максимальная эффективная излучаемая мощность стенда P_{ERP_SURA} в диапазоне частот 4,3–9,5 МГц составляет 80–280 МВт соответственно.

В последнее время на нагревном стенде HAARP был получен ряд новых эффектов [6; 7], обусловленных в значительной мере более высокой мощностью излучения передатчиков стенда ($P_{0_HAARP} = 3,6$ МВт, $P_{ERP_HAARP} = 400–3000$ МВт).

Таким образом, планка научных достижений, реализованных на установке HAARP, стимулирует

работы по оценке возможностей модернизации и других существующих исследовательских установок, в том числе нагревного стенда «Сура».

В работе [8] на основе анализа существующей инфраструктуры и имеющихся научно-технологических возможностей определены облик и практически реализуемые технические характеристики нагревного стенда «Сура».

Одним из наиболее значимых эффектов воздействия мощного КВ-радиоизлучения на околоземную плазму является формирование вытянутых вдоль геомагнитного поля крупномасштабных искусственных плазменно-волновых структур (дактов плотности), оказывающих существенное влияние на распространение низкочастотных радиоволн.

Целью настоящей работы является проведение численного моделирования и анализ достижимых параметров таких крупномасштабных возмущений околоземной плазмы при проведении модернизации установки и реализации перспективных уровней мощности излучения стенда «Сура».

Для проведения анализа целесообразно выбрать характерный день, соответствующий спокойным геомагнитным условиям. В качестве этого дня был определен сеанс 13 марта 2023 г., характеризующийся очень низким значением суммарного планетарного индекса геомагнитной возмущенности $\Sigma K_p = 4$. При этом отдельно рассмотрены эффекты воздействия в дневных условиях (09:00 UT соответствует 12:00 LT) и условиях, соответствующих позднему вечерним часам (18:00 UT, 21:00 LT).

1. Расчетная ионосферная модель

Несмотря на значительное разнообразие численных моделей ионосферы Земли, практически все исследования по моделированию эффектов ее нагрева мощным КВ-радиоизлучением [9–12], проводимые в последние два десятилетия, базировались на двухмерной модели SAMI2 [13], обладающей открытым исходным программным кодом и позволяющей описывать динамику околоземной плазмы в области всей возмущенной геомагнитной силовой трубки.

Данная двухмерная ионосферная модель SAMI2, дополненная модифицированной моделью источника нагрева [14], использующей непосредственный расчет коэффициента аномального поглощения для приближения холодной плазмы при гауссовом спектре вытянутых неоднородностей, использована и в настоящей работе.

Для сеанса 13.03.2023 значения основных параметров моделирования, определяющих состояние ионосферы, составляют: планетарный магнитный индекс $A_p = 2$, индекс солнечной активности $F_{10,7} = 100$. Параметры расчетной сетки, описывающие, соответственно, количество ячеек вдоль геомагнитного поля n_z и число силовых линий n_f , составляют $(n_z, n_f) = (801, 402)$, что позволяет обеспечить компромисс между вычислительными возможностями и достигаемым пространственным разрешением.

Моделирование источника нагрева проводилось для мелкомасштабных неоднородностей гауссовой формы с величиной возмущения концентрации $\delta N_m = 0,025 N_{UHR}$, характерным масштабом $a = 0,2$ м и значением расстояния между неоднородностями $r_0 = 6a = 1,2$ м. Данные параметры неоднородностей обеспечивают аномальное поглощение мощной радиоволны накачки за счет локального возбуждения необыкновенной Z-моды и коротковолновых плазменных колебаний [15].

В качестве характеристик воздействующего КВ-радиоизлучения в модели выступают: мощность передатчиков нагревного стенда (P_0), частота излучения (f_0) и угловой поперечный размер области нагрева ($\Delta\theta$), время нагрева.

При проведении моделирования нагревный стенд «Сура» включался на 20 мин в 09:00 UT для дневных условий и в 18:00 UT для условий, соответствующих позднему вечерним часам. Это значение времени нагрева в соответствии с [16; 17] является достаточным для развития искусственной ионосферной турбулентности не только в области аномального поглощения волны накачки, но и на высотах внешней ионосферы Земли.

Численное моделирование запускалось на 26 часов. Для уменьшения влияния инициализации дополнительный источник нагрева в уравнении теплопроводности для электронов «включался» через 22 часа по отношению к началу моделирования.

2. Результаты численного моделирования крупномасштабных тепловых возмущений околоземной плазмы в дневных условиях

Следует отметить, что ранее при действующих характеристиках нагревного стенда «Сура» для дневных сеансов крупномасштабные плазменно-волновые возмущения на высотах внешней ионосферы Земли не регистрировались.

