

УДК 551.510:621.371:550.388

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ НА ЗОНЫ ДОСТУПНОСТИ ОДНОСКАЧКОВОЙ СВЯЗИ КОРОТКОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

© 2022 г. Я. А. Сахаров<sup>1</sup>, И. В. Мингалев<sup>1</sup>\*, Б. В. Козелов<sup>1</sup>, А. М. Мёрзлый<sup>2,3</sup>, З. В. Суворова<sup>1</sup>,  
С. М. Черняков<sup>1</sup>, В. Н. Шубин<sup>6</sup>, А. Б. Талалаев<sup>4</sup>, В. В. Тихонов<sup>5</sup>,  
М. В. Тихонов<sup>5</sup>, А. Т. Янаков<sup>2</sup>, А. С. Калишин<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Совет по космосу Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>4</sup>Акционерное общество “Концерн “Радиотехнические и информационные системы”, Москва, Россия

<sup>5</sup>Акционерное общество “Научно-производственное предприятие “Эргоцентр”, Тверь, Россия

<sup>6</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>7</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение  
“Арктический и антарктический научно-исследовательский институт”, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: mingalev\_i@pgia.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Представлены результаты численного моделирования областей на поверхности Земли в районе Баренцева моря, в которые попадают односкачковые лучевые траектории радиоволн КВ-диапазона, выходящие из расположенного на средних широтах передатчика в условиях суббури 24.12.2014 г. Параметры ионосферы задаются по эмпирической модели GDM1 с поправкой, построенной по данным о полярных сияниях и полному электронному содержанию, которое было измерено по сигналам от спутников GPS, пролетавших над областью наблюдения этих сияний. Анализируются изменения возможностей односкачковой КВ радиосвязи между районом Баренцева моря и районами, расположенными на средних широтах, во время авроральных высыпаний и во время спокойных условий.

