

Научная статья
УДК 537.877+519.6
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.004

ВЛИЯНИЕ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ РСДН-20 ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ 28 МАРТА 2017

О. И. Ахметов¹, В. Б. Белаховский¹, О. В. Мингалев^{1,2}, И. В. Мингалев¹, А. В. Ларченко¹, З. В. Суворова¹

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Мурманский арктический государственный университет, Мурманск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Олег Иршатович Ахметов, akhmetov@pgia.ru

Аннотация

На основе экспериментальных данных радара EISCAT и методов численного моделирования исследовано влияние потоков высыпающихся субрелятивистских (релятивистских) электронов внешнего радиационного пояса Земли на работу системы дальней навигации РСДН-20, работающей на частотах 11,905, 12,649 и 14,881 кГц. В результате вычислительных экспериментов на частоте 14,881 кГц при незначительном, менее порядка, увеличении концентрации электронов в *D*- и *E*-слоях ионосферы получено незначительное снижение затухания в возмущенных условиях. На меньших частотах и в случае увеличения концентрации в области отражения наблюдается увеличение затухания сигнала. Показано, что нарушение монотонности у частотной зависимости затухания сигнала связано с положением границы между областями с различным характером затухания сигнала и высотой отражения сигнала от ионосферы. В случае, когда точка пересечения высотного профиля частоты столкновений электронов u_e с профилем удвоенной плазменной частоты $2\omega_e$ оказывается внутри области отражения сигнала, наблюдается нелинейный вид зависимости затухания от частоты. Фазы сигналов РСДН-20 слабо подвержены влиянию высыпаний в атмосферу электронов релятивистских энергий. Сравнение амплитуд сигналов, полученных в вычислительных экспериментах, и сигналов, зарегистрированных на обсерваториях ПГИ «Ловозеро» и «Баренцбург», показало частичное согласие в большей части изменений, зарегистрированных во время высыпания субрелятивистских электронов в полярной ионосфере. Представленные оценки могут быть использованы на коротких радиотрассах 100–200 км в области высоких широт для мониторинга состояния ионосферы.

Ключевые слова:

численное моделирование, распространение радиоволн, ионосфера, высокие широты, ОНЧ, РСДН-20

Благодарности:

исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 18-77-10018 (О. И. Ахметов, В. Б. Белаховский).

Original article

THE EFFECT OF RELATIVISTIC ELECTRONS PRECIPITATING ON THE RSDN-20 SYSTEM SIGNAL CHARACTERISTICS DURING THE EVENT ON MARCH 28, 2017

O. I. Akhmetov¹, V. B. Belakhovsky¹, O. V. Mingalev^{1,2}, I. V. Mingalev¹, A. V. Larchenko¹, Z. V. Suvorova¹

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk region, Russia, akhmetov@pgia.ru

²Murmansk Arctic State University (MASU), Murmansk, Russia

Corresponding author: Oleg I. Akhmetov, akhmetov@pgia.ru

Abstract

Based on the experimental data of the EISCAT radar and numerical modeling methods, the influence of the fluxes of subrelativistic (relativistic) electrons of the Earth's outer radiation belt on the operation of the RSDN-20 long-range navigation system operating at frequencies of 11.905 kHz, 12.649 kHz and 14.881 kHz has been studied. As a result of computational experiments, a slight decrease in attenuation under perturbed conditions was obtained at a frequency of 14.881 kHz with a slight, less than an order of magnitude increase in the electron concentration in the *D*- and *E*-layers of the ionosphere. At lower frequencies and in the case of an increase in concentration in the reflection region, an increase in signal attenuation is observed. It is shown that the violation of monotonicity in the frequency dependence of signal attenuation is associated with the position of the boundary between regions with different types of signal attenuation and the height of the signal reflection from the ionosphere. In the case when the intersection point of the high-altitude profile of the electron collision frequency u_e with the profile of the doubled plasma frequency $2\omega_e$ is inside the signal reflection region, a nonlinear type of attenuation dependence on frequency is observed. The phases of RSDN-20 signals are weakly affected by the precipitation of relativistic energy electrons into the atmosphere. A comparison of the amplitudes of the signals obtained in computational experiments and the signals recorded at the observatories of the Polar Geophysical Institute Lovozero and Barentsburg showed partial agreement in most of the changes recorded during the precipitation of subrelativistic electrons in the polar ionosphere. The presented estimates can be used on short radio paths of 100–200 km in the high latitude region to monitor the state of the ionosphere.

Keywords:

numerical modeling, radio wave propagation, ionosphere, high latitudes, VLF, RSDN-20

Acknowledgments:

the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation, no. 18-77-10018 (O. I. Akhmetov, V. B. Belakhovsky).

Введение

Высыпания в атмосферу являются одним из основных механизмов потерь релятивистских электронов ($E \sim 1$ МэВ) внешнего радиационного пояса. Выделяют импульсные микровсплески высыпающихся релятивистских электронов (ВРЭ) продолжительностью менее 1 сек. Данный тип высыпаний наблюдается в ночные часы, на $L = 4\text{--}6$, механизм высыпаний связывают с ОНЧ-хорами (Lorentzen et al., 2001). Высыпания релятивистских электронов могут длиться от нескольких минут до нескольких часов. Данный тип высыпаний наблюдается в дневном и вечернем секторе. Рассеяние по питч-углам и высыпания релятивистских электронов в атмосферу могут быть связаны с их взаимодействием с электронно-циклотронными волнами (Horne, Thorne, 2000), электромагнитными ионно-циклотронными волнами (EMIC, Pc1-пульсации) (Summers, Thorne, 2003), вистлерами (Horne, Thorne, 2003) или с комбинацией этих волн.

Считается, что пульсирующие полярные сияния вызваны высыпанием в атмосферу Земли электронов релятивистских (субрелятивистских) энергий на восстановительной фазе геомагнитного возмущения (Miyoshi et al., 2015; Miyoshi et al., 2021).

Высыпающиеся релятивистские электроны могут оказывать влияние на распространение ОНЧ-радиосигналов, распространяющихся в высокоширотном участке волновода Земля – ионосфера. В связи с этим исследование влияния электронных высыпаний на сигналы ОНЧ остаются актуальными. В последнее время больше внимания уделяется попыткам связать состояние ионосферы с характеристиками ОНЧ-сигналов антропогенной природы, как, например, это делается в работах (Bashkuev et al., 2018; Стародубцев и др., 2019), где используются сигналы РСДН-20 совместно со спутниковыми данными. Исследование состояния нижней ионосферы возможно и по естественным сигналам от молниевых источников, однако антропогенные ОНЧ-источники такие, как системы дальней навигации и системы точного времени, более удобны для задач мониторинга ионосферы вследствие стабильной мощности излучателя. В сигналах системы РСДН-20 отсутствует как амплитудная, так и частотная модуляция (Jacobsen, 2023), что делает их одними из наиболее удобных для исследований влияния различных гелиогеофизических факторов на состояние волновода в области высоких широт. Это открывает возможность прямого сравнения амплитуд и фаз сигналов в спокойных и возмущенных условиях.