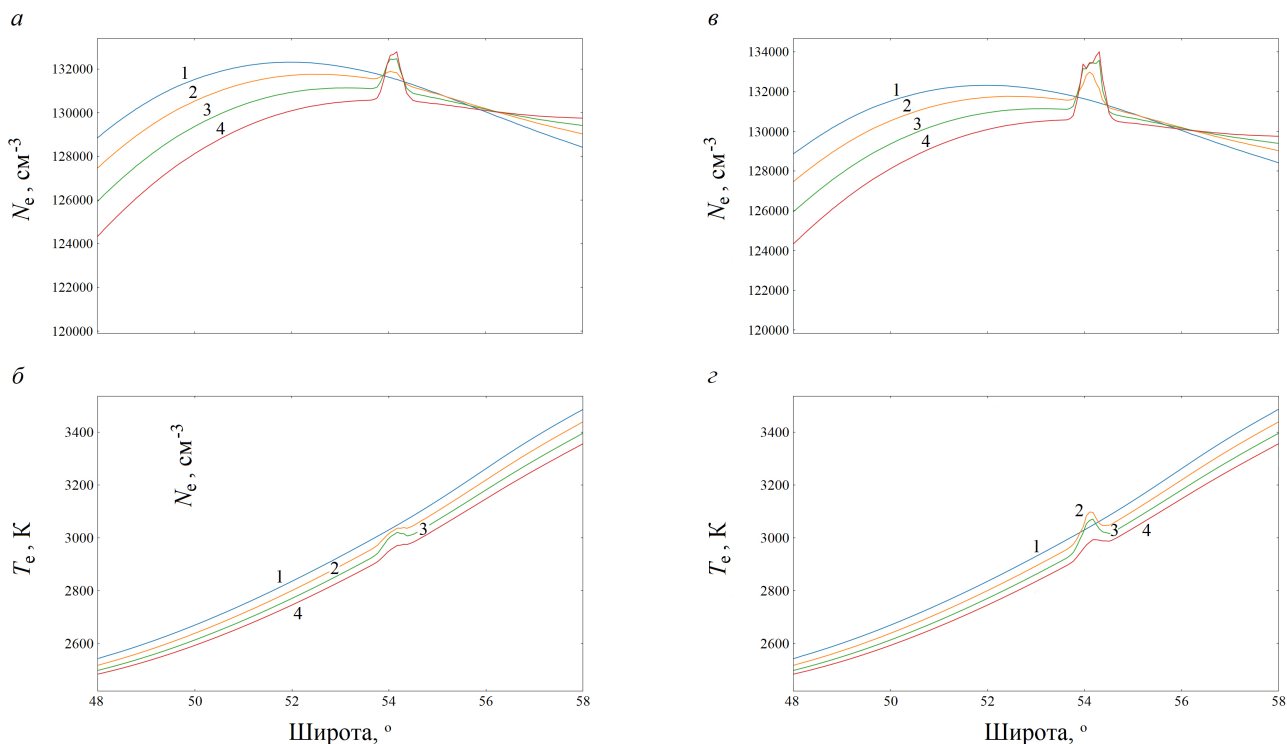


Рис. 1. Широтные профили распределений плотности (а и в) и температуры электронов (б и г) на $h = 700$ км для следующих моментов времени: 09:00:00 UT (1), 09:10:00 UT (2), 09:20:00 UT (3) и 09:30:00 UT (4)
 Fig. 1. Latitudinal profiles of density (a and c) and electron temperature (b and d) distributions at $h = 700$ km for the following time points: 09:00:00 UT (1), 09:10:00 UT (2), 09:20:00 UT (3) and 09:30:00 UT (4)

Для 13.03.2023 и момента времени 09:00 UT критическая частота F_2 -области ионосферы $f_{O_F2} = 12$ МГц, поэтому воздействие целесообразно проводить на максимальной рабочей частоте станда $f_0 = 9,5$ МГц.

Для действующих параметров станда мощность излучения передатчиков на данной частоте $P_0 = 750$ кВт, а размер области нагрева на высоте отражения волны накачки 240 км составляет $\Delta\theta = 0,12^\circ$.

После проведения модернизации ожидается, что мощность излучения передатчиков на частоте 9,5 МГц будет составлять $P_{0_{pr}} = 2400$ кВт, а $\Delta\theta = 0,1^\circ$.

На рис. 1 и 2 представлены полученные при моделировании распределения плотности N_e и температуры T_e электронов для различных моментов времени (кривая (1) – непосредственно перед включением источника нагрева 09:00:00 UT, кривая (2) – 09:10:00 UT, кривая (3) – выключения нагрева 09:20:00 UT, кривая (4) – спустя 10 мин после выключения источника нагрева 09:30:00 UT) во внешней ионосфере Земли на высотах 700 и 1500 км. В левом столбце рис. 1 и 2, а и б представлены результаты моделирования для действующих параметров нагрева, а в правом столбце

(в и г) – для параметров после проведения модернизации станда.

В дневных условиях критическая частота F_2 -области ионосферы значительно превышает частоту воздействующего КВ-радиоизлучения, что приводит к тому, что нагрев осуществляется на существенно меньших высотах, чем максимум F_2 -области, и «пробоя» ионосферы в результате воздействия не наблюдается.

Во внешней ионосфере Земли возмущения плотности и температуры электронов реализуются в виде локализованной структуры (дакта) с повышенными относительно фонового уровня значениями N_e и T_e .

В соответствии с представленными на рис. 1 и 2 данными, видно, что уровень возмущений как для действующих параметров станда, так и после проведения модернизации является достаточно малым.

