

УДК 537.877+519.6

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ ОНЧ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ

© 2023 г. О. И. Ахметов^{1, *}, И. В. Мингалев¹, О. В. Мингалев^{1, 2},
В. Б. Белаховский^{1, **}, З. В. Суворова¹

¹Полярный геофизический институт (ПГИ), Апатиты (Мурманская обл.), Россия

²Мурманский арктический государственный университет (МАГУ), Мурманск, Россия

*e-mail: akhmetov@pgia.ru

**e-mail: belakhovsky@pgia.ru

Поступила в редакцию 09.10.2022 г.

После доработки 26.12.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2023 г.

Методами вычислительного эксперимента исследованы амплитудные и фазовые характеристики сигналов ОНЧ антропогенного происхождения во время солнечных протонных событий. В работе рассмотрены события 30 октября 2003 г. и 23 января 2012 г. Профили концентрации электронов построены с использованием данных радара некогерентного рассеяния VHF EISCAT, расположенного в городе Тромсё, Норвегия. В результате обработки данных вычислительных экспериментов показано, что в условиях солнечных протонных событий наблюдаются в основном амплитудные искажения ОНЧ-сигналов, при этом существует частотная зависимость величины искажений сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20. Фазы сигналов системы РСДН-20 менее подвержены влиянию слабых солнечных протонных событий. Исследовано влияние нижней границы волновода Земля–ионосфера в случаях распространения сигналов системы РСДН-20 над поверхностью суши и океана во время солнечного протонного события.

DOI: 10.31857/S0016794022600545, EDN: PKMRVP

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные протонные события (solar proton events – SPE), или солнечные космические лучи, представляют собой выброс с поверхности Солнца очень высокоэнергичных (МэВ–ГэВ) частиц, 90% из которых составляют протоны. Выброс солнечных протонов происходит вслед за солнечной вспышкой, солнечные протоны преодолевают расстояние между Солнцем и Землей примерно за 40 мин. Вторжение солнечных протонов в магнитосферу Земли и дальнейшее их выпадение в атмосферу Земли вызывает повышение электронной концентрации в основном в нижних слоях ионосферы (*D*-область), что приводит к изменению вида вертикального профиля проводимости. Солнечные протонные события, вызывающие увеличение числа частиц, зарегистрированных наземными нейтронными мониторами, получили название GLE (Ground Level Enhancement). Такие события достаточно редки и до настоящего времени зарегистрировано 73 GLE-события. Ионосферный отклик на вторжение солнечных протонов в виде поглощения радиоволн

(10–50 МГц) получил название поглощение полярной шапки (ППШ).

Протонные события оказывают значительное влияние на распространение радиосигналов в волноводе Земля–ионосфера [Potemra et al., 1967; Beloglazov et al., 1990], а потому нуждаются в изучении. В работе [Knipp et al., 2016] было показано, что поглощение сигналов американских радаров, вызванное солнечной вспышкой и солнечным протонным событием в мае 1967 г, едва не стали причиной начала ядерной войны между США и СССР. С точки зрения задач навигации, радиолокации и связи необходимо оценить влияние вторжений протонов разной интенсивности на амплитуду и фазу сигналов, распространяющихся в волноводе Земля–ионосфера. С другой стороны, с точки зрения геофизической задачи мониторинга состояния волновода Земля–ионосфера, необходимо выяснить, можно ли по наземным измерениям амплитуд и фаз постоянно действующих сигналов антропогенной природы выяснить состояние волновода для построения прогноза его радиопроницаемости в широком диапазоне частот. Обе задачи, прямая и обратная,

взаимосвязаны и требуют получения чистых от посторонних помех радио откликов во время указанных событий. Для получения таких откликов необходимо иметь значительный объем наземных измерений радиосигналов на разных станциях для дальнейшей их обработки статистическими методами. Примером такого подхода является сеть Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition – VLF Atmospheric Research Konsortium (AARDDVARK) [Clilverd et al., 2009]. Другой подход предполагает широкое применение численных методов как для моделирования условий среды, так и для моделирования распространения радиосигналов в условиях, соответствующих конкретным геофизическим условиям.

Геофизическая задача мониторинга состояния волновода Земля–ионосфера может решаться как с использованием радиосигналов естественной природы, таких как молниевые разряды, так и с использованием сигналов антропогенной природы. Сигналы постоянно действующих источников антропогенной природы гораздо удобнее по причине стабильности их характеристик. К таким источникам в диапазоне ОНЧ относятся сигналы станций точного времени и сигналы радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20). В рамках данной работы в источнике используются частоты, соответствующие частотам системы РСДН-20. Данная система передает повторяющуюся последовательность длиной 3.6 с, состоящую из шести комбинаций частот длиной 400 мс с интервалом между передачами 200 мс. Основные передатчики системы расположены в районе городов Краснодар, Хабаровск и Новосибирск, иногда работает передатчик в районе пос. Ревда Мурманской обл. Их мощность составляет 500 кВт на каждой из частот. Основными частотами системы являются 11905, 12679 и 14881 Гц, иногда используются дополнительные частоты, незначительно отличающиеся от указанных. В определенный момент времени один передатчик излучает сигнал только на одной из рабочих частот, остальные передатчики могут излучать на других частотах [Jacobsen, 2022].