Использование исключительно данных наземных измерений требует накопления результатов для многих десятков случаев и даже в этом случае не гарантирует возможность выявить закономерности из-за присутствия в данных помех различной природы. Метод численного моделирования лишен этих недостатков и позволяет делать выводы даже по одному событию, однако крайне трудоемок в части построения адекватной численной модели. Также вычислительный эксперимент крайне требователен к заданию условий среды, граничных условий и источника. Ошибка при решении любой из этих задач ведет к получению неправильного результата. Поэтому при использовании численных методов верификация адекватности полученных результатов посредством сравнения с данными наземной регистрации в обсерваториях является хорошим способом уменьшения вероятности получения неправильных результатов.

В данной работе на основе экспериментальных данных радара EISCAT и численной модели распространения радиоволн, разработанной в ПГИ, (Мингалев и др., 2018) исследовано влияние потоков высыпающихся субрелятивистских (релятивистских) электронов на работу системы РСДН-20, работающей на частотах 11,905, 12,649 и 14,881 кГц, во время события 28 марта 2017 г. Проведено сравнение результатов, полученных в вычислительных экспериментах, с результатами наблюдений в обсерваториях ПГИ «Ловозеро» и «Баренцбург». Сделаны оценки затухания сигнала и изменения фазы в пересчете на 1 км высокоширотной радиотрассы в предположении отсутствия значительных горизонтальных неоднородностей на пути распространения сигнала.

Методы

Исследования проводились с помощью численной модели распространения электромагнитных волн, разработанной в Полярном геофизическом институте (ПГИ) (Мингалев и др., 2018). Профили электронной концентрации для событий были получены с использованием данных радара некогерентного рассеяния VHF EISCAT, расположенного вблизи г. Тромсё, Норвегия ($69^{\circ}35'11''\text{N}$ $19^{\circ}13'38''\text{E}$) (EISCAT Scientific Association — <https://eiscat.se/about/sites/eiscat-tromso-site/>).

Частоты столкновений в вычислительных экспериментах рассчитывались с использованием модели NRLMSISE по формулам из работы (Schunk and Nagy, 2009). Геомагнитное поле, необходимое для моделирования, рассчитывалось по модели International Geomagnetic Reference Field 13-й генерации (IGRF13) (Alken et al., 2021).

Данные для сравнения результатов вычислительных экспериментов с зарегистрированными сигналами получены в обсерваториях ПГИ «Ловозеро» и «Баренцбург» на оборудовании, разработанном в ПГИ (Пильгаев и др., 2008; Федоренко и др., 2009; Филатов и др., 2011).

Событие 28 марта 2017 года

С 26 марта по 1 апреля наблюдалась CIR (corotating interaction region) магнитная буря, вызванная высокоскоростным потоком солнечного ветра. Интенсивность магнитной бури была ниже средней (SYM-H-индекс составлял -85 нТл) (рис. 1). Магнитная буря сопровождалась продолжительной суббуревой активностью (AE-индекс в течение нескольких дней превышал 1 тыс. нТл). При этом B_z -компонента межпланетного магнитного поля часто меняла знак. По данным базы OMNI скорость солнечного ветра превышала 750 км/с. Начало магнитной бури сопровождалось ростом плотности солнечного ветра до 40 см $^{-3}$.

На рисунке 2. показаны вариации потоков как захваченных, так и высыпающихся электронов различных энергий (40, 130, 287, 612 кэВ) по данным спутника NOAA-15, имеющего солнечно-синхронную орбиту ($h \sim 850$ км). Датчики, регистрирующие захваченные и высыпающиеся электроны, ортогональны друг к другу. Из вариаций потоков электронов были удалены значения для географических широт ниже 55° для того, чтобы, в частности, убрать эффекты, связанные с прохождением южно-атлантической аномалии. В рассматриваемой период геомагнитной бури (27–29 марта 2017 г.) наблюдался рост потоков энергичных электронов, электронов субрелятивистских энергий (612 кэВ) (рис. 2).

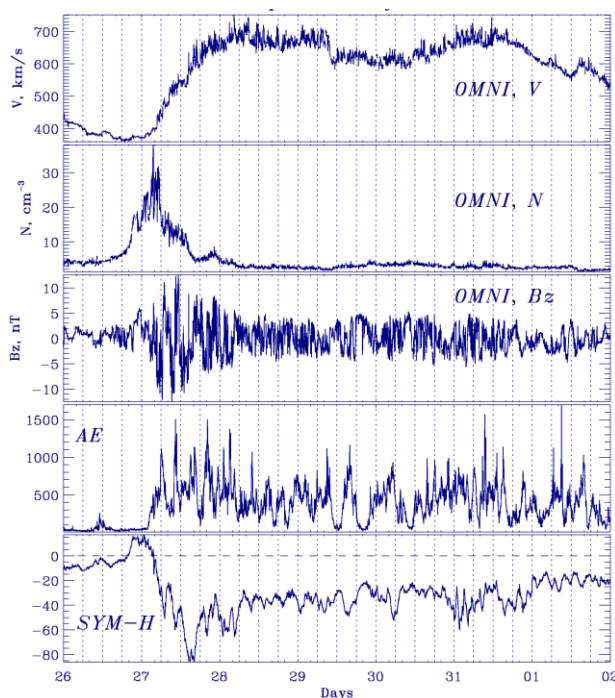


Рис. 1. Скорость солнечного ветра V , плотность солнечного ветра N , B_z -компонента межпланетного магнитного поля по данным базы OMNI, AE-индекс, SYM-H-индекс 26 марта – 1 апреля 2017

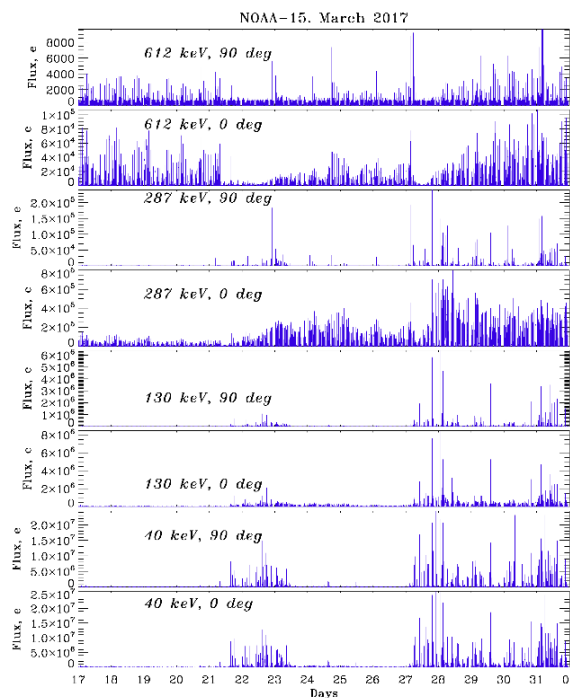


Рис. 2. Вариации захваченных (0 deg) и высыпающихся (90 deg) потоков электронов по данным спутника NOAA-15 с энергиями 40, 130 кэВ, 287, 612 кэВ для марта 2017 г.