Максимальные значения за время нагрева относительных возмущений плотности

$$\delta N_{e_max} = N_{e_max_duct} / N_{e_bg}$$

и температуры электронов

$$\delta T_{e_max} = T_{e_max_duct} / T_{e_bg}$$

($N_{e_max_duct}$, $T_{e_max_duct}$ – максимальные значения плотности и температуры электронов в воз-

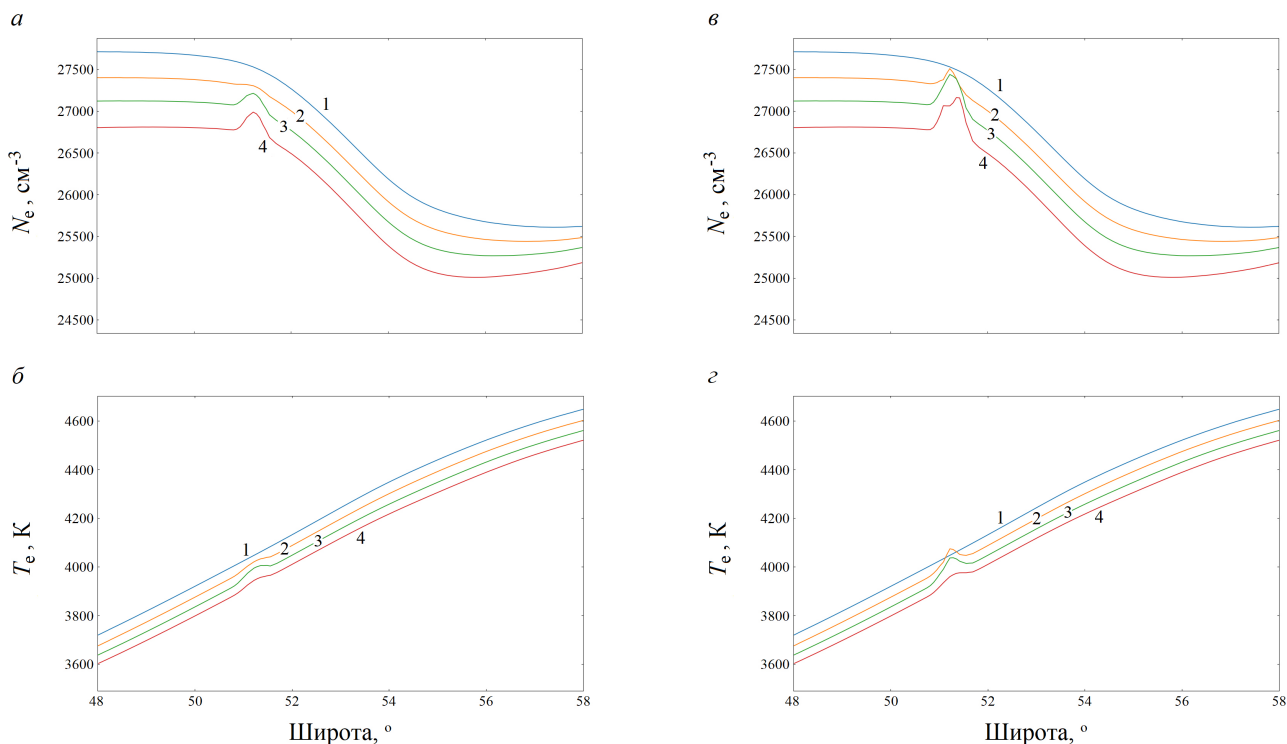


Рис. 2. Широтные профили распределений плотности (а и в) и температуры электронов (б и г) на $h = 1500$ км для тех же моментов времени, что и на рис. 1

Fig. 2. Latitudinal profiles of density (a and c) and electron temperature (b and d) distributions at $h = 1500$ km for the same time points as in Fig. 1

мущенной области, а N_{e_bg} , $T_{e_max_bg}$ – их фоновые значения) для высоты 700 км составляют для действующих параметров стенда (см. рис. 1): $\delta N_{e_max_700} = 1,2 \%$, а $\delta T_{e_max_700} = 1,7 \%$. Характерный поперечный размер дакта плотности плазмы на высоте 700 км – порядка 70 км. Столь малые значения возмущений при действующих характеристиках нагревного стенда «Сура» и обусловили тот факт, что они терялись в уровне шумовых сигналов.

После реализации перспективных уровней мощности нагревного стенда «Сура» значения относительных возмущений плотности и температуры электронов составят: $\delta N_{e_max_700_pr} = 2,3 \%$, а $\delta T_{e_max_700_pr} = 3 \%$. Данные параметры возмущений, вероятно, будет уже возможно зарегистрировать при проведении непосредственных *in situ* измерений с помощью высокочувствительной аппаратуры искусственных спутников Земли (для утренних сеансов воздействия мощного КВ-радиоизлучения нагревного стенда «Сура» экспериментально зарегистрированы с использованием спутников серии DMSP относительные возмущения плотности плазмы величиной $\sim 3 \%$ [16]).

При увеличении значения высоты во внешней ионосфере Земли возмущения продолжают наблюдаться в виде такого же локализованного

дакта. Для высоты $h = 1500$ км (см. рис. 2) значения максимальных относительных возмущений плотности и температуры электронов составляют: $\delta N_{e_max_1500} = 0,6 \%$ и $\delta T_{e_max_1500} = 0,6 \%$, а после проведения модернизации: $\delta N_{e_max_1500_pr} = 1,5 \%$ и $\delta T_{e_max_1500_pr} = 1,8 \%$. Характерный поперечный размер дакта несколько увеличивается, достигая на высоте 1500 км величины 80–90 км.