Для выявления реакции сигналов системы дальней навигации РСДН-20 на изменения профиля электронной концентрации во время вторжений высокоэнергетических протонов в атмосферу Земли рассмотрены протонные события GLE66 30 октября 2003 г. и SPE 23 января 2012 г., для которых выполнен комплекс вычислительных экспериментов.

Данное исследование является частью большого комплексного исследования по изучению реакции сигналов ОНЧ-диапазона, распространяющихся в высокоширотном участке волновода Земля–ионосфера, на изменение электронной плотности в *D*- и *E*-области методами вычисли-

тельного эксперимента. На данном этапе исследованы среднечастотная часть диапазона ИНЧ (1.5 кГц) [Ахметов и др., 2019a], среднечастотная часть диапазона ОНЧ (сигналы РСДН-20) [Ахметов и др., 2021a] и высокочастотная часть диапазона ОНЧ (сигналы службы точного времени “Бета”, 20.5, 23, 25.1 и 25.5 кГц) [Ахметов и др., 2021b] во время суббурь различной интенсивности в случаях горизонтально однородной и неоднородной электронной плотности в *D*- и *E*-области ионосферы. Эти исследования показали, что максимальное влияние изменения профиля электронной концентрации оказывают на сигналы ~10000 Гц, что делает систему РСДН-20 более предпочтительным антропогенным, постоянно действующим источником радиоизлучения с точки зрения мониторинга состояния ионосферы по данным наземной регистрации сигналов ОНЧ. Сигналы естественного происхождения, например от разряда молний, так же могут быть использованы для мониторинга состояния высокоширотной ионосферы, однако в этом случае резко возрастают требования к приемной аппаратуре вследствие заранее не известной локализации источника радиоизлучения.

Попытки связать состояние ионосферы с характеристиками сигналов системы РСДН-20 неоднократно предпринимались и ранее, например, в недавних исследованиях [Bashkuev et al., 2018; Стародубцев и др., 2019] отмечалось снижение амплитуды и изменение фазы в возмущенных условиях. В работе [Clilverd et al., 2006] с использованием приемника на архипелаге Шпицберген было исследовано влияние солнечных протонных событий в октябре–ноябре 2003 г. на распространение ОНЧ-радиоволн от наземных передатчиков в Северном полушарии. Было показано различное влияние SPE-событий на различные трассы прохождения радиоволн. Длинные трассы, расположенные по большей части внутри полярной шапки, показали существенное поглощение ОНЧ-сигнала, для коротких трасс наблюдалось меньшее поглощение сигнала. Для обоих типов трасс на дневной стороне наблюдались флуктуации амплитуды ОНЧ-сигнала.

Было обнаружено [Lynn, 2013], что при уменьшении высоты точки отражения ОНЧ-волн в авроральной зоне во время SPE-события на средних широтах, наоборот, происходит увеличение высоты точки отражения.

Характеристики ОНЧ-сигналов от наземных передатчиков также использовались как инструмент для определения состояния атмосферы (ионосферы) во время SPE-событий [Zigman et al., 2014]. Несмотря на в целом заметные эффекты, широкого распространения метод оценки состояния ионосферы по данным регистрации сигналов системы РСДН-20 наземными станциями не полу-

чил. Основной причиной этого является высокая сложность интерпретации данных, связанная с рядом особенностей распространения радиосигналов этого диапазона в волноводе Земля–ионосфера. Сильные искажения сигналов, вызванные горизонтально неоднородной ионосферой [Ахметов и др., 2021в], не позволяют использовать длинные (более 100–200 км) радиотрассы для задач мониторинга. Отсутствие численных оценок изменений амплитуды и фазы сигналов в тех или иных гелиогеофизических условиях и оценок влияния проводимости литосферы также усложняет интерпретацию данных регистрации радиосигналов сигналов ОНЧ.

Целью данной работы является определение изменений амплитуд электрической и магнитной компонент сигналов системы РСДН-20, а также скорости их распространения в условиях SPE. В работе исследовано влияние нижней границы волновода Земля–ионосфера в случаях распространения сигналов РСДН-20 над поверхностью суши и океана во время SPE, получены численные оценки изменения амплитуды и фазы сигналов при распространении в высокоширотном участке волновода во время SPE-событий.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследования проводились с помощью численной модели распространения электромагнитных волн, разработанной в Полярном геофизическом институте [Мингалев и др., 2018]. Профили электронной концентрации для событий были получены с использованием данных радара некогерентного рассеяния VHF EISCAT, расположенного вблизи г. Тромсё (Норвегия), и модели ионосферы GlobalDynamicModelofIonosphere (GDMI) [Shubin, