



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Филиал ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
«Научно-исследовательский институт
измерительных систем им. Ю.Е. Седакова»

Крупномасштабные возмущения околоземной плазмы при достижении перспективных уровней мощности нагревного стенда «Сура»

Белов Алексей Сергеевич

Заместитель начальника научно-исследовательского отделения –
начальник научно-исследовательского отдела

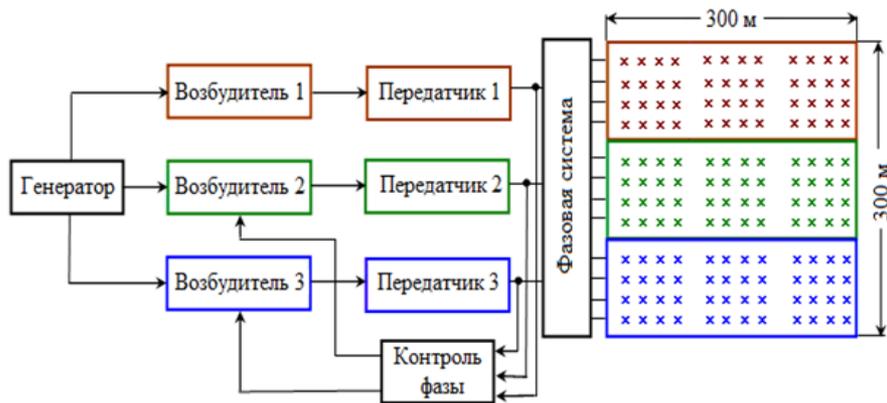
Снежинск, 2025

Нагревный стенд «Сура»



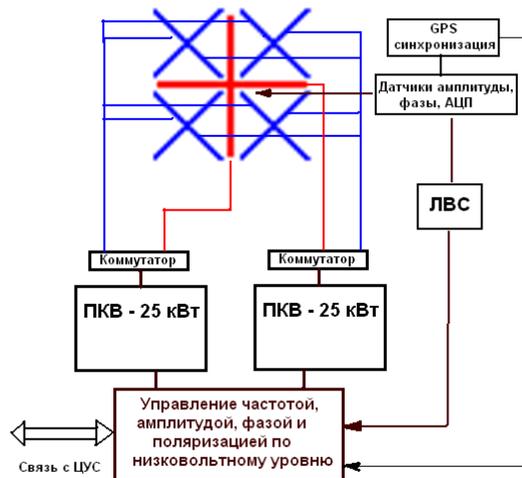
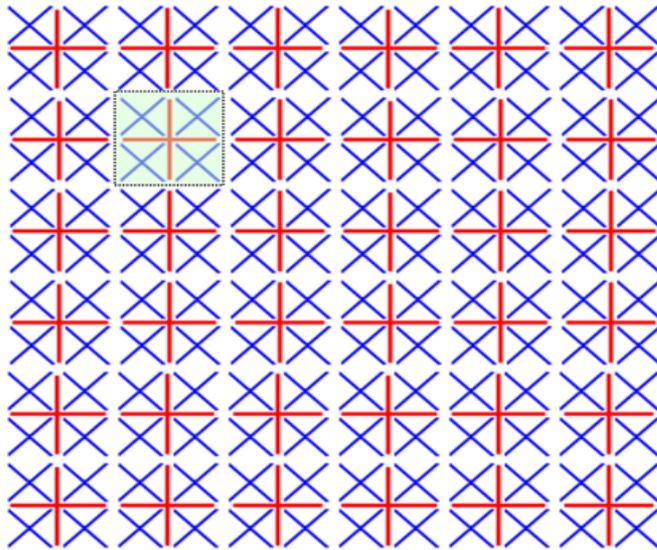
Коротковолновый нагревный стенд «Сура» является единственной в мире действующей среднеширотной исследовательской установкой по активному волновому воздействию на околоземную плазму.

| | |
|--------------------------------------|----------------------|
| Наименование характеристики | «Сура» |
| Географические координаты | 56.15° N 46.11° E |
| Диапазон частот, МГц | 4.3-9.5 |
| Суммарная мощность передатчиков, кВт | 750 (3 × 250) |
| Эффективная излучаемая мощность, МВт | 80-280 |



Нагревный стенд «Сура»

Модернизация нагревного стенда «Сура»



Состав модуля:

- 8 широкополосных диполей из существующих сегодня + 2 новых на диапазон 2.6-3 МГц;
- два передатчика мощностью 25-30 кВт;
- система управления с обратной связью.