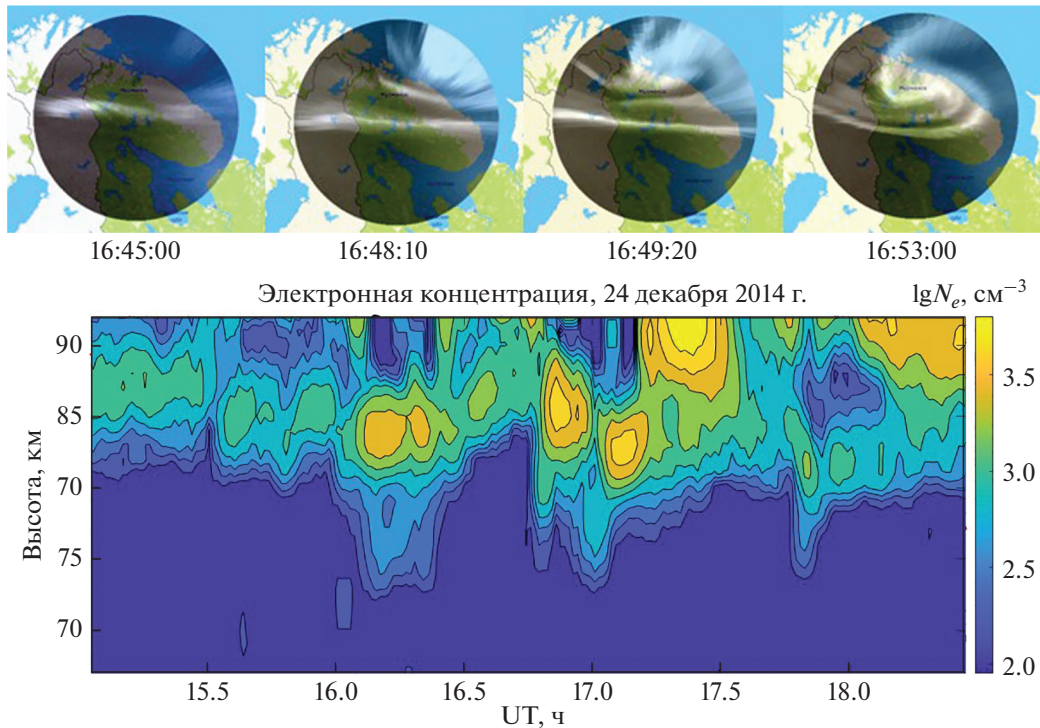
DOI: 10.31857/S0367676522030218

### ВВЕДЕНИЕ

Во время магнитных бурь и суббурь происходят высыпания из магнитосферы в высокоширотную ионосферу протонов и электронов с энергией от 0.1 до 100 кэВ, которые существенно увеличивают скорость ионизации атмосферы. При этом плотность потока высыпающихся частиц и их энергетический спектр меняются в широких пределах. Частицы с энергией от 0.1 до 0.5 кэВ ионизируют в основном *F*-слой ионосферы, с энергией от 0.5 до 20 кэВ ионизируют в основном *E*-слой, а с энергией более 20 кэВ ионизируют в основном *D*-слой. Регулярно происходят события, когда в области высыпаний за несколько минут концентрация электронов в *F*-слое может увеличиться в 2–4 раза, а в *E*-слое в 10 раз или более [1]. На границах областей высыпаний горизонтальные компоненты градиента концентрации

электронов становятся сравнимы с вертикальной компонентой этого градиента и существенно меняют условия распространения радиоволн КВ диапазона между областями на средних и высоких широтах.

В данной работе с помощью численного моделирования исследуется изменение областей на поверхности Земли в районе Баренцева моря, в которые попадают односкачковые лучевые траектории радиоволн КВ-диапазона, выходящие из передатчиков, расположенных в г. Саранск и в г. Санкт-Петербург, во время авроральных высыпаний по сравнению со спокойными условиями. Для исследования воздействия высыпаний на распространение радиоволн КВ-диапазона нами выбрана суббуря 24 декабря 2014 г. в интервале времени 16:00–17:00 UT. Подробно динамика развития возмущения представлена в работе [2].



**Рис. 1.** Вверху цепочка кадров полярных сияний камеры системы MAIN, Апатиты. Внизу данные радара частичных отражений, полигон Туманный (69.0 с. ш., 35.7 в. д.).

Уровень возмущения в период суббури был средним, индексы  $Kp = 3$  и  $Ap = 18$ . Характер возмущения – формирование движущегося на Запад изгиба полосы полярных сияний с рядом интенсификаций над Кольским полуостровом после 16:45 UT.

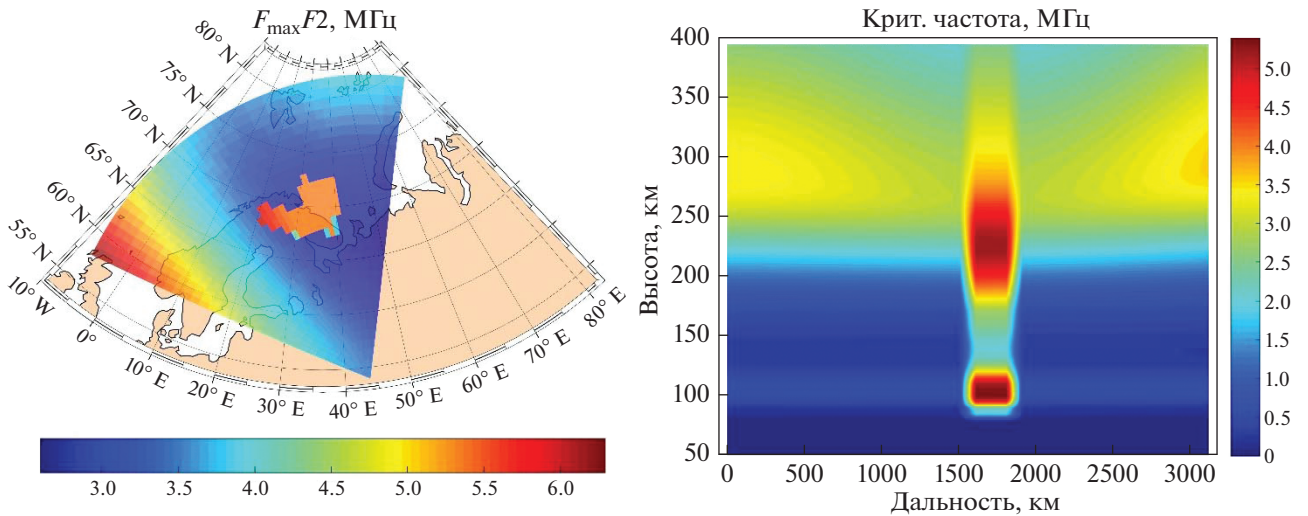
Для оценки изменения состояния ионосферы используются ионозонд вертикального зондирования (Ловозеро), радар частичных отражений (Туманный), камера всего неба системы MAIN (Апатиты), а также 144-канальный приемник GPS/ГЛОНАСС/Galileo NET-G3A с антенной G3-A1 w/Ground Plane в г. Мурманске (68.9725 с. ш., 33.0969 в. д.). В период 16:30–17:10 UT во время высыпаний полное электронное содержание (ПЭС) вдоль линии зрения спутник R11-приемник был в 1.5–2 раза больше, чем в период 15:30–16:10 UT.