Рост концентрации ионосферной плазмы по данным радара EISCAT VHF в Тромсё наблюдался в 22:30–24:00 UT на высотах 75–120 км (рис. 3). Мы связываем данный рост Ne потоками высыпавшихся в атмосферу электронов субрелятивистских (релятивистских) энергий. Поскольку данный рост совпал с ростом потоков высыпавшихся электронов субрелятивистских энергий (612 кэВ) (рис. 4). Кроме того, в это время наблюдались пульсирующие полярные сияния в зеленой линии спектра (557,7 нм) по данным камеры всего неба в обсерватории ПГИ «Ловозеро» (рис. 4). Считается, что появление полярных сияний вызвано высыпанием в атмосферу электронов субрелятивистских (релятивистских) энергий (Miyoshi et al., 2015).

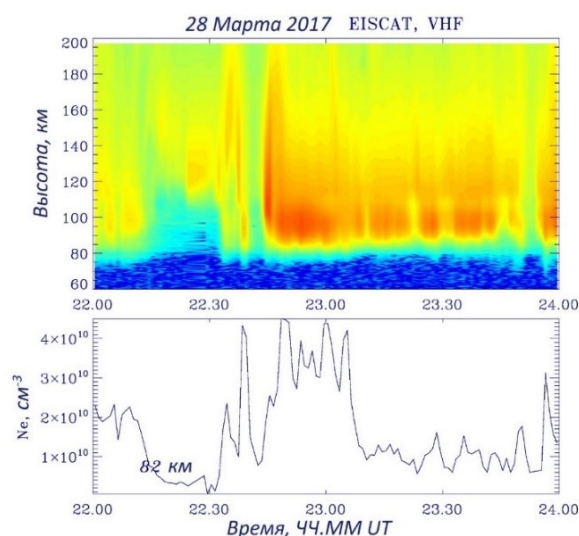


Рис. 3. Электронная концентрация в зависимости от высоты по данным радара VHF EISCAT в Тромсё 28 марта 2017 г. (верхняя панель), электронная концентрация на высоте 82 км (нижняя панель)

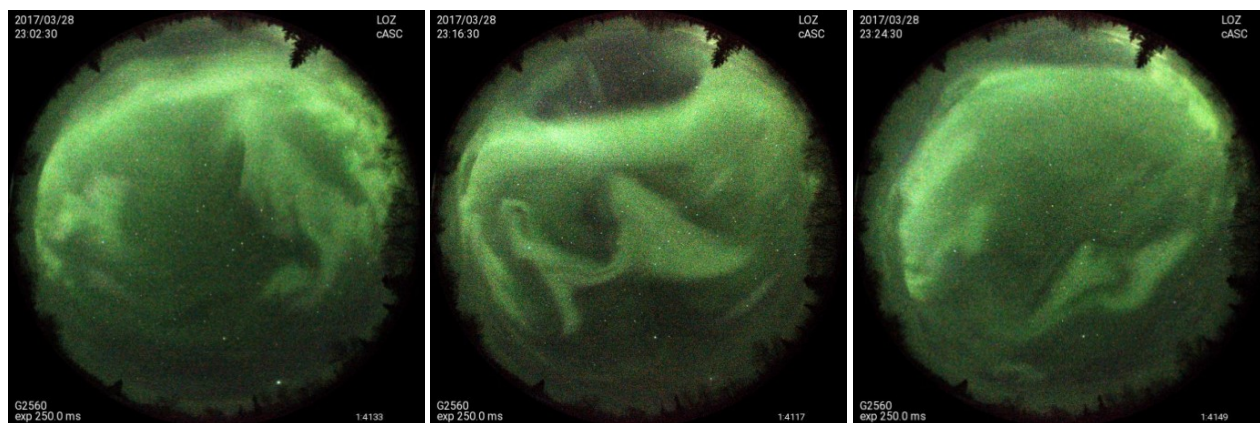


Рис. 4. Кадры камеры всего неба в обсерватории ПГИ «Ловозеро» 28 марта 2017 г. в моменты времени 23:02, 23:16, 23:24 UT

Таким образом, в период CIR магнитной бури наблюдается и высыпание электронов субрелятивистских энергий (> 612 кэВ), что приводит к росту концентрации в D -слое ионосферы.

На рисунках 3 и 5 показаны вариации электронной концентрации по данным радара некогерентного рассеяния EISCAT VHF в Тромсё для спокойных условий (рис. 5) и для возмущенных условий (рис. 3). Для построения условий среды распространения в вычислительном эксперименте в спокойных условиях был взят вертикальный профиль концентрации электронов радара EISCAT VHF 26 марта 2017 г. в 23:00 UT. Для вычислительного эксперимента в возмущенных условиях был взят вертикальный профиль концентрации электронов радара EISCAT VHF 28 марта 2017 г в 23:00 UT.

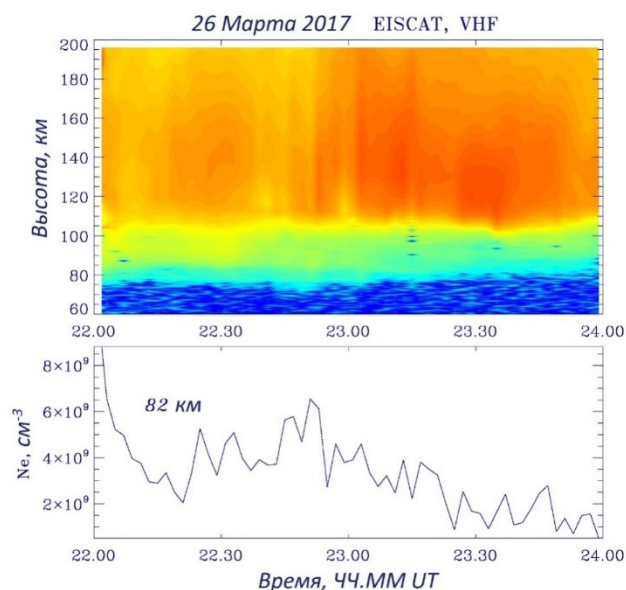


Рис. 5. Электронная концентрация в зависимости от высоты по данным радара VHF EISCAT в Тромсё 26 марта 2017 г. (верхняя панель), электронная концентрация на высоте 82 км (нижняя панель)

Область моделирования, среда, граничные условия и источник

Профили электронной концентрации, использованные в вычислительных экспериментах, представлены на рис. 6а для 26 и 28 марта 2017 г., момент времени — 23:00 UT. На рисунке 6б представлены профили частоты столкновений электронов с нейтральными атомами и ионами. На рисунках спокойные условия показаны сплошной линией, а возмущенные — прерывистой. Профили электронной концентрации построены по данным радара некогерентного рассеяния VHF EISCAT (Тромсё, Норвегия 69°35'11"N 19°13'38"E) (рис. 3 и 5). Все профили начинаются с высот 60–70 км, ниже концентрация электронов экстраполировалась к значению 100 м^{-3} .