Перспективные параметры нагревного стенда «Сура»



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

| Стенды | СУРА | СУРА-М1 1-я очередь | СУРА-М2 2-я очередь | НААРР |
|--|--|---|-----------------------------|--|
| Диапазон частот, МГц | 4.3- 9.5 | д-А – 2.6-3; д-Б – 4.3- 9.5 | | 2.8 - 10 |
| Число излучателей (скрещенных диполей) | 144 | 36 (д-А) 144 (д-Б) | 48 (д-А) 192 (д-Б) | 168 |
| Суммарная мощность передатчиков, МВт | 0.75 | 1.8-2.16 | до 2.4 | 3.6 |
| Эффективная излучаемая мощность, МВт | 80-280 | 180 – 216 (д-А) 440 - 820 (д-Б) | 260 (д-А) 500-1000 (д-Б) | 400 - 3000 |
| Сканирование лучом | ±40° Механическое, в плоскости С-Ю | 30° от зенита все азимуты Электронное | | 30° от зенита все азимуты Электронное |
| Время переключения | 20 мин | 15 мкс | | 15 мкс |
| Модуляция | CW/AM/ импульсная | CW/AM/FM/импульсная/ пространственная | | CW/AM/FM/ импульсная/ пространственная |

Ионосферная модель SAMI2



Sami2 is Another Model of the Ionosphere (SAMI2) - двухмерная ионосферная модель, обладающая открытым исходным программным кодом и позволяющая описывать динамику околоземной плазмы в области всей возмущенной геомагнитной силовой трубки. Ионосферная модель SAMI2 описывает динамику плазмы и химические реакции для семи основных сортов ионов (H^+ , He^+ , N^+ , O^+ , N_2^+ , NO^+ и O_2^+) в высотном интервале от 85 км до нескольких тысяч километров.

Динамика заряженных компонент плазмы описывается уравнением непрерывности для ионов, уравнениями движения и теплопроводности для ионов и электронов, дополненных условием квазинейтральности:

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \nabla(N_i \vec{V}_i) = q_i - l_i,$$

$$0 = \nabla(N_e T_e) - eN_e (\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{V}_e \times \vec{B}]),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t} + (\vec{V}_i \nabla) \vec{V}_i = & -\frac{1}{N_i M_i} \nabla(N_i T_i) + \frac{e}{M_i} (\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{V}_i \times \vec{B}]) + \vec{g} - \\ & -v_{in} (\vec{V}_i - \vec{V}_n) - \sum_{j \neq i} v_{ij} (\vec{V}_i - \vec{V}_j), \end{aligned}$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} - \frac{2}{3N_e} \nabla(\hat{k}_e \nabla T_e) = Q_{en} + Q_{ei} + Q_{phe},$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + (\vec{V}_i \nabla) T_i + \frac{2}{3} T_i \nabla \vec{V}_i - \frac{2}{3N_i} \nabla(\hat{k}_i \nabla T_i) = Q_{in} + Q_{ii} + Q_{ie},$$

$$N_e = \sum_i N_i.$$

Модель источника нагрева



Воздействие мощного КВ радиоизлучения на околоземную плазму можно учесть с помощью включения **дополнительного источника нагрева** в уравнение теплопроводности для электронов:

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} - \frac{2}{3N_e} \nabla(\hat{k}_e \nabla T_e) = Q_{en} + Q_{ei} + Q_{phe} + \boxed{Q_{heat}}. \quad (1)$$

Ранее в работах [R.P.Perrine, G.M.Milikh, K.Papadopoulos et al. // Radio Sci.2006.Vol.41,№4.P.RS4002 1-13; G.M.Milikh, A.G.Demekhov, K.Papadopoulos et al. // Geophys. Res. Lett.2010.Vol.37,№7.P.L07803 1-5] в качестве источника нагрева ионосферы при воздействии мощного КВ радиоизлучения рассматривалась упрощенная модель «hot brick»:

$$Q_{heat} = q \exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{\Delta z^2}\right) \exp\left(-\frac{(r-r_0)^2}{\Delta r^2}\right), \quad q = \frac{\mu P_0}{N_e V}. \quad (2)$$

Для исключения подбора параметров моделирования и представления действующего механизма аномального поглощения волны накачки создана **уточненная модель источника нагрева**:

$$Q_{heat_cor} = \frac{\kappa_a(N_e)}{N_e \Delta z} S_t. \quad (3)$$

$$\kappa_a = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega_{He}}} \frac{(\delta N)^2}{N_{UHR}^2} \left(1 - \frac{\omega_{He}}{\omega_0}\right)^2 \frac{\delta_1}{\Delta^2} \exp\left(-\frac{\delta_1}{\Delta}\right), \quad (4)$$

$$\delta_1 = \frac{1}{8} \left(\frac{r_0 \omega_{He}}{c}\right)^2 \left(1 + \frac{\omega_{He}}{\omega_0}\right), \quad \overline{(\delta N)^2} = (\delta N_m)^2 \left(\frac{a}{r_0} \sqrt{\frac{\pi}{2}}\right), \quad \Delta = \frac{N_e - N_{UHR}}{N_{UHR}}.$$

$$S_t(z) = S_0 \exp\left(-2 \frac{\omega_0}{c} \int_z^{z_{UHR}} \kappa_a(z) dz\right), \quad (5)$$

$$S_0 = \frac{P_0}{4\pi(z_{UHR} \tan(\Delta\theta))^2} \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(\theta - \theta_0 - (\Delta\theta((i-1) - (n-1)/2)))^2}{(2\Delta\theta/(n+1))^2}\right).$$

Расчетные параметры



Для проведения численного моделирования выбран характерный день - 13 марта 2023 года, характеризуемый очень низким значением суммарного планетарного индекса геомагнитной возмущенности. При этом отдельно рассмотрены эффекты воздействия в дневных условиях (09:00 UT соответствует 12:00 LT) и условиях, соответствующих поздним вечерним часам (18:00 UT, 21:00 LT).