На верхней части рис. 1 видно, что область высыпаний достаточно быстро изменялась и меняла форму. В момент 16:45 UT эта область была вытянутой с запада на восток узкой полосой и имела поперечный размер от 20 до 50 км. В момент 16:53 UT в эту область вместо одной узкой полосы входили три близко расположенных полосы, которые изгибались на 180 град. над северо-восточной частью Кольского полуострова и переходили в пятно с центром в районе Мурманска и поперечными размерами от 100 до 150 км. На нижней части рис. 1 видно, что в период 16:10–17:35 UT над по-

лигоном Туманный имели место достаточно мощные высыпания частиц, вызвавшие на высотах 83–92 км повышение концентрации электронов в 5–20 раз по сравнению с периодом 15:00–16:00 UT. По данным ионозонда вертикального зондирования в пос. Ловозеро, 24 декабря 2014 г. в 16:00 UT критическая частота плазмы на высоте максимума  $E$ -слоя (около 110 км) равнялась 3.2 МГц, а на высоте максимума  $F$ -слоя (около 280 км) – 3.7 МГц. В этот же день в момент 17:00 UT эта частота на высоте максимума  $E$ -слоя (около 110 км) составила 7.3 МГц, а выше этого максимума критическая частота плазмы была ниже, чем в максимуме, и определить ее ионозонд не мог.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для спокойных условий распределения концентрации электронов и частоты их столкновений рассчитывались на регулярной сетке в сферической системе координат с помощью модели GDMI [3]. Для возмущенных условий задавалась область высыпаний, показанная на рис. 2 слева. Вне области высыпаний концентрации электронов и частоты их столкновений рассчитывались с помощью модели GDMI так же, как и в спокойных условиях. В области высыпаний было задано специальное распределение концентрации элект-



**Рис. 2.** Слева распределение критической частоты плазмы в МГц на высоте максимума  $F_2$ -слоя, рассчитанная с использованием эмпирической модели ионосферы GDMI с учетом высыпаний в момент 24.12.2014 г. UT 16:50, а справа распределение этой же частоты в этот же момент вдоль меридиана, проходящего через Саранск, дальность отсчитывается от Саранска на Север.

тронов, в котором критическая частота плазмы на высоте максимума  $E$ -слоя достигала 6 МГц, а на высоте максимума  $F$ -слоя достигала 5.5 МГц. Это распределение показано на рис. 2 справа.

**МЕТОД РАСЧЕТА ЛУЧЕВЫХ ТРАЕКТОРИЙ КВ-РАДИОВОЛН**

Для численного моделирования распространения КВ-радиоволн используется приближение геометрической оптики [4] с учетом анизотропии ионосферной плазмы, обусловленной геомагнитным полем. Лучевые траектории находятся путем численного решения системы уравнений эйконала:

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = \vec{p} - \frac{1}{2} \nabla_{\vec{p}} (n_b^2), \quad \frac{d\vec{p}}{d\tau} = \frac{1}{2} \nabla_{\vec{r}} (n_b^2), \quad (1)$$