Приведенные на рис. 1 и 2 (кривые 4) результаты моделирования показывают, что возмущения температуры T_e успевают релаксировать после прекращения нагрева за время порядка 10 мин, в свою очередь, с возмущениями плотности электронов этого не происходит (время релаксации возмущений N_e составляет более 30 мин).

3. Результаты численного моделирования крупномасштабных тепловых возмущений околоземной плазмы в ночных условиях

Поздние вечерние (ночные) часы являются оптимальным временем суток для формирования искусственных дактов плотности плазмы [16].

Для момента времени 18:00 UT 13.03.2023 критическая частота F_2 -области ионосферы составляет $f_{O_F2} = 5,9$ МГц. В целях обеспечения нагрева в

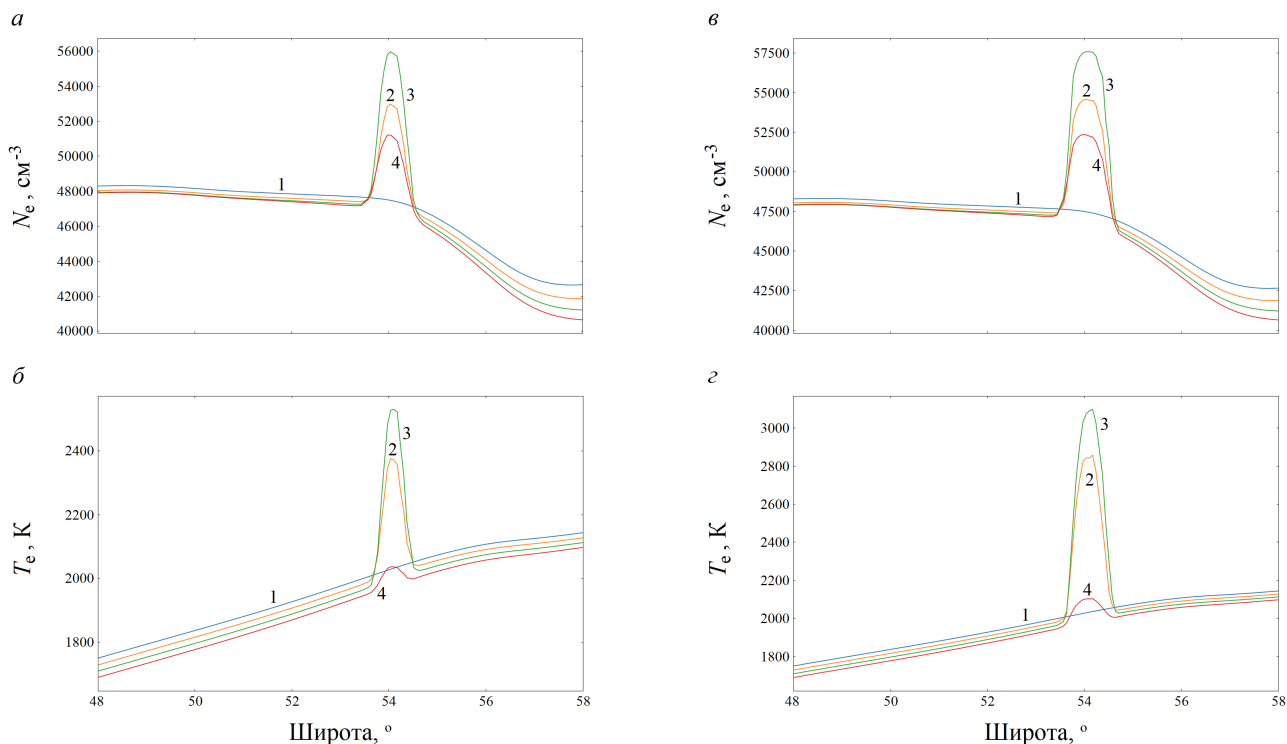


Рис. 3. Широтные профили распределений плотности (а и в) и температуры электронов (б и г) на $h = 700$ км для следующих моментов времени: 18:00:00 UT (1), 18:10:00 UT (2), 18:20:00 UT (3) и 18:30:00 UT (4)

Fig. 3. Latitudinal profiles of density (a and c) and electron temperature (b and d) distributions at $h = 700$ km for the following time points: 18:00:00 UT (1), 18:10:00 UT (2), 18:20:00 UT (3) and 18:30:00 UT (4)

отсутствии пробоя ионосферы воздействие целесообразно проводить на нижней рабочей частоте станда $f_0 = 4,3$ МГц.

Для действующих параметров станда размер области нагрева на высоте отражения волны накачки 260 км составляет $\Delta\theta = 0,27^\circ$, а после проведения модернизации при увеличении мощности излучения передатчиков с 700 кВт до $P_{0_pr} = 2400$ кВт характерный поперечный размер зоны воздействия $\Delta\theta = 0,23^\circ$.