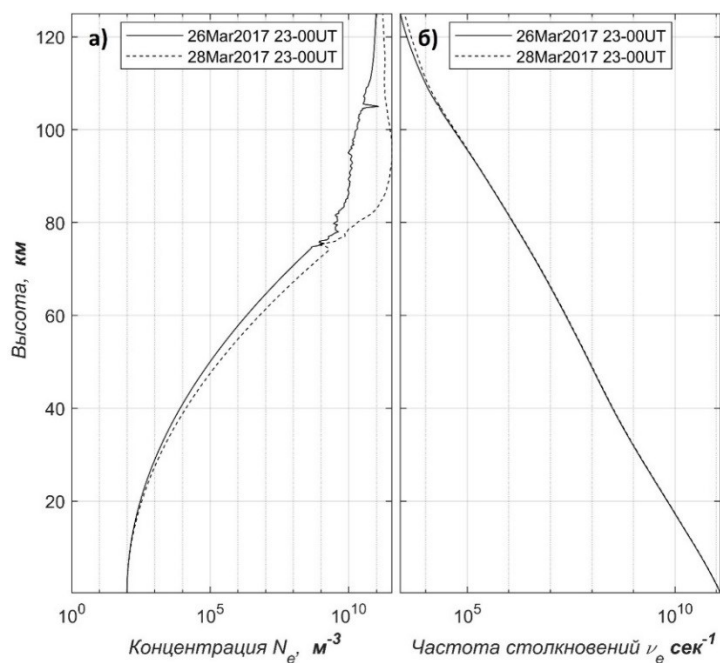


Рис. 6. Высотные профили электронной концентрации в панели: а — частоты столкновений электронов с нейтрами и ионами в панели; б — спокойные условия, соответствующие 26 марта 2017 г. в 23:00 UT, показаны сплошной линией, а возмущенные, соответствующие 28 марта 2017 г. в 23:00 UT, — прерывистой

Частота столкновений электронов с нейтрами и ионами была рассчитана на основе профилей электронной концентрации и данных модели NRLMSISE2000 с использованием формул из книги (Schunk and Nagy, 2009, с. 109).

Профиль проводимости литосферы на суше был задан с учетом результатов исследований, полученных несколькими научными группами и опубликованных в работе (Korja et al., 2002).

Расчеты проводились в декартовой системе координат, где ось Z располагалась нормально к поверхности Земли. Таким образом, область моделирования для численных экспериментов была параллелепипедом, включающим участок волновода Земля – ионосфера. Уровень поверхности Земли соответствовал $Z = 0$.

В численных экспериментах использовалась горизонтально-однородная ионосфера и область размером 256×1000 км по горизонту, 125 км по высоте в атмосфере и ионосфере и 25 км в глубину в литосфере. Шаг сетки над поверхностью Земли — 250 м по вертикали, 500 м по горизонтали, в литосфере — 125 м по вертикали и 500 м по горизонтали. Центр источника сигнала располагался на расстоянии 64 км от трех боковых граней полученного параллелепипеда. Для всех внешних поверхностей, кроме нижней, использовалось условие ухода свободной волны вместе с адаптированными поглощающими слоями PML и профилем потерь из работы (Berenger, 1994). Это позволило снизить уровень отражений сигналов от границ области до 0,1 %, что важно в случае длительного относительно времени моделирования действующего источника сигнала.

Сигнал источника представлял собой сумму синусоид на частотах системы РСДН-20RSDN-20, а именно 11905, 12679, 14881 Гц. На расстоянии 64 км от левой вертикальной границы прямоугольной области моделирования, на части вертикальной плоскости, параллельной этой границе, шириной 128 км, на высотах от поверхности Земли до 60 км было задано горизонтальное магнитное поле. Это позволило в первом приближении задать плоский фронт волны. Магнитное поле в модельной области задавалось моделью IGRF13 (Alken et al., 2021) для соответствующих координат и даты.

Результаты

В работе рассмотрено влияние ВРЭ на распространение ОНЧ-сигналов системы РСДН-20 в высокоширотном регионе. Анализ амплитуд магнитной и электрической составляющих электромагнитных сигналов совместно с анализом скорости его распространения во время события 28 марта 2017 г. показал увеличение затухания сигнала на 20 % и незначительное (~ 5 %-е) снижение скорости распространения, не приводящие к фазовым искажениям (табл. 1 и 2). Вероятно, это сократит дальность уверенного приема и немного увеличит погрешность определения местоположения при нахождении приемника в области высоких широт.

С точки зрения мониторинга состояния ионосферы на высокоширотных радиотрассах использование сигналов РСДН-20 возможно во время вторжения электронов субрелятивистских энергий при условии достаточно небольшого расстояния между пунктами регистрации (~ 200 км) и значительного удаления их от источника — более 1 тыс. км. Небольшая длина высокоширотной радиотрассы связана со значительной горизонтальной неоднородностью высокоширотной ионосферы, которая, как показано в работе (Akhmetov et al., 2023), приводит к заметным искажениям сигналов РСДН-20. Вероятность появления значительных неоднородностей на короткой радиотрассе меньше, чем на длинной. Требование удаленности от источника вызвано интерференционным наложением множества мод сигнала в ближней и средней зоне, делающее задачу интерпретации результатов слишком сложной. Таким образом, для исследований ионосферы на Кольском полуострове хорошо подходит только Краснодарский передатчик системы РСДН-20 (45°24'N 38°09'E), путь от которого идет почти строго с юга на север. Сигнал от других передатчиков идет скорее с востока на запад, в связи с чем имеет значительный участок радиотрассы в области высоких широт до того, как будет зарегистрирован в обсерваториях ПГИ.

Из таблицы 1 видно, что затухание от частоты зависит по-разному при изменении профиля электронной концентрации в ионосфере. Так, в спокойных условиях видно, что частота 14881 Гц затухает сильнее двух других, более низких частот, а в возмущенных, наоборот, затухает меньше. Две более низкие частоты 11905 и 12649 Гц отличаются менее чем на 1 кГц, вследствие чего их амплитудные и фазовые характеристики оказываются близки. Различный режим затухания в зависимости от частоты может объясняться особенностями прохождения волной участка волновода вблизи к его верхней границе.