в которых  $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведенный из начала координат в точку наблюдения,  $\vec{p}$  – вектор волновой нормали,  $\tau$  – приведенная длина луча,  $n_b^2$  – квадрат вещественной части показателя преломления нормальной волны. Этот показатель определяется как решение дисперсионного биквадратного уравнения

$$An^4 + Bn^2 + C = 0, \quad (2)$$

в котором использованы обозначения:  $A = \epsilon_{\perp} (1 - \cos^2 \theta) + \epsilon_{\parallel} \cos^2 \theta$ ,  $B = -\epsilon_{\perp} \epsilon_{\parallel} (1 + \cos^2 \theta) - (\epsilon_{\perp}^2 - g^2) (1 - \cos^2 \theta)$ ,  $C = \epsilon_{\parallel} (\epsilon_{\perp}^2 - g^2)$ , где  $\theta$  – угол между векторами  $\vec{p}$  и  $\vec{b} = \vec{B}_{\text{внеш}} / |\vec{B}_{\text{внеш}}|$ ;  $\vec{B}_{\text{внеш}}$  –

внешнее магнитное поле;  $\epsilon_{\perp} = 1 - \frac{\omega_p^2 (\omega - i\nu_e)}{[(\omega - i\nu_e)^2 - \omega_H^2] \omega}$ ,  $g = \frac{\omega_p^2 \omega_H}{[(\omega - i\nu_e)^2 - \omega_H^2] \omega}$ ,  $\epsilon_{\parallel} = 1 - \frac{\omega_p^2}{(\omega - i\nu_e) \omega}$  – компоненты тензора комплексной диэлектрической проницаемости плазмы осью  $z$ , ориентированной вдоль магнитного поля  $\vec{B}_{\text{внеш}}$ ;  $\omega_p^2 = e^2 N_e / m_e \epsilon_0$  – квадрат плазменной частоты;  $e$  и  $m_e$  – заряд и масса электрона;  $N_e$  – концентрация электронов в плазме;  $\omega_H = e B_{\text{внеш}} / m_e$  – гирочастота электронов;  $\nu_e = \nu_{e,O} + \nu_{e,O_2} + \nu_{e,N_2} + \nu_{e,i}$  – эффективная частота соударений электронов с другими частицами, которая рассчитывалась как сумма частот соударений электронов с нейтральными атомами кислорода  $\nu_{e,O}$ , молекулами кислорода  $\nu_{e,O_2}$  и азота  $\nu_{e,N_2}$  и с ионами  $\nu_{e,i}$ . Перечисленные частоты соударений рассчитывались в системе СГС по формулам [5]

$$\begin{aligned} \nu_{e,O} &= 8.2 \cdot 10^{-10} N_O T_e^{1/2}, \\ \nu_{e,O_2} &= 1.8 \cdot 10^{-10} N_{O_2} (1 + 3.6 \cdot 10^{-2} T_e^{1/2}) T_e^{1/2}, \\ \nu_{e,N_2} &= 2.33 \cdot 10^{-11} N_{N_2} \times (1 - 1.2 \cdot 10^{-4} T_e), \\ \nu_{e,i} &= \frac{16\sqrt{2}\pi e^4 N_e}{m_e^{1/2} (kT_e)^{3/2}}, \end{aligned}$$

в которых температура электронов  $T_e$  (в К) и их концентрация  $N_e$  рассчитывались по модели GDMI, а концентрации нейтральных частиц  $N_O$ ,  $N_{O_2}$  и  $N_{N_2}$  рассчитывались по эмпирической модели NRLMSISE-00.

Дисперсионное уравнение (2) определяет два решения для двух волновых мод — обыкновенной и необыкновенной волн, которые распространяются с различными показателями преломления, фазовыми и групповыми скоростями, причем обыкновенная волна имеет левую поляризацию, а необыкновенная волна — правую. Решение уравнения (2) можно представить в виде  $n = \sqrt{(-B \pm D)/(2A)}$ , где  $D = (B^2 - 4AC)^{1/2}$ .

Для численного интегрирования системы уравнений эйконала используется схема Рунге—Кутты 4-го порядка точности с коррекцией гамильтониана на каждом шаге траектории. Особенностью используемой нами схемы является расчет точек лучевой траектории и компонент градиента квадрата вещественной части показателя преломления нормальной волны в этих точках в декартовых координатах, при этом параметры среды задаются на сетке в сферической системе координат, как описано в работах [6, 7].