На рис. 3 и 4 представлены полученные при моделировании распределения плотности N_e и температуры T_e электронов для различных моментов времени (кривая (1) – непосредственно перед включением источника нагрева 18:00:00 UT, кривая (2) – 18:10:00 UT, кривая (3) – выключения нагрева 18:20:00 UT, кривая (4) – спустя 10 мин после выключения источника нагрева 18:30:00 UT) во внешней ионосфере Земли на высотах 700 и 1500 км. В левом столбце рис. 3 и 4, а и б представлены результаты моделирования для действующих параметров нагрева, а в правом столбце (в и г) – для параметров после проведения модернизации станда, аналогично как и для рис. 1 и 2.

В соответствии с представленными на рис. 3 и 4 данными видно, что уровень возмущений как для действующих параметров станда, так и после

проведения модернизации значительно вырос по сравнению с дневными часами.

Для высоты 700 км возмущения плотности и температуры электронов наблюдаются в течение всего времени нагрева в виде локализованной структуры (дакта) с повышенными относительно фонового уровня значениями N_e и T_e . Максимальные значения за время воздействия (для $T = 18:20:00$ UT) относительных возмущений плотности и температуры электронов на высоте 700 км составляют для действующих параметров станда (см. рис. 3): $\delta N_{e_max_700} = 19\%$ и $\delta T_{e_max_700} = 27\%$. Характерный поперечный размер дакта плотности плазмы на высоте 700 км также вырос по сравнению с дневными часами (видимо, из-за увеличения размера источника нагрева в F_2 -области ионосферы) и составляет порядка 130 км.

После реализации перспективных уровней мощности излучения станда «Сура» расчетные значения возмущений для той же высоты и момента времени составят: $\delta N_{e_max_700_pr} = 23\%$ и $\delta T_{e_max_700_pr} = 55\%$, а ширина дакта 140 км. Таким образом, модернизация нагревного станда приводит к двукратному возрастанию возмущений температуры электронов в области искусственного дакта плотности на данной высоте. В то же время увеличение уровня относительных

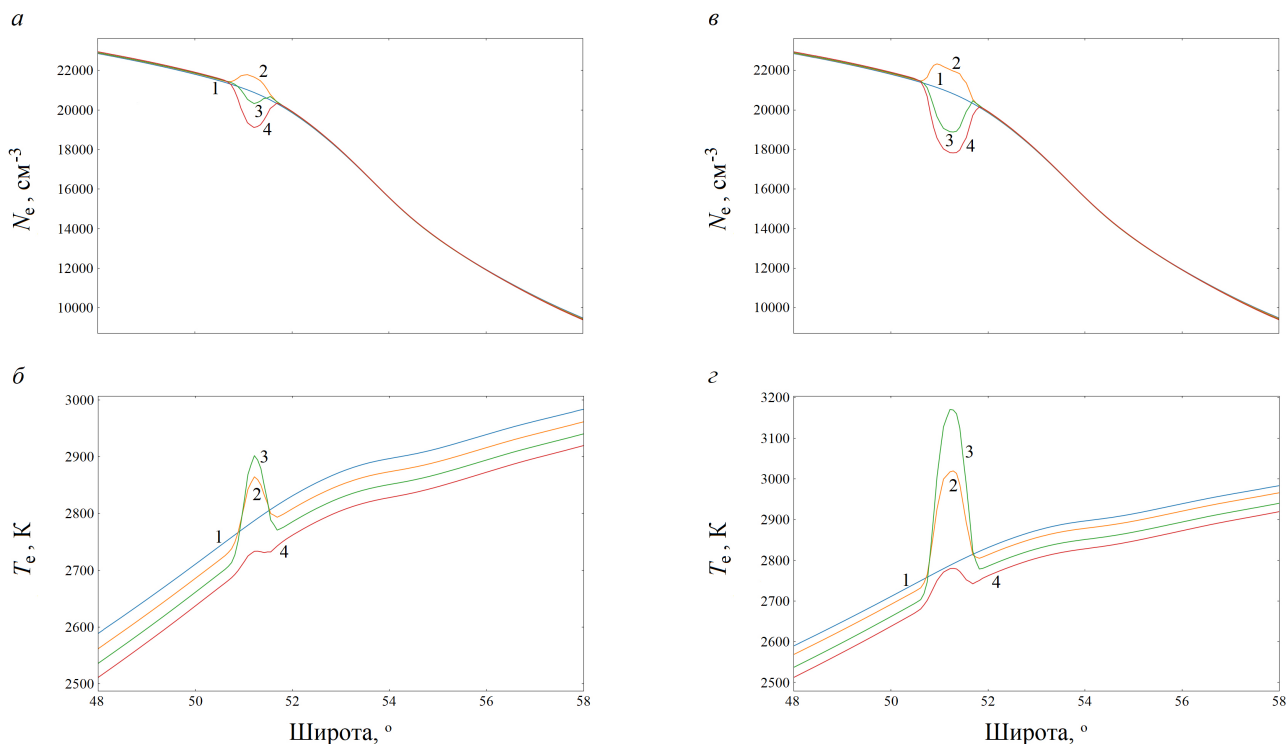


Рис. 4. Широтные профили распределений плотности (а и в) и температуры электронов (б и г) на $h = 1500$ км для тех же моментов времени, что и на рис. 3

Fig. 4. Latitudinal profiles of density (a and c) and electron temperature (b and d) distributions at $h = 1500$ km for the same time points as in Fig. 3

возмущений плотности электронов не столь значительное и составляет не более 20 % относительно действующих характеристик стэнда.