Таблица 1

Затухание сигнала РСДН-20 в пересчете на км радиотрассы

Вычислительный эксперимент	Затухание вектора Пойтинга, %/км	Затухание E , %/км	Затухание H , %/км
Тромсё, 23:00 UT			
26 Mar 2017 11905 Гц	0,211389	0,110123	0,0980493
26 Mar 2017 12649 Гц	0,251014	0,130436	0,122759
26 Mar 2017 14881 Гц	0,263358	0,139048	0,135909
28 Mar 2017 11905 Гц	0,27217	0,141395	0,136203
28 Mar 2017 12649 Гц	0,304018	0,159052	0,153844
28 Mar 2017 14881 Гц	0,244071	0,12716	0,125838

Примечание. Серым цветом отмечены возмущенные условия.

Таблица 2

Запаздывание фазы сигнала РСДН-20 в пересчете на км радиотрассы относительно распространения в вакууме

Вычислительный эксперимент	Задержка фазы потока энергии, рад/км	Задержка фазы E , рад/км	Задержка фазы H , рад/км
Тромсё, 23:00 UT			
26 Mar 2017 11905 Гц	0,0185496	0,0286615	0,0272431
26 Mar 2017 12649 Гц	0,0144713	0,019428	0,0206782
26 Mar 2017 14881 Гц	0,00859585	0,0117684	0,0108171
28 Mar 2017 11905 Гц	0,019236	0,02887	0,0302003
28 Mar 2017 12649 Гц	0,0146452	0,0207354	0,0206262
28 Mar 2017 14881 Гц	0,00897906	0,0139361	0,0118715

Примечание. Серым цветом отмечены возмущенные условия.

В высокоширотной ионосфере, где геомагнитное поле близко к вертикальному, для сигналов, у которых электрическое поле также близко к вертикальному, имеются две области по высоте с существенно разными режимами затухания сигнала. Граница между этими областями является поверхностью, которая приближенно описывается уравнением $\nu_e = 2\omega_{pe}$, где ν_e — частота столкновений электронов с нейтральными атомами и ионами (убывает с ростом высоты), а ω_{pe} — плазменная частота в системе СИ (возрастает с увеличением высоты).

В нижней области часть электрического поля, продольная геомагнитному полю, затухает со временем экспоненциально как:

$$\exp\left(-\frac{\tau}{2}(\nu_e - \sqrt{\nu_e^2 - 4\omega_{pe}^2})\right),$$

где τ — время затухания сигнала.

В верхней области затухает со временем как:

$$\exp\left(-\frac{\tau}{2}\nu_e\right),$$

то есть существенно быстрее, чем в нижней области.

На рисунке 7 показаны профили частоты столкновений электронов $\nu_e(h)$ — красная линия, удвоенной плазменной частоты $2\omega_e(h)$ — синяя линия, вертикальный разрез модуля вертикальной компоненты напряженности электрического поля E_z для 26 марта 2017 г. (спокойные условия).

Из рисунка видно, что граница области $\nu_e = 2\omega_{pe}$ находится в самом начале области отражения сигнала от ионосферы. Таким образом, все частоты отражаются внутри области $\nu_e < 2\omega_{pe}$. Из таблицы 1 видно, что в спокойных условиях затухание в зависимости от частоты монотонно, что обусловлено одинаковыми условиями затухания для всех частот.

На рисунке 8 показаны профили частоты столкновений электронов $\nu_e(h)$ — красная линия, удвоенной плазменной частоты $2\omega_e(h)$ — синяя линия, вертикальный разрез модуля вертикальной компоненты напряженности электрического поля E_z для 28 марта 2017 г. (возмущенные условия). Видно, что область отражения сигнала от ионосферы гораздо уже, а граница $\nu_e = 2\omega_{pe}$ находится внутри нее. Частоты, которые отразятся раньше, затухнут несколько меньше, что и наблюдается в табл. 1.

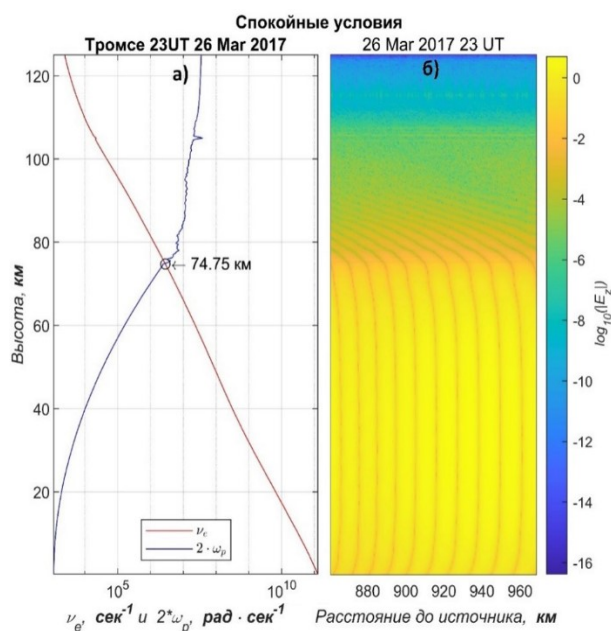


Рис. 7. Результаты расчетов для спокойных условий 26 марта 2017 г. На панели: а — профиль частоты столкновений электронов $\nu_e(h)$ — красная пунктирная линия, удвоенная плазменная частота $2\omega_e(h)$ — синяя линия. На панели: б — вертикальный разрез модуля компоненты напряженности электрического поля E_z

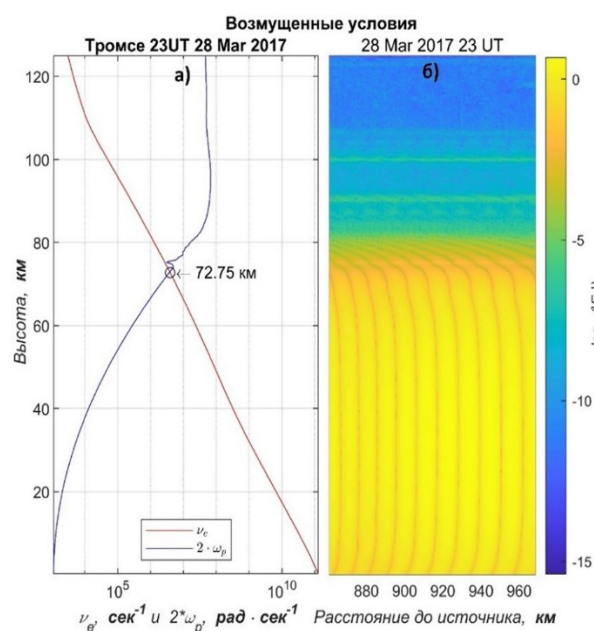


Рис. 8. Результаты расчетов для возмущенных условий 28 марта 2017 г. На панели: а — профиль частоты столкновений электронов $\nu_e(h)$ — красная пунктирная линия, удвоенная плазменная частота $2\omega_e(h)$ — синяя линия. На панели: б — вертикальный разрез модуля компоненты напряженности электрического поля E_z

Увеличение концентрации электронов в области отражения сигнала от ионосферы чаще приводит к уменьшению скорости распространения сигнала. Обычно изменения эти не велики, за исключением событий очень сильно изменяющих профиль концентрации электронов, таких, как, например, GLE (ground level enhancement). Высыпания электронов вызывают незначительные изменения скорости распространения.

Анализ данных наземной регистрации в обсерваториях ПГИ «Ловозеро» и «Баренцбург» 26 и 28 марта 2017 г. также не выявил фазовых отклонений. На рисунке 9 представлены амплитуды напряженности магнитного поля сигнала Краснодарского источника, зарегистрированные в обсерватории «Ловозеро» 26 и 28 марта 2017 г. В нижних панелях показаны напряженности магнитного поля сигнала на частотах 11905 и 12649 Гц.

На рисунке 9а и б видно, что амплитуда сигнала на частоте 14881 Гц относительно двух других частот в спокойных условиях затухает сильнее, а в возмущенных, наоборот, затухает меньше, как и в вычислительных экспериментах. На рисунках 9в и г показано небольшое уменьшение амплитуды сигнала на частотах 11905 и 12649 Гц во время появления пульсирующих полярных сияний, что также согласуется с результатами вычислительных экспериментов.

На рисунке 10 представлены амплитуды напряженности магнитного поля сигнала Краснодарского источника, зарегистрированные в обсерватории «Баренцбург» 26 и 28 марта 2017 г. На рисунке 7а и б видно, что амплитуда сигнала на частоте 14881 Гц относительно двух других частот

в спокойных условиях затухает сильнее, а в возмущенных, наоборот, затухает меньше. В то же время амплитуда двух других частот слабо отреагировала на высыпание электронов и последующие повышение концентрации электронов. На рисунке 11 показано уменьшение амплитуды сигнала на частотах 12649 Гц во время появления пульсирующих полярных сияний.

Представленные на рис. 9–11 результаты наземной регистрации хорошо согласуются с результатами вычислительных экспериментов.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод о закономерностях поведения сигналов ОНЧ-диапазона системы дальней навигации РСДН-20. В спокойных условиях чаще наблюдается возрастающее по частоте затухание амплитуды (табл. 1), что приводит к распределению амплитуд сигналов (как на рис. 9а), когда сигнал 14881 Гц затухает сильнее относительно двух других. В возмущенных условиях затухание сигнала стремится к зависимости, где сигналы на более высоких частотах затухают меньше, чем на низких (рис. 9б). Две другие частоты, 12649 и 11905 Гц, являются хорошим индикатором активной фазы высыпаний, во время которой наблюдается заметное уменьшение амплитуды на одной (рис. 11) или обеих этих частотах (рис. 9в и г). К сожалению, для выявления источника ионосферных возмущений недостаточно одних только данных ОНЧ-наблюдений, так как изменения профиля электронной концентрации, вызванные высыпаниями релятивистских электронов, мало чем отличаются от изменений, вызванных слабыми солнечными протонными событиями. Для идентификации причин изменений профиля проводимости необходимо привлекать дополнительные источники данных. В области высоких широт это могут быть, например, данные камер всего неба.

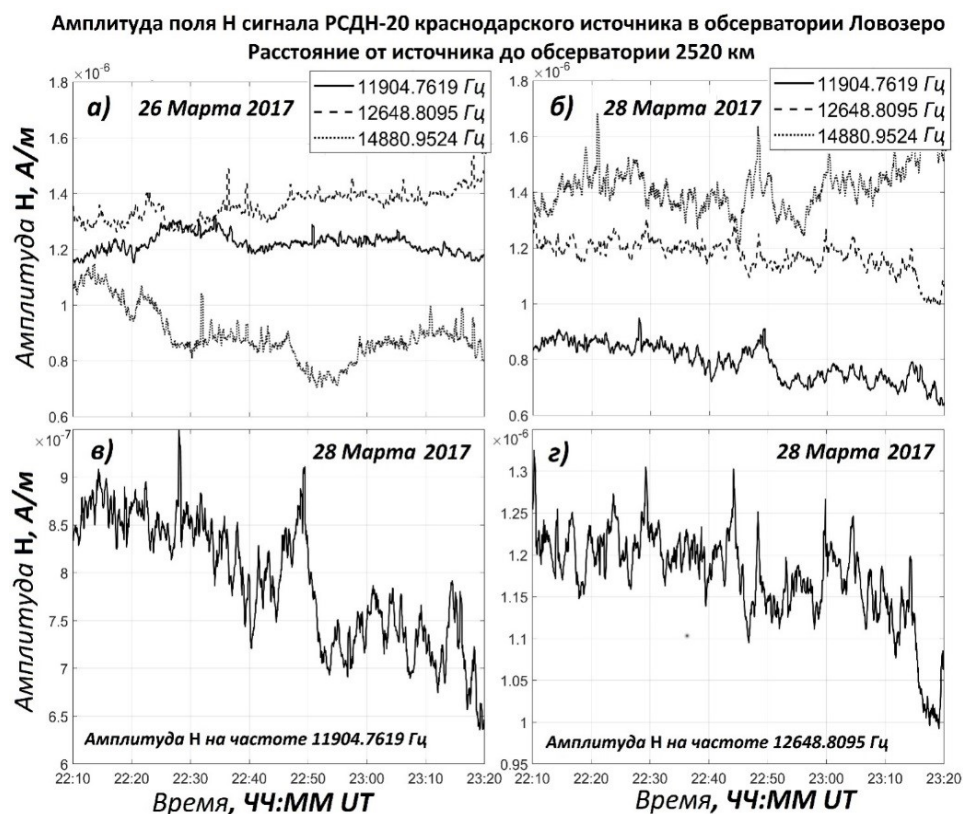


Рис. 9. Амплитуды напряженности магнитного поля сигнала Краснодарского источника, зарегистрированные в обсерватории «Ловозеро» 26 и 28 марта 2017 г. На панели: а — 26 марта 2017 г.; б — 28 марта 2017 г.; в — отдельно амплитуда сигнала на частоте 11905 Гц 28 марта 2017 г.; г — отдельно амплитуда сигнала на частоте 12649 Гц 28 марта 2017 г.

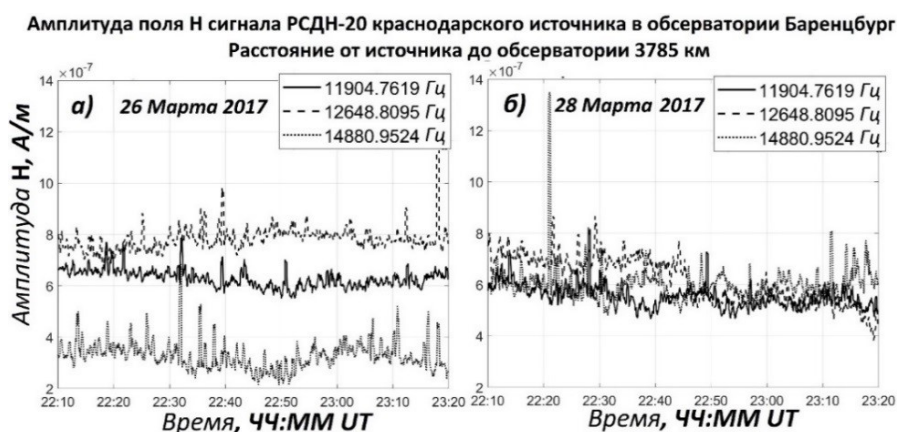


Рис. 10. Амплитуды напряженности магнитного поля сигнала Краснодарского источника, зарегистрированные в обсерватории «Баренцбург» 26 и 28 марта 2017 г. На панели: *а* — 26 марта 2017 г.; *б* — 28 марта 2017 г.