Для сеанса 13.03.2023 г. 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 $0.025N_{UHR}$, характерным масштабом $a=0.2$ м и значении 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.

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

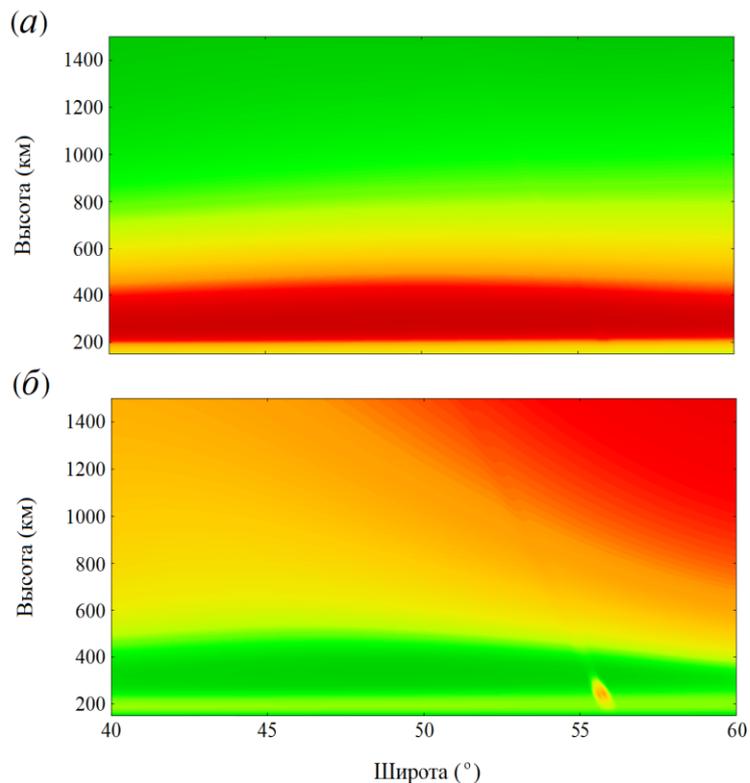
Численное моделирование запускалось на 26 часов. Для уменьшения влияния инициализации, дополнительный источник нагрева в уравнении теплопроводности для электронов «включался» через 22 часа по отношению к началу моделирования.

Результаты моделирования крупномасштабных возмущений околоземной плазмы в дневных условиях

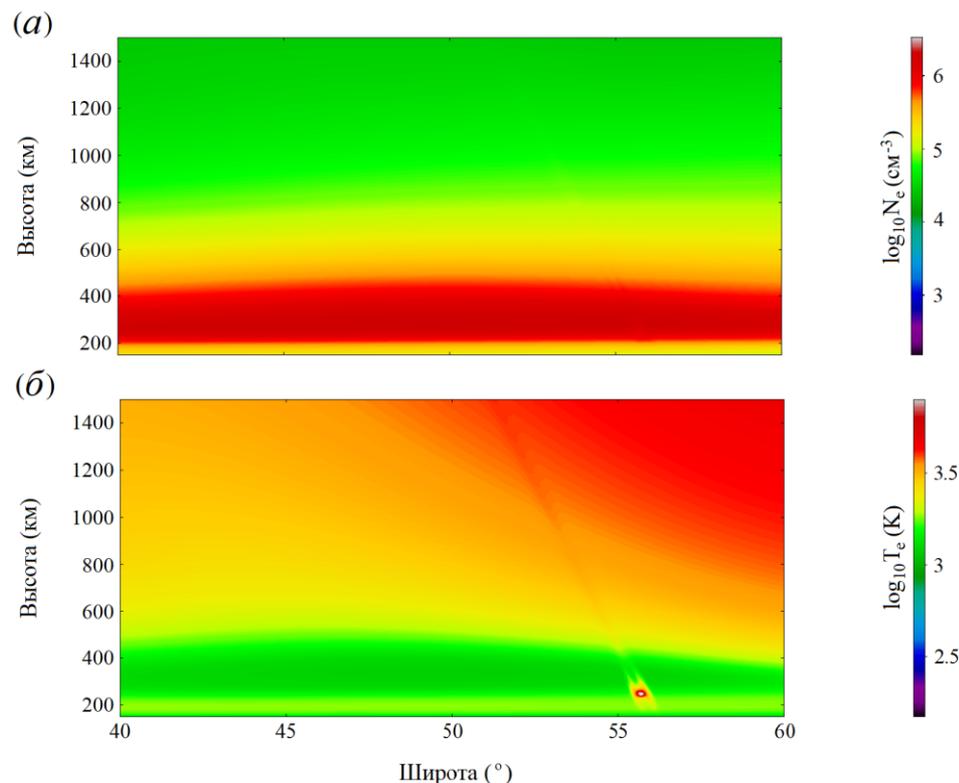


РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Высотно-широтные распределения плотности N_e и температуры T_e электронов, полученные при моделировании для момента выключения источника нагрева.