Для больших значений высот во внешней ионосфере Земли возмущения плотности плазмы продолжают наблюдаться в виде локализованного дакта, однако со структурой, изменяющейся в течение времени нагрева и носящей более сложный характер.

В верхней части внешней ионосферы на высоте 1500 км в первой фазе нагрева (длительностью порядка 10 мин) за счет вытеснения плазмы из области аномального поглощения волны накачки в F_2 -области ионосферы возмущения плотности N_e наблюдаются в виде дакта с повышенными относительно фоновых значений. Максимальные значения относительных возмущений плотности и температуры электронов составляют для действующих параметров стэнда: $\delta N_{e_max_1500} = 3\%$ и $\delta T_{e_max_1500} = 4\%$, а после проведения модернизации: $\delta N_{e_max_1500_pr} = 5\%$ и $\delta T_{e_max_1500_pr} = 9\%$.

Далее, вероятно, из-за того, что на данных высотах основной вклад в плотность плазмы вносят ионы H^+ и He^+ , вытеснение этих ионов из возмущенной области за счет возрастания температуры электронов уже не компенсируется более тяжелы-

ми компонентами O^+ и NO^+ , приходящими с более низких высот ионосферы. В результате это приводит к формированию на данных высотах области с пониженной плотностью плазмы. К моменту окончания нагрева для $T = 18:20:00$ UT величина относительного уровня понижения плотности электронов составляет для действующих параметров стэнда $\delta N_{e_max_1500_2} = -4\%$, а после проведения модернизации $\delta N_{e_max_1500_pr_2} = -11\%$. При этом в возмущенной области наблюдается рост температуры электронов, достигающий 6 % для действующих и 15 % для перспективных параметров нагревного стэнда «Сура».

Локализованные в области данной силовой трубки геомагнитного поля возмущения плотности и температуры плазмы распространяются далее и на большие высоты в ионосфере и магнитосфере Земли, формируя таким образом крупномасштабную плазменно-волновую неоднородную структуру, существенным образом влияющую на трансionoсферное прохождение низкочастотных волн, возбуждаемых наземными (передатчиками) или атмосферными (грозами) источниками [18; 19].

Закключение

По результатам численного моделирования исследованы параметры крупномасштабных тепло-

вых возмущений околосемной плазмы, индуцируемых мощным коротковолновым радиоизлучением нагревного стенда «Сура» в околосемной плазме при проведении его модернизации и реализации перспективных уровней мощности. С целью проведения сравнительного анализа моделирование выполнено также и для действующих характеристик стенда.

Численное моделирование тепловых возмущений проводилось с помощью двухмерной ионосферной модели SAMI2, дополненной модифицированной моделью источника нагрева.

Рассмотрены эффекты воздействия как в дневные часы, так и в условиях, соответствующих позднему вечернему времени.

Для дневных условий показано, что увеличение мощности передатчиков нагревного стенда «Сура» более чем в 3 раза влечет практически двукратное возрастание возмущений плотности и температуры электронов в области искусственного дакта на

высотах внешней ионосферы Земли. Однако данные параметры возмущений, вероятно, будет уже возможно зарегистрировать при проведении непосредственных *in situ* измерений с помощью высокочувствительной аппаратуры искусственных спутников.

Моделирование для условий позднего вечернего времени показало, что осуществление модернизации нагревного стенда приводит также к двукратному возрастанию возмущений температуры электронов. При этом увеличение уровня относительных возмущений плотности электронов не столь значительное и составляет не более 20 % относительно действующих характеристик стенда.

Финансирование

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (направление «Ядерная и радиационная физика», этап 2023–2025).

Список литературы

1. Мизонова В.Г., Дегтерев Е.Г., Соколова Г.М. Влияние возмущений плотности ионосферной плазмы на условия распространения свистовых волн в ионосфере // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2024. Т. 27, № 3. С. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.3.7-16>
2. Белов А.С. Особенности генерации и распространения сверхнизкочастотных волн, возбуждаемых в ионосфере Земли, при воздействии мощного КВ-радиоизлучения // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 4. С. 53–62. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.4.53-62>
3. Стенд «Сура»: исследования атмосферы и космического пространства (обзор) / В.В. Беликович [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 7. С. 545–576. URL: <https://www.elibrary.ru/iciqaz>
4. Fejer B.G. The equatorial ionospheric electric fields: A review // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1981. Vol. 43, no. 5-6. P. 377–386. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90101-x](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90101-x)
5. Tsunoda R.T. High-latitude F region irregularities: a review and synthesis // Reviews of Geophysics. 1988. Vol. 26, no. 4. P. 719–760. DOI: <https://doi.org/10.1029/RG026i004p00719>
6. Creation of artificial ionospheric layers using high-power HF waves / T. Pedersen [et al.] // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37, no. 2. P. L02106. DOI: <https://doi.org/10.1029/2009GL041895>
7. DEMETER observations of an intense upgoing column of ELF/VLF radiation excited by the HAARP HF heater / D. Piddychiy [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113, no. A10. P. A10308. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008JA013208>
8. Концепция ФГБНУ НИРФИ по модернизации стенда СУРА / С.Д. Снегирев [и др.]. Препринт № 548. Нижний Новгород: ФГБНУ НИРФИ, 2013. 25 с.
9. An interhemispheric model of artificial ionospheric ducts / R.P. Perrine [et al.] // Radio Science. 2006. Vol. 41, no. 4. P. RS4002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005RS003371>
10. Model for artificial ionospheric duct formation due to HF heating / G.M. Milikh [et al.] // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37, no. 7. P. L07803. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010GL042684>
11. A new model for formation of artificial ducts due to ionospheric HF-heating / G.M. Milikh [et al.] // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39, no. 10. P. L10102. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012GL051718>
12. Демехов А.Г. Формирование крупномасштабных возмущений при высокочастотном нагреве ионосферы: зависимость характеристик возмущений от частоты и мощности высокочастотного излучения // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2022. Т. 65, № 2. С. 79–95. DOI: <https://doi.org/10.52452/00213462-2022-65-02-79>
13. Sami2 is another model of the ionosphere (SAMI2): A new low-latitude ionosphere model / J.D. Huba [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105, no. A10. P. 23035–23053. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000JA000035>
14. Белов А.С. Моделирование крупномасштабных возмущений околосемной плазмы при воздействии мощного коротковолнового радиоизлучения нагревного стенда «Сура» // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 6. С. 430–444. DOI: <https://doi.org/10.52452/00213462-2021-64-06-430>
15. Васильков В.В., Рябова Н.А. К вопросу об аномальном поглощении радиоволн на вытянутых вдоль магнитного поля мелкомасштабных неоднородностях // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 3. С. 181–197. URL: <https://www.elibrary.ru/hmrgdt>

16. Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением / В.Л. Фролов [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88, № 12. С. 908–913. URL: <https://www.elibrary.ru/mtyksv>
17. Характеристики электромагнитных и плазменных возмущений, индуцируемых на высотах внешней ионосферы Земли при модификации F2-области мощным радиоизлучением стенда «Сура» / В.Л. Фролов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 198–222. URL: <https://www.elibrary.ru/whenif>
18. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility / V.O. Rapoport [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2010. Vol. 115, no. A10. P. A10322. DOI: <https://doi.org/10.1029/2010JA015484>
19. Whistler propagation in ionospheric density ducts: simulations and DEMETER observations / J.R. Woodroffe [et al.] // Journal of Geophysical Research. 2013. Vol. 118, no. 11. P. 7011–7018. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JA019445>

Информация об авторе

Белов Алексей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отделения – начальник научно-исследовательского отдела филиала РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС имени Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород, Россия.

Область научных интересов: радиофизика, прикладная электродинамика, активные воздействия на околоземную плазму.

E-mail: alexis-belov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0533-3771>

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2025, vol. 28, no. 3, pp. 80–88

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.3.80-88](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.3.80-88)
UDC 533.951
Original Research

Received 2 April 2025
Accepted 5 May 2025
Published 30 September 2025

Parameters of large-scale thermal disturbances of near-Earth plasma during implementation of promising power levels of the Sura mid-latitude heating facility

Alexey S. Belov 

Branch of FSUE RFNC-VNIIEF «NIIS named after Yu.E. Sedakov»
47, Tropinin Street,
Nizhny Novgorod, 603137, Russia

Abstract – Background. The generation and development of experimental facilities for research in the field of near-Earth plasma physics is an extremely urgent task. The Sura short-wave heating stand is the only operating mid-latitude research facility in the world on the active effect on the Earth's ionosphere. The new physical results obtained at the HAARP, which has a higher transmitter radiation power, stimulate work to assess the possibilities of upgrade and determine the achievable parameters of near-Earth plasma perturbations for other facilities including the Sura stand. **Aim.** Numerical simulation and analysis of achievable parameters of large-scale thermal disturbances of near-Earth plasma during facility upgrading and promising power levels implementation of the Sura stand. **Methods.** The simulation was conducted using open source SAMI2 code supplemented by an upgraded heating source model using direct calculation of the abnormal absorption coefficient to approximate the cold plasma at the Gaussian spectrum of elongated inhomogeneities. **Results.** Exposure results for both daytime and late evening hours were investigated. For daytime conditions it was obtained that the promising power levels implementation at the Sura facility results in an almost twofold increase of the density and electrons temperature perturbations in the artificial duct region at the Earth's outer ionosphere heights. For late evening conditions it is obtained that the upgrade of the heating facility also results in a twofold increase of electron temperature perturbations. At the same time, the increase of the electron density relative perturbations level is not so significant and at most 20% relative to the actual facility characteristics. **Conclusion.** It has been shown that the generated thermal perturbation parameters are non-linearly dependent on the radiation power of the pump wave and their growth is saturated due to the plasma redistribution in the abnormal absorption region.

Keywords – ionosphere modeling; near-Earth's plasma heating; thermal disturbances; large-scale irregularities.