Плотность потока энергии поля волны передатчика в точке падения лучевой траектории на поверхность рассчитывалась следующим образом. Ослабление плотности потока энергии сигнала за счет поглощения описывается множителем [4]

$$\exp \left[ -\frac{\omega}{c_0} \int_0^{\tau} \operatorname{Re} \left( n^2(r(\tau)) \right) d\tau \right], \quad (3)$$

в котором интеграл от вещественной части квадрата показателя преломления вычисляется вдоль лучевой траектории. Для расчета ослабления плотности потока энергии сигнала за счет геометрического расхождения траекторий рассчитывались две дополнительные лучевых траектории для той же частоты сигнала, что и для исходной траектории. При этом у первой дополнительной траектории угол места на выходе из передатчика был на 0.1 град меньше, чем у исходной траектории, а азимутальный угол не менялся. У второй дополнительной траектории азимутальный угол на выходе из передатчика был на 0.1 град больше, чем у исходной траектории, а угол места не менялся. На единичной сфере с центром в передатчике строится треугольник с вершинами в точках пересечения этих трех траекторий с этой сферой. Его площадь равна сферическому углу между этими траекториями. Умножая этот сферический угол на мощность передатчика, на коэффициент усиления антенны и на значение ее диаграммы направленности для исходной траектории получим поток энергии в сферический угол между тремя траекто-

риями. В точке падения исходной траектории на поверхность проводим плоскость, ортогональную этой траектории, и строим треугольник с вершинами в точках пересечения этих трех траекторий с этой плоскостью. Разделив поток энергии в сферический угол между тремя траекториями на площадь последнего треугольника и умножив его на множитель (3), получим плотность потока энергии поля волны передатчика в точке падения лучевой траектории на поверхность.

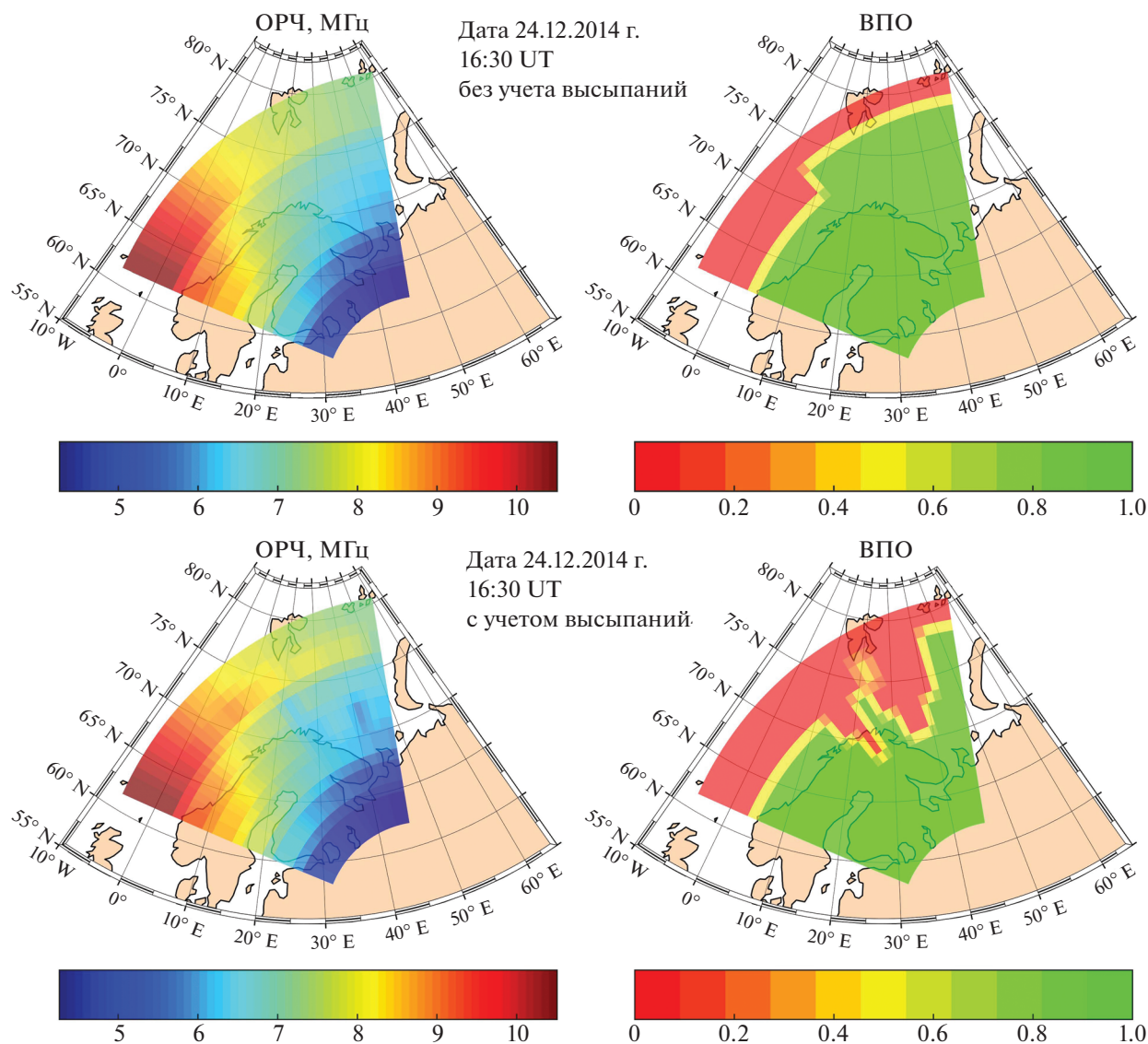
## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Были выполнены следующие расчеты для двух модельных передатчиков, расположенных в Саранске и в Санкт-Петербурге. В секторах на поверхности Земли, отмеченных цветом на рис. 3 и 4, строилась сетка точек в координатах азимутальность с постоянными шагами в 0.5 град. Для каждого узла этой сетки осуществлялся перебор частот в диапазоне 4–30 МГц с шагом 50 кГц. Для каждой частоты и каждого узла сетки на поверхности методом пристрелки рассчитывалась односкачковая лучевая траектория, выходящая из передатчика и попадающая в этот узел сетки, если такая траектория была возможна. Для этой траектории рассчитывались ослабление сигнала за счет поглощения и геометрического расхождения траекторий и время прохода сигнала.