Высотно-широтные распределения плотности (панель (a)) и температуры электронов (панель (б)) для момента времени 09:20:00 UT и действующих параметрах стенда «Сура»



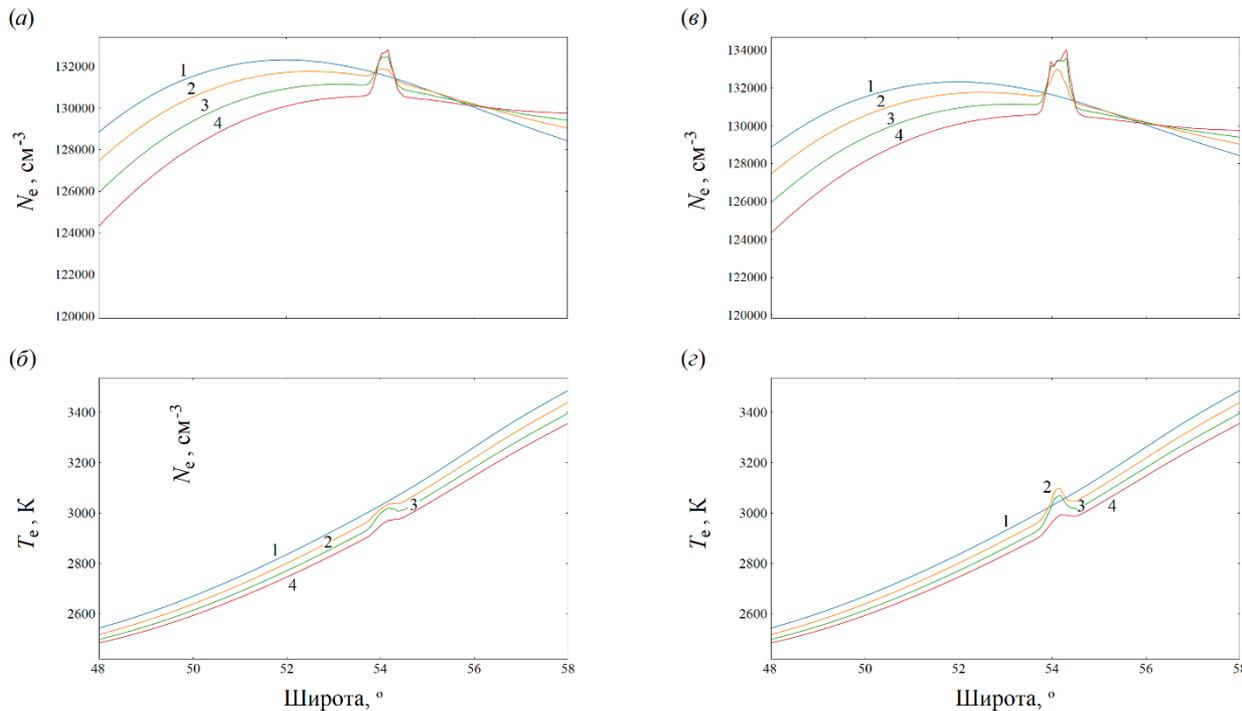
Высотно-широтные распределения плотности (панель (a)) и температуры электронов (панель (б)) для момента времени 09:20:00 UT и параметров после модернизации стенда «Сура»

Широтные профили и динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Широтные профили и динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы во внешней ионосфере Земли на высоте 700 км. На левом столбце (панели (а) и (б)) представлены результаты моделирования для действующих параметров нагрева, а на правом столбце (панели (в) и (г)) – для параметров после проведения модернизации стенда.