✉ alexis-belov@yandex.ru (Alexey S. Belov)

 © Alexey S. Belov, 2025

References

1. V. G. Mizonova, E. G. Degterev, and G. M. Sokolova, “Influence of density variations of ionosphere plasma on the conditions of electromagnetic whistler waves propagation in the ionosphere,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 7–16, 2024, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.3.7-16>. (In Russ.)
2. A. S. Belov, “Features of generation and propagation of the extremely low frequency waves excited in the ionosphere under the powerful HF radioemission influence,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 53–62, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.4.53-62>. (In Russ.)

3. V. V. Belikov et al., "The "Sura" facility: Study of the atmosphere and space (a review)," *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika*, vol. 50, no. 7, pp. 545–576, 2007, url: <https://www.elibrary.ru/iciqaz>. (In Russ.)
4. B. G. Fejer, "The equatorial ionospheric electric fields: A review," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 43, no. 5, pp. 377–386, 1981, doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(81\)90101-x](https://doi.org/10.1016/0021-9169(81)90101-x).
5. R. T. Tsunoda, "High-latitude F region irregularities: a review and synthesis," *Reviews of Geophysics*, vol. 26, no. 4, pp. 719–760, 1988, doi: <https://doi.org/10.1029/RG026i004p00719>.
6. T. Pedersen et al., "Creation of artificial ionospheric layers using high-power HF waves," *Geophysical Research Letters*, vol. 37, no. 2, p. L02106, 2010, doi: <https://doi.org/10.1029/2009GL041895>.
7. D. Piddychiy et al., "DEMETER observations of an intense upgoing column of ELF/VLF radiation excited by the HAARP HF heater," *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, no. A10, p. A10308, 2008, doi: <https://doi.org/10.1029/2008JA013208>.
8. S. D. Snegirev et al., "The concept of the FGBNU NIRFI to modernize the Sura stand, preprint no. 548. Nizhny Novgorod: FGBNU NIRFI, 2013. (In Russ.)
9. R. P. Perrine et al., "An interhemispheric model of artificial ionospheric ducts," *Radio Science*, vol. 41, no. 4, p. RS4002, 2006, doi: <https://doi.org/10.1029/2005RS003371>.
10. G. M. Milikh et al., "Model for artificial ionospheric duct formation due to HF heating," *Geophysical Research Letters*, vol. 37, no. 7, p. L07803, 2010, doi: <https://doi.org/10.1029/2010GL042684>.
11. G. M. Milikh et al., "A new model for formation of artificial ducts due to ionospheric HF-heating," *Geophysical Research Letters*, vol. 39, no. 10, p. L10102, 2012, doi: <https://doi.org/10.1029/2012GL051718>.
12. A. G. Demekhov, "The formation of large-scale disturbances with high-frequency heating of the ionosphere: The dependence of the characteristics of disturbances on the frequency and power of high-frequency radiation," *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika*, vol. 65, no. 2, pp. 79–95, 2022, doi: <https://doi.org/10.52452/00213462-2022-65-02-79>. (In Russ.)
13. J. D. Huba et al., "Sami2 is another model of the ionosphere (SAMI2): A new low-latitude ionosphere model," *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, no. A10, pp. 23035–23053, 2000, doi: <https://doi.org/10.1029/2000JA000035>.
14. A. S. Belov, "Modeling large-scale disturbances of near-Earth plasma when exposed to powerful short -wave radio radiation of the heating stand "Sura"," *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika*, vol. 64, no. 6, pp. 430–444, 2021, doi: <https://doi.org/10.52452/00213462-2021-64-06-430>. (In Russ.)
15. V. V. Vas'kov and N. A. Ryabova, "Anomalous absorption of radio waves by small-scale magnetic-field-aligned irregularities," *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika*, vol. 48, no. 3, pp. 181–197, 2005, url: <https://www.elibrary.ru/hmrgdt>. (In Russ.)
16. V. L. Frolov et al., "Density ducts formed by heating the Earth's ionosphere with high-power HF radio waves," *Pis'ma v ZhETF*, vol. 88, no. 12, pp. 908–913, 2008, url: <https://www.elibrary.ru/mtyksv>. (In Russ.)
17. V. L. Frolov et al., "Features of the electromagnetic and plasma disturbances induced at the altitudes of the Earth's outer ionosphere by modification of the ionospheric F_2 region using high-power radio waves radiated by the SURA heating facility," *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radiofizika*, vol. 59, no. 3, pp. 198–222, 2016, url: <https://www.elibrary.ru/whenif>. (In Russ.)
18. V. O. Rapoport et al., "VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility," *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, no. A10, p. A10322, 2010, doi: <https://doi.org/10.1029/2010JA015484>.
19. J. R. Woodroffe et al., "Whistler propagation in ionospheric density ducts: simulations and DEMETER observations," *Journal of Geophysical Research*, vol. 118, no. 11, pp. 7011–7018, 2013, doi: <https://doi.org/10.1002/2013JA019445>.

Information about the Author

Alexey S. Belov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, deputy head of the Research Division – Head of the Research Department, Branch of FSUE RFNC-VNIIEF «NIIIS named after Yu.E. Sedakov», Nizhny Novgorod, Russia.

Research interests: radiophysics, applied electrodynamics, active impacts on the near-earth plasma.

E-mail: alexis-belov@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0533-3771>