Приемная и передающая антенны считались изотропными в верхней полусфере. Были выбраны модельные мощность импульса 100 Вт, ширина полосы приема 10 000 Гц и спектральная плотность радишума в точке приема  $10^{-19}$  Вт/(Гц · м<sup>2</sup> · ст). Для этих модельных параметров в каждом узле сетки рассчитывалось отношение мощностей сигнал/шум в приемнике. Через значение этого отношения рассчитывалась вероятность правильного обмена данными (ВПО) между передатчиком и приемником следующим образом. Если отношение сигнал/шум было менее 5 дБ, то ВПО считалась равным нулю, если это отношение было более 20 дБ, то ВПО считалась равным 1, а если это отношение лежит в пределах от 5 до 20 дБ, то ВПО линейно возрастает от 0 до 1 с увеличением этого отношения. Из перебранных частот выбиралась та, для которой отношение сигнал/шум наибольшее. Эта частота выбиралась как оптимальная рабочая частота (ОРЧ).

На рис. 2 видно, что зона высыпаний была расположена на расстояниях примерно 1600–1900 км от передатчика в Саранске в диапазоне азимутальных углов для этого передатчика примерно от –20 до –3 град и на расстояниях примерно 800–1100 км от передатчика в Санкт-Петербурге в диапазоне азимутальных углов для этого передатчика примерно от –30 до 6 град.