Рис. 11. Амплитуда напряженности магнитного поля сигнала Краснодарского источника, зарегистрированные в обсерватории «Баренцбург» 28 марта 2017 г. на частоте 12649 Гц

Заключение

На основе совместного анализа результатов наземной регистрации в обсерваториях ПГИ сигнала РСДН-20 во время высыпания электронов субрелятивистских энергий и результатов вычислительных экспериментов обнаружено нарушение монотонности у частотной зависимости затухания сигнала. На частоте 14881 Гц при незначительном, менее порядка, увеличении концентрации электронов в *D*- и *E*-слоях ионосферы наблюдается незначительное снижение затухания в возмущенных условиях. На меньших частотах и в случае увеличения концентрации в области отражения наблюдается увеличение затухания сигнала. Нарушение монотонности у частотной зависимости затухания сигнала связано с положением границы между областями с различным характером затухания сигнала ($\nu_e = 2\omega_e$) и высотой отражения сигнала от ионосферы. В случае, когда точка пересечения высотного профиля частоты столкновений электронов ν_e с профилем удвоенной плазменной частоты $2\omega_e$ оказывается внутри области отражения сигнала, наблюдается нелинейный вид зависимости затухания от частоты.

Фазы сигналов РСДН-20 слабо подвержены влиянию высыпаний в атмосферу электронов релятивистских энергий.

Сделаны оценки затухания сигнала на один км радиотрассы и запаздывания относительно скорости света в вакууме. Представленные оценки могут быть использованы на коротких радиотрассах 100–200 км в области высоких широт для мониторинга состояния ионосферы.

Предложена методика определения возмущенных условий по данным наземной регистрации в области высоких широт ОНЧ-сигналов системы РСДН-20.

Список источников

1. Мингалев И. В. и др. Явная схема расщепления для уравнений Максвелла // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 12. С. 17–38.
2. Пильгаев С. В. и др. Универсальное устройство синхронизации данных от GPS-приемника // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 3. С. 175–176.
3. Стародубцев С. А. и др. Анализ солнечных, космо- и геофизических событий в сентябре 2017 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5, № 1. С. 17–38. DOI 10.12737/szf-51201903.
4. Федоренко Ю. В. и др. Прецизионный четырехканальный 22-разрядный аналого-цифровой преобразователь на основе AD7716 // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 179–180.
5. Филатов М. В. и др. Четырехканальный 24-разрядный синхронизированный с мировым временем аналого-цифровой преобразователь // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 73–75.
6. Akhmetov O. I. et al. About the propagation of RSDN-20 “Alpha” signals in the Earth-ionosphere waveguide during geomagnetic disturbances // Radio Sci. 2023. Vol. 58, e2022RS007490. DOI 10.1029/2022RS007490.
7. Alken P. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. 2021. Vol. 73. P. 1–25. DOI 10.1186/s40623-020-01288-x.
8. Bashkuev Y. et al. Analysis of the conditions for the radio waves propagation in the waveguide “Earth-Ionosphere” on the paths “Novosibirsk-Ulan-Ude” and “Komsomolsk-on-Amur-Ulan-Ude” during magnetic storms august 31-september 12, 2017 / IX International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors”. 2018. id. 01002. DOI 10.1051/e3sconf/2018620100.
9. Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // J. Computational Phys. 1994. Vol. 114. No. 2. P. 185–200. DOI 10.1006/JCPH.1994.1159.
10. EISCAT Scientific Association. 2023. URL: <https://eiscat.se/about/sites/eiscat-tromso-site/>
11. Jacobsen T. The Russian VLF navaid system alpha, RSDN-20. 2023. URL: <http://www.vlf.it/alphatromd/alpha.htm>
12. Horne R. B. and R. M. Thorne. Electron pitch angle diffusion by electrostatic electron harmonic waves: The origin of pancake distributions // Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105, p. 5391.
13. Horne R. B. and Thorne M. Relativistic electron acceleration and precipitation during resonant interactions with whistler-mode chorus // Geophysical Research Letters. 2003. vol. 30. № 10, p. 1527.
14. Korja T. et al. Crustal conductivity in Fennoscandia — a compilation // Earth Planet Sp. 2002. Vol. 54. No. 5. P. 535–558. DOI 10.1186/BF03353044.
15. Lorentzen K. R., Blake J. B., Inan U. S., Bortnik J. Observations of relativistic electron microbursts in association with VLF chorus // Journal of Geophysical Research. 2001. Vol. 106. Iss. A4. p. 6017–6028.
16. Miyoshi, Y. et al. Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae. // Sci. Rep. 2021. Vol. 11. id 13724. DOI 10.1038/s41598-021-92611-3.
17. Miyoshi Y. et al. Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probe observations // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. Vol. 120. P. 2754–2766. DOI 10.1002/2014JA020690.
18. Schunk R. and Nagy A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry (2nd ed., Cambridge Atmospheric and Space Science Series). Cambridge: CambridgeUniversityPress. 2009. 355 p. DOI 10.1017/CBO9780511635342.
19. Summers D., Thorne R. M. Relativistic electron pitch-angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms // Journal of Geophysical Research. 2003. vol. 108. № A4, p. 1143.

References

1. Mingalev I. V., Mingalev O. V., Akhmetov O. I. Suvorova Z. V. Yavnaya schema rasshchepleniya dlya uravnenij Maksvella [Explicit expansion scheme for Maxwell's equation]. *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling], 2018, vol. 30, no. 12, pp. 17–38. (In Russ.).
2. Pilgaev S. V., Akhmetov O. I., Filatov M. V., Fedorenko Yu. V. Universal'noe ustrojstvo sinhronizacii dannyh ot GPS-priemnika [A universal device for synchronizing data from a GPS receiver]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and techniques of experiment], 2008, no. 3, pp. 175–176. (In Russ.).
3. Starodubtsev S. A., Baishev D. G., Grigoryev V. G., Karimov R. R., Kozlov V. I., Korsakov A. A., Makarov G. A., Moiseev A. V. Analiz solnechnyh, kosmo- i geofizicheskikh sobytij v sentyabre 2017 g. po kompleksnym nablyudeniyam IKFIA SO RAN [Analyzing solar, cosmic, and geophysical events in September 2017 using SHICRA SB RAS complex observations]. *Solnechno-zemnaya fizika*. [Solar-Terrestrial Physics], 2019, vol. 5, no. 1, pp. 17–38, doi 10.12737/szf-51201903. (In Russ.).
4. Fedorenko Yu. V., Pilgaev S. V., Filatov M. V., Akhmetov O. I. Precizionnyj chetyrekhkanal'nyj 22-razryadnyj analogo-cifrovoy preobrazovatel' naosнове AD7716 [Precision four-channel 22-bit analog-to-digital converter based on AD7716]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques], 2009, no. 4, pp. 179–180. (In Russ.).