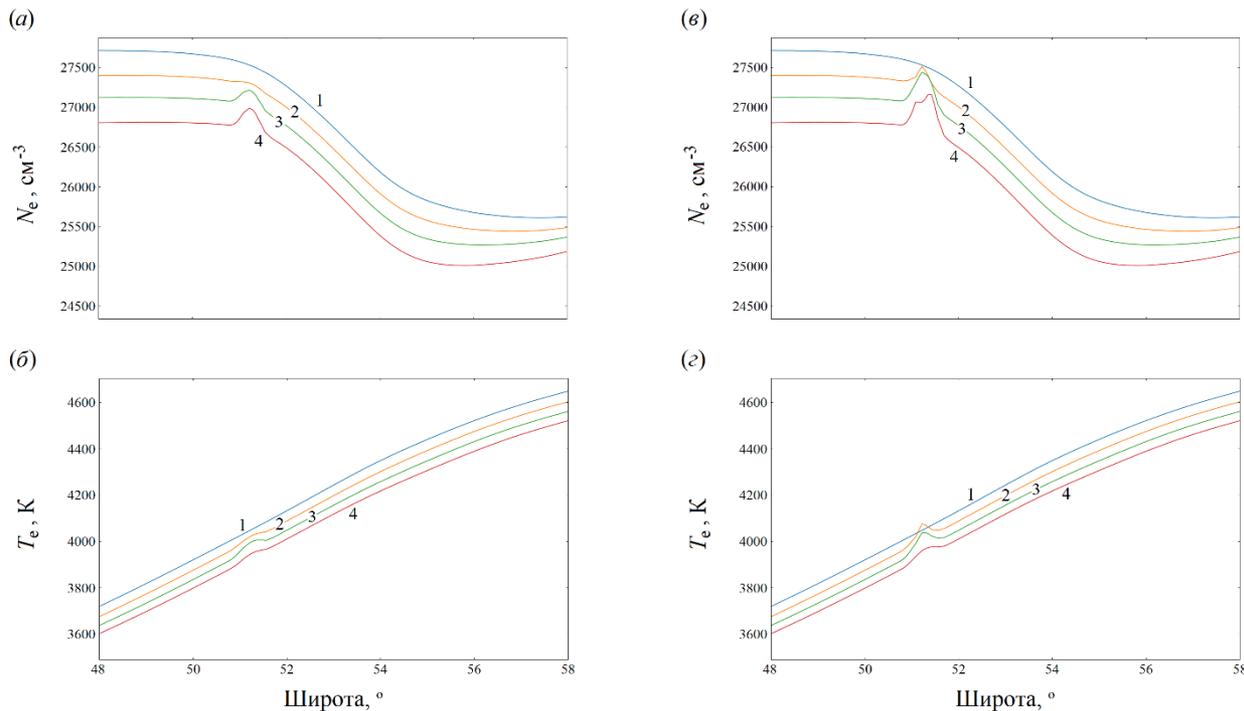
Широтные профили распределений плотности (панели (а) и (в)) и температуры электронов (панели (б) и (г)) для следующих моментов времени: 09:00:00 UT (1), 09:10:00 UT (2), 09:20:00 UT (3) и 09:30:00 UT (4)

Широтные профили и динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Широтные профили и динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы во внешней ионосфере Земли на высоте 1500 км.



Широтные профили распределений плотности (панели (а) и (в)) и температуры электронов (панели (б) и (г)) 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)

Анализ развития возмущений вдоль силовой трубки геомагнитного поля для дневных условий



В соответствии с представленными данными видно, что уровень возмущений как для действующих параметров стенда, так и после проведения модернизации является достаточно малым.

Максимальные значения за время нагрева относительных возмущений плотности и температуры электронов для высоты 700 км составляют для действующих параметров стенда: $\delta N_e \sim 1.2\%$, а $\delta T_e \sim 1.7\%$. Характерный поперечный размер дакта плотности плазмы на высоте 700 км составляет 70 км.

Для перспективных параметров стенда: $\delta N_e \sim 2.3\%$, а $\delta T_e \sim 3\%$.

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

Для высоты 1500 км значения максимальных относительных возмущений плотности и температуры электронов составляют: $\delta N_e \sim 0.6\%$ и $\delta T_e \sim 0.6\%$, а после проведения модернизации: $\delta N_e \sim 1.5\%$ и $\delta T_e \sim 1.8\%$. Характерный поперечный размер дакта несколько увеличивается, достигая на высоте 1500 км величины 80-90 км.

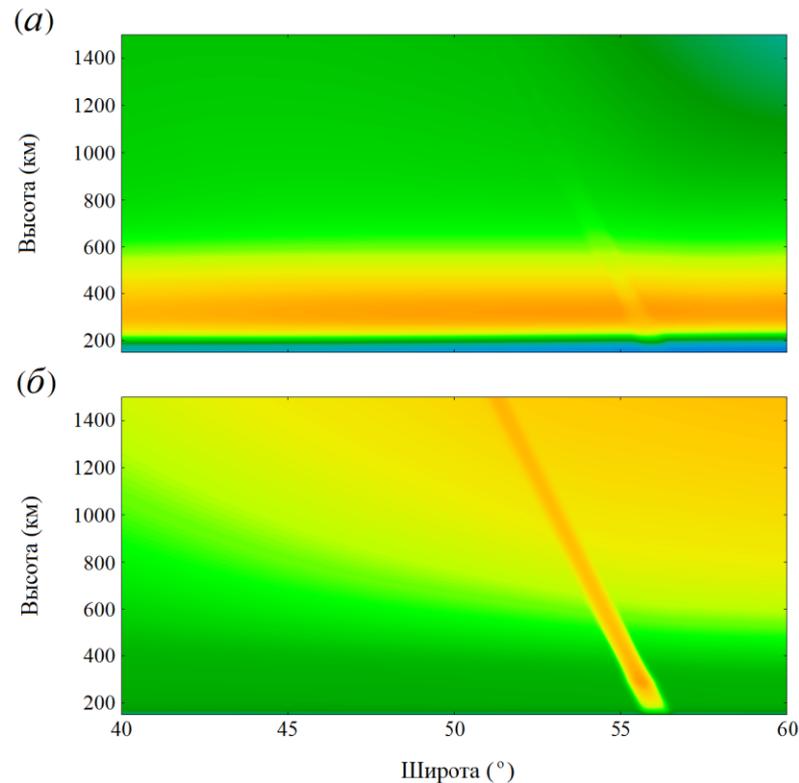
Приведенные результаты моделирования показывают, что возмущения температуры успевают релаксировать после прекращения нагрева за время порядка 10 минут, в свою очередь с возмущениями плотности электронов этого не происходит (время релаксации возмущений составляет более 30 мин).