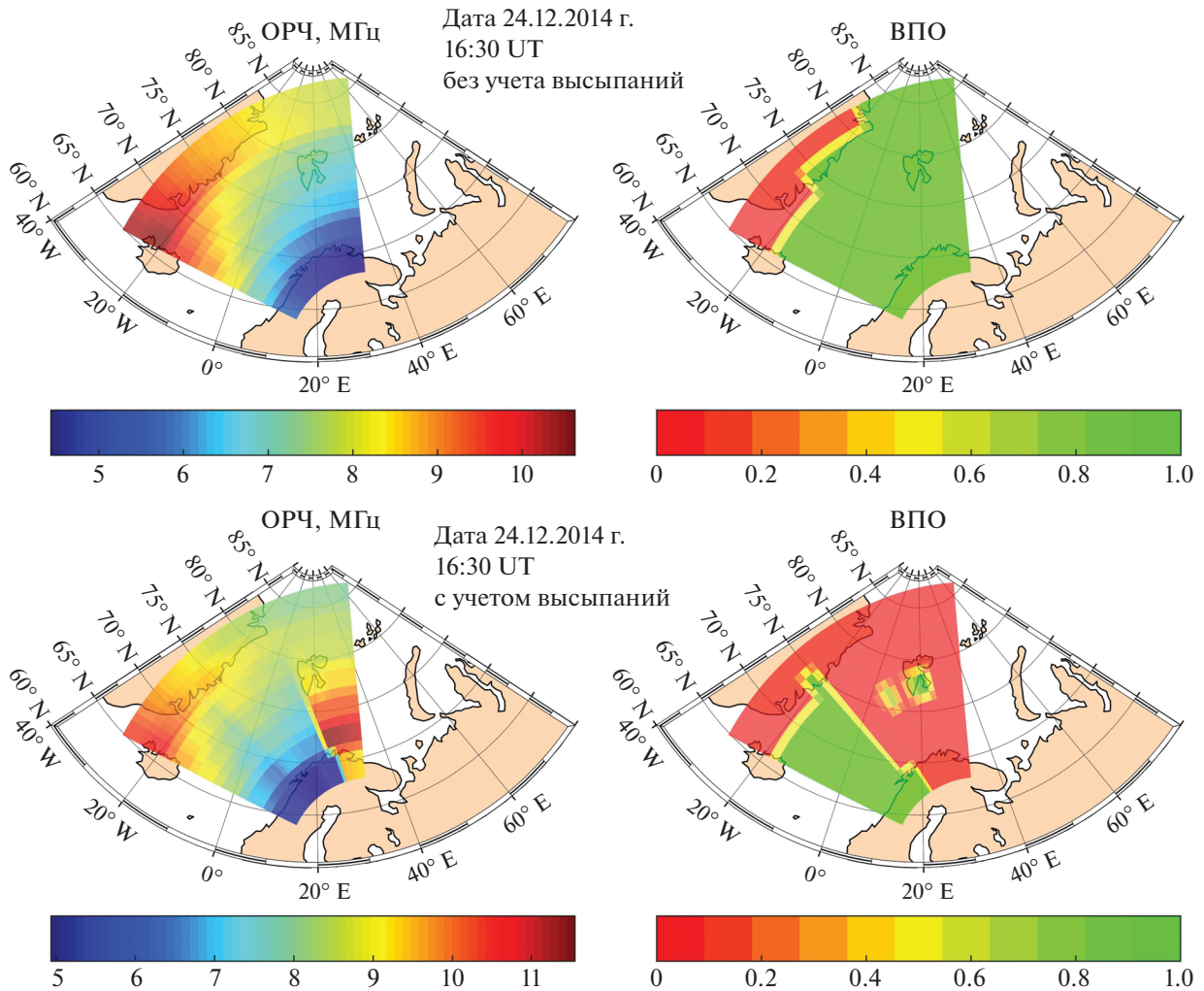


**Рис. 3.** Вверху слева ОРЧ, а справа вероятность правильного обмена данными между расположенным в Саранске передатчиком и расположенным в Северо-Западном секторе приемником, рассчитанные с использованием эмпирической модели ионосферы GDM1 без учета высыпаний в момент 24.12.2014 г. UT 16:30. Внизу те же параметры, рассчитанные с использованием эмпирической модели ионосферы GDM1 с учетом высыпаний в тот же момент.

На рис. 3 представлены результаты расчетов ОРЧ и ВПО для КВ-передатчика, расположенного в Саранске, а на рис. 4 – для такого же КВ-передатчика, расположенного в Санкт-Петербурге. На рис. 3 видно, что при отсутствии высыпаний возможна односкачковая радиосвязь между расположенным в Саранске КВ-передатчиком и приемниками в южной и центральной частях Баренцева моря, а при появлении зоны достаточно сильных высыпаний над Кольским полуостровом районы, расположенные более чем на 100 км севернее этой зоны, становятся недоступными для односкачковой радиосвязи во всем КВ-диапазоне из-за невыполнения условий траекторного по-

падения. Причиной этого является либо отражение идущих от передатчика лучевых траекторий от южной границы зоны высыпаний на высотах от 90 до 300 км, либо поворот этих траекторий вверх при переходе через эту границу из-за больших горизонтальных градиентов концентрации электронов на этой границе.