5. Filatov M. V., Pilgaev S. V., Fedorenko Yu. V. Chetyrekhkanal'nyj 24-razryadnyj sinhronizirovannyj s mirovym vremenem analogo-cifrovoj preobrazovatel' [A four-channel 24-bit analog-to-digital converter synchronized with world time]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental techniques], 2011, no. 3, pp. 73–75. (In Russ.).
6. Akhmetov O. I., Belakhovsky V. B., Mingalev I. V., Mingalev O. V., Larchenko A. V., Suvorova Z. V. About the propagation of RSDN-20 “Alpha” signals in the Earth-ionosphere waveguide during geomagnetic disturbances. *Radio Sci.*, 2023, vol. 58, e2022RS007490, doi 10.1029/2022RS007490.
7. Alken P., Thébaud E., Beggan C. D., Amit H., Aubert J., Baerenzung J., Bondar T. N., Brown W. J., Califf S., Chambodut A., Chulliat A., Cox G. A., Finlay C. C., Fournier A., Gillet N., Grayver A., Hammer M. D., Holschneider M., Huder L., Hulot G., Jager T., Kloss C., Korte M., Kuang W., Kuvshinov A., Langlais B., Léger J.-M., Lesur V., Livermore P. W., Lowes F. J., Macmillan S., Magnes W., Manda M., Marsal S., Matzka J., Metman M. C., Minami T., Morschhauser A., Mound J. E., Nair M., Nakano S., Olsen N., Pavón-Carrasco F. J., Petrov V. G., Ropp G., Rother M., Sabaka T. J., Sanchez S., Saturnino D., Schnepf N. R., Shen X., Stolle C., Tangborn A., Tøffner-Clausen L., Toh H., Torta J. M., Varner J., Vervelidou F., Vigneron P., Wardinski I., Wicht J., Woods A., Yang Y., Zeren Z., Zhou B. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth Planets Space*, 2021, vol. 73, pp. 1–25, doi 10.1186/s40623-020-01288-x.
8. Bashkuev Yu. B., Advokatov V. R., Buyanova D. G., Pushkarev M. G., Dembelov M. G. Analysis of the conditions for the radio waves propagation in the waveguide “Earth-Ionosphere” on the paths “Novosibirsk-Ulan-Ude” and “Komsomolsk-on-Amur-Ulan-Ude” during magnetic storms august 31-september 12, 2017, IX International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors”, 2018, id. 01002, doi 10.1051/e3sconf/2018620100.
9. Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *J. Computational Phys.*, 1994, vol. 114, no. 2, pp. 185–200, doi 10.1006/JCPH.1994.1159.
10. EISCAT Scientific Association. 2023. Available at: <https://eiscat.se/about/sites/eiscat-tromso-site/>
11. Jacobsen T. The Russian VLF navaid system alpha, RSDN-20. 2023. Available at: <http://www.vlf.it/alphatromd/alpha.htm>
12. Horne R. B. and Thorne R. M. Electron pitch angle diffusion by electrostatic electron harmonic waves: The origin of pancake distributions. *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol. 105, p. 5391.
13. Horne R. B. and Thorne R. M. Relativistic electron acceleration and precipitation during resonant interactions with whistler-mode chorus. *Geophysical Research Letters*, 2003, vol. 30, no. 10, p. 1527.
14. Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A. A., et al. Crustal conductivity in Fennoscandia — a compilation. *Earth Planet Sp.*, 2002, vol. 54, no. 5, pp. 535–558, doi 10.1186/BF03353044.
15. Lorentzen K. R., Blake J. B., Inan U. S., Bortnik J. Observations of relativistic electron microbursts in association with VLF chorus. *Journal of Geophysical Research*, 2001, vol. 106, iss. A4, pp. 6017–6028.
16. Miyoshi Y., Hosokawa K., Kurita S., Oyama S.-I., Ogawa Y., Saito S., Shinohara I., Kero A., Turunen E., Verronen P. T., Kasahara S., Yokota S., Mitani T., Takashima T., Higashio N., Kasahara Y., Matsuda S., Tsuchiya F., Kumamoto A., Matsuoka A., Hori T., Keika K., Shoji M., Teramoto M., Imajo S., Jun C., Nakamura S. Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, id 13724, doi 10.1038/s41598-021-92611-3.
17. Miyoshi Y., Oyama S., Saito S., Kurita S., Fujiwara H., Kataoka R., Ebihara Y., Kletzing C., Reeves G., Santolík O., Clilverd M., Rodger C. J., Turunen E., Tsuchiya F. Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probe observations. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 2015, vol. 120, pp. 2754–2766, doi 10.1002/2014JA020690.
18. Schunk R. and Nagy A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry* (2nd ed., Cambridge Atmospheric and Space Science Series). Cambridge: Cambridge University Press, 2009, 355 p., doi 10.1017/CBO9780511635342.
19. Summers D., Thorne R. M. Relativistic electron pitch-angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 2003, vol. 108, № A4, p. 1143.

Информация об авторах

Олег Иршатович Ахметов — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, akhmetovoleg@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6824-312X;

Владимир Борисович Белаховский — старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук; belakhovsky@pgia.ru, ORCID: 0000-0001-8994-4363;

Олег Викторович Мингалева — заведующий сектором, доктор физико-математических наук; ORCID: 0000-0002-8512-2191;

Игорь Викторович Мингалев — и. о. директора, доктор физико-математических наук;

ORCID: 0000-0002-5968-6188;

Алексей Викторович Ларченко — младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0002-5001-9768;

Зоя Викторовна Суворова — младший научный сотрудник, ORCID: 0000-0002-4079-8032.

Information about the authors

Oleg I. Akhmetov — Senior Researcher of the Polar Geophysical Institute, PhD (Physical and Mathematical Sciences);

Vladimir B. Belakhovsky — Senior Researcher of the Polar Geophysical Institute, PhD (Physical and Mathematical Sciences);

Oleg V. Mingalev — Head of Sector of the Polar Geophysical Institute, Doctor of Physical and Mathematical Sciences;

Igor V. Mingalev — Acting director of the Polar Geophysical Institute, Doctor of Physical and Mathematical Sciences;

Alexey V. Larchenko — Junior Researcher of the Polar Geophysical Institute;

Zoe V. Suvorova — Junior Researcher of the Polar Geophysical Institute.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.

The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.