Результаты моделирования крупномасштабных возмущений околоземной плазмы в ночных условиях

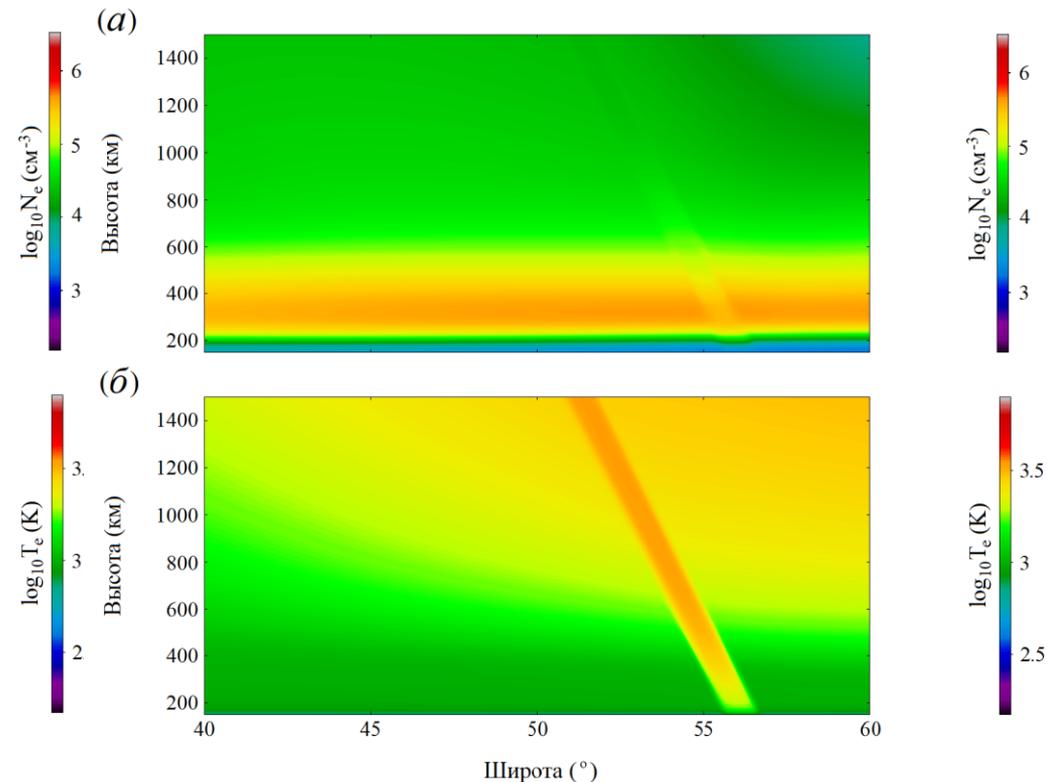


РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Высотно-широтные распределения плотности N_e и температуры T_e электронов, полученные при моделировании для момента выключения источника нагрева.



Высотно-широтные распределения плотности (панель (а)) и температуры электронов (панель (б)) для момента времени 18:20:00 UT и действующих параметрах стенда «Сура»