На рис. 4 видно, что для расположенного в Санкт-Петербурге КВ-передатчика имеет место аналогичная ситуация. В секторе азимутальных углов, перекрытом областью высыпаний от передатчика, односкачковая радиосвязь становится невозможной в районах, расположенных даль-



**Рис. 4.** Вверху слева ОРЧ, а справа вероятность правильного обмена данными между расположенным в Санкт-Петербурге передатчиком и расположенным в Северо-Западном секторе приемником, рассчитанные с использованием эмпирической модели ионосферы GDMI без учета высыпаний в момент 24.12.2014 г. UT 16:30. Внизу те же параметры, рассчитанные с использованием эмпирической модели ионосферы GDMI с учетом высыпаний в тот же момент.

ше от передатчика, чем область высыпаний в овале полярных сияний.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что если в районе овала полярных сияний появляется область высыпаний авроральных частиц, в которой критическая частота плазмы на высотах  $D$  и  $E$ -слоев увеличивается до значений более 4 МГц, то существенно изменяются условия радиосвязи между районом, расположенным к северу от области высыпаний, и районом на средних широтах, расположенным к югу от области высыпаний. В частности, становится невозможной однокачковая радиосвязь в КВ-диапазоне между передатчиком, расположенным на средних широтах, и приемниками, расположенными к северу от области высыпаний более

чем на 200–300 км в секторе азимутальных углов, перекрытом областью высыпаний от передатчика. Таким образом, появление во время магнитных бурь и суббурь области высыпаний авроральных частиц в районе овала полярных сияний может в течение нескольких минут нарушить радиосвязь в КВ-диапазоне между радиостанциями, расположенными на средних широтах, и воздушными и морскими судами, находящимися севернее области высыпаний в секторе азимутальных углов, перекрытом этой областью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. Физические процессы в полярной ионосфере. М.: Наука, 1988. 232 с.

2. *Despirak I.V., Kozelova T.V., Kozelov B.V., Lubchich A.A.* // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 206. Art. No. 105325.
3. *Шубин В.Н.* // Геомагн. и аэроном. 2017. Т. 57. № 4. С. 450.
4. *Кривоцов Ю.А., Орлов Ю.И.* Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
5. *Колесник А.Г.* Волны в околоземной плазме. Томск: "ТМЛ Пресс", 2007. 222 с.
6. *Суворова З.В., Мингалева И.В., Мингалева В.С.* // Тр. Кольск. НЦ РАН. 2019. Т. 10. № 8-5. С. 199.
7. *Мингалева И.В., Суворова З.В., Шубин В.Н. и др.* // Геомагн. и аэроном. 2021. Т. 61. № 4. С. 506.

## **The influence of geomagnetic disturbance on the availability zones of single-hop communication in the high-frequency band**

**Ya. A. Sakharov<sup>a</sup>, I. V. Mingalev<sup>a,\*</sup>, B. V. Kozelov<sup>a</sup>, A. M. Merzly<sup>b,c</sup>, Z. V. Suvorova<sup>a</sup>,  
S. M. Chernyakov<sup>a</sup>, V. N. Shubin<sup>f</sup>, A. B. Talalaev<sup>d</sup>, V. V. Tikhonov<sup>e</sup>, M. V. Tikhonov<sup>e</sup>,  
A. T. Yanakov<sup>b</sup>, A. S. Kalishin<sup>g</sup>**

<sup>a</sup> *Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

<sup>b</sup> *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>c</sup> *Space Council of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>d</sup> *RTI Joint Stock Company, Moscow, Russia*

<sup>e</sup> *Radio-Technical and Information Systems of Aerospace Defense Joint Stock Company, Tver, Russia*

<sup>f</sup> *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>g</sup> *Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia*

<sup>\*</sup>*e-mail: mingalev\_i@pgia.ru*

We present the results of numerical modeling of regions on the Earth's surface in the Barents Sea region, which are hit by single-hop beam trajectories of HF-band radio waves coming out of a transmitter located at mid-latitudes in the conditions of a sub-storm on December 24, 2014. The ionosphere parameters are set according to the empirical GDMI model with an adjustment based on data on auroras and the total electronic content for satellites that flew over the area of observation of these auroras. The changes in the capabilities of single-hop HF radio communication between the Barents Sea region and areas located at mid-latitudes during auroral eruptions and during calm conditions are analyzed.