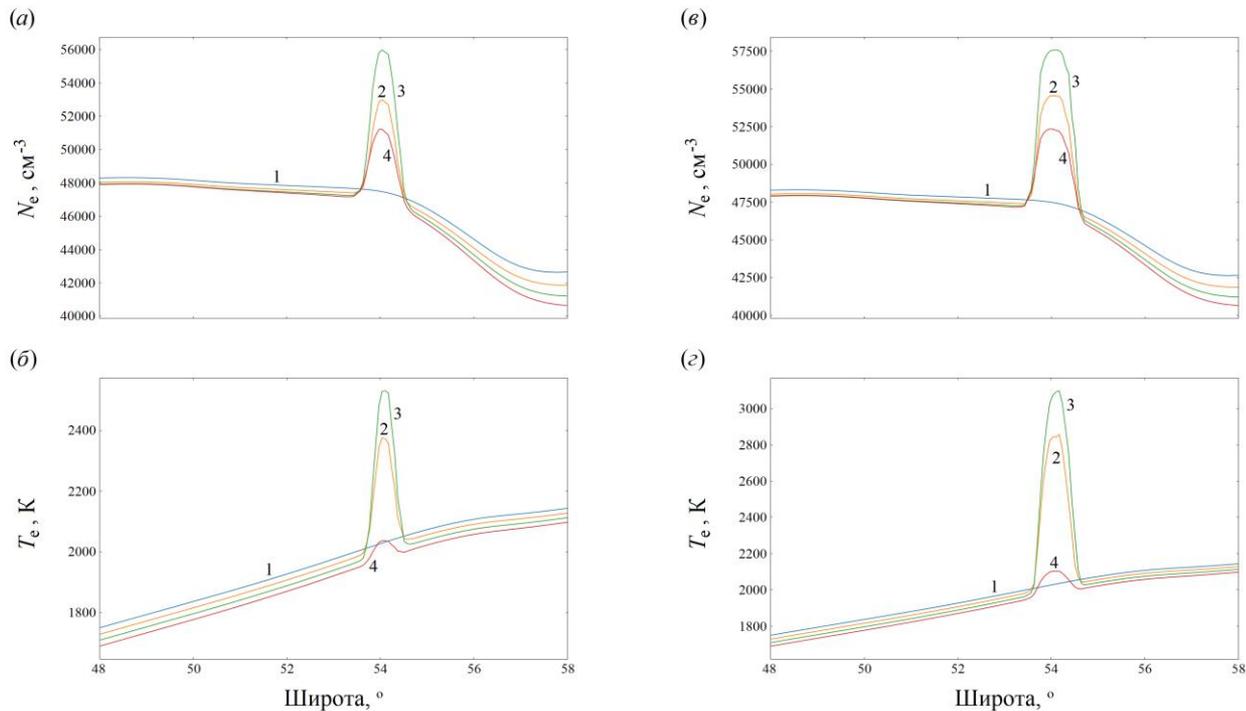


Высотно-широтные распределения плотности (панель (а)) и температуры электронов (панель (б)) для момента времени 18:20:00 UT и параметров после модернизации стенда «Сура»

Широтные профили и динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы



Широтные профили и динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы во внешней ионосфере Земли на высоте 700 км. На левом столбце (панели (а) и (б)) представлены результаты моделирования для действующих параметров нагрева, а на правом столбце (панели (в) и (г)) – для параметров после проведения модернизации стенда.



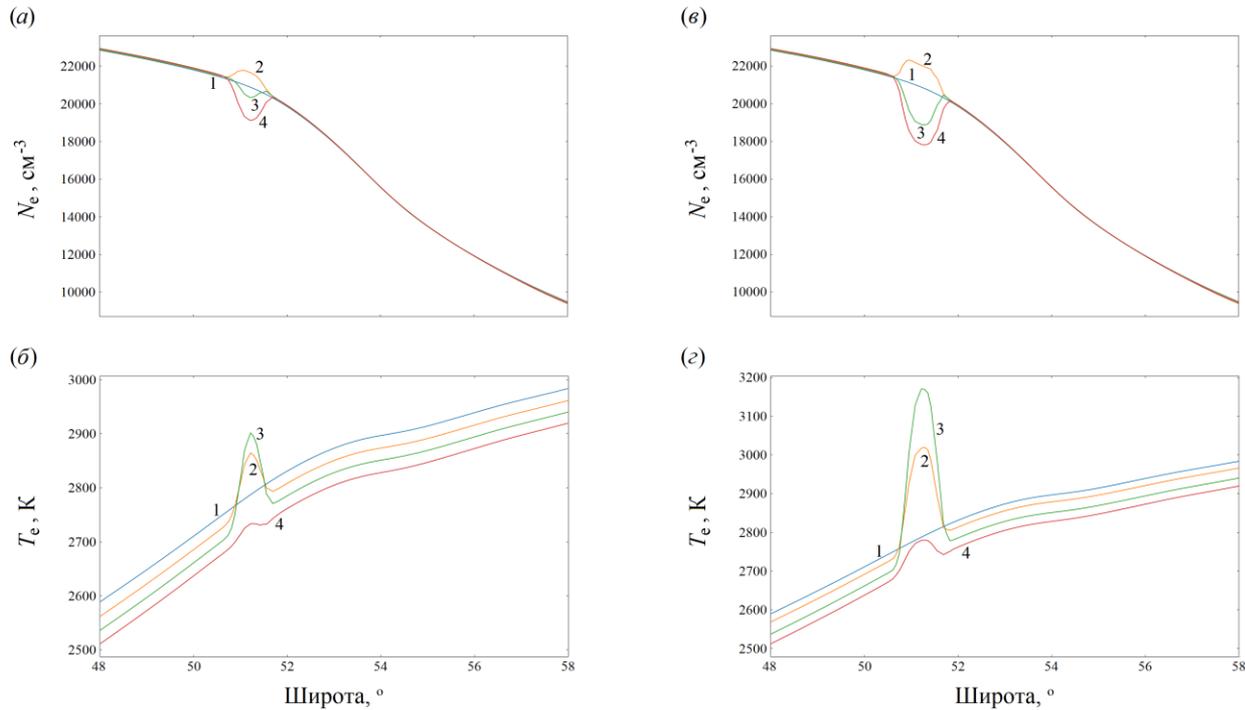
Широтные профили распределений плотности (панели (а) и (в)) и температуры электронов (панели (б) и (г)) для следующих моментов времени: 18:00:00 UT (1), 18:10:00 UT (2), 18:20:00 UT (3) и 18:30:00 UT (4)

Широтные профили и динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

Широтные профили и динамика формирования искусственных крупномасштабных возмущений плазмы во внешней ионосфере Земли на высоте 1500 км.



Широтные профили распределений плотности (панели (а) и (в)) и температуры электронов (панели (б) и (г)) 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)

Анализ развития возмущений вдоль силовой трубки геомагнитного поля для ночных условий



Для высоты 700 км возмущения плотности и температуры электронов наблюдаются в течение всего времени нагрева в виде дакта с повышенными относительно фонового уровня значениями N_e и T_e . Максимальные значения за время нагрева относительных возмущений плотности и температуры электронов для данной высоты составляют для действующих параметров стенда: $\delta N_e \sim 19\%$, а $\delta T_e \sim 27\%$. Характерный поперечный размер дакта плотности плазмы на высоте 700 км также возрос по сравнению с дневными часами и составляет 130 км.

Для перспективных параметров стенда: $\delta N_e \sim 23\%$, а $\delta T_e \sim 55\%$, а ширина дакта 140 км.

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.

На высоте 1500 км в первой фазе нагрева (длительностью порядка 10 минут) возмущения плотности наблюдаются в виде дакта с повышенными относительно фонового уровня значениями. Максимальные значения относительных возмущений плотности и температуры электронов составляют для действующих параметров стенда: 3% и 4%, а после проведения модернизации: 5% и 9%, соответственно.

Далее, вероятно, из-за того, что на данных высотах основной вклад в плотность плазмы вносят ионы H^+ и He^+ , то вытеснение их приводит к формированию на данных высотах области с пониженной плотностью плазмы. К моменту окончания нагрева для 18:20:00 UT величина относительного уровня понижения плотности электронов составляет для действующих параметров стенда -4%, а после проведения модернизации -11%. При этом в возмущенной области наблюдается рост температуры электронов, достигающий 6% для действующих и 15% для перспективных параметров нагревного стенда «Сура».

Заключение



По результатам численного моделирования исследованы параметры крупномасштабных тепловых возмущений околоземной плазмы, индуцируемых мощным коротковолновым радиоизлучением нагревного стенда «Сура» в околоземной плазме при проведении его модернизации и реализации перспективных уровней мощности. С целью проведения сравнительного анализа моделирование выполнено также и для действующих характеристик стенда.

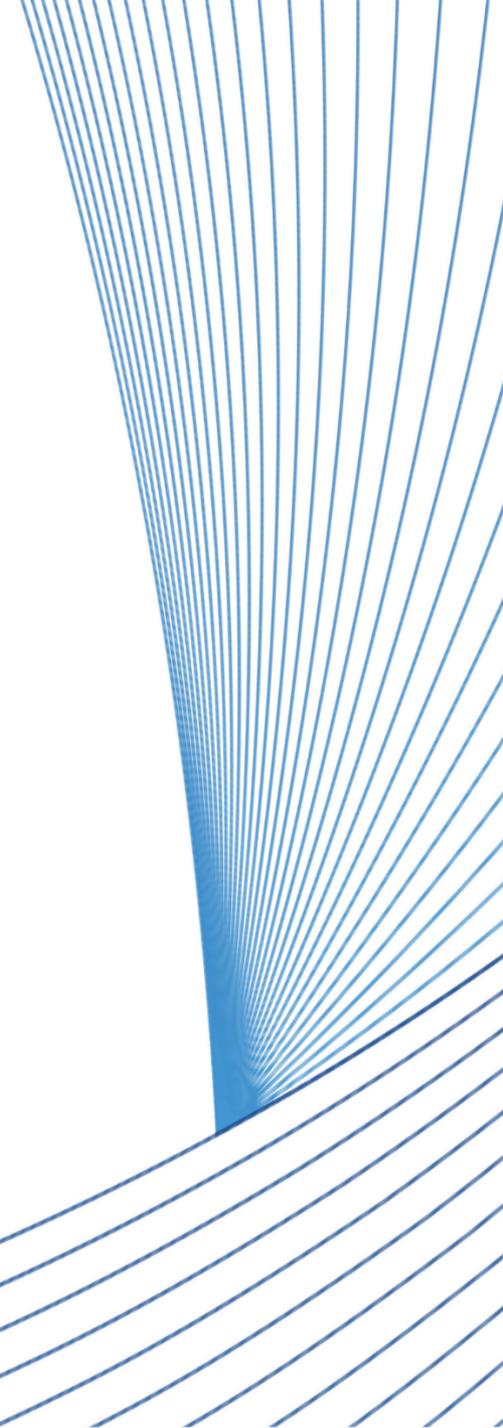
Численное моделирование тепловых возмущений проводилось с помощью двухмерной ионосферной модели SAMI2, дополненной уточненной моделью источника нагрева.

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 спутниковых *in situ* измерений.

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.

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

A decorative graphic on the right side of the page consisting of numerous thin, parallel blue lines that fan out from a point near the bottom right towards the top right, creating a sense of depth and movement.

Белов Алексей Сергеевич

Заместитель начальника научно-исследовательского отделения –
начальник научно-исследовательского отдела

Тел: 8 (831) 469-52-20

E-mail: ABelov@niiis.nnov.ru

www.niiis.nnov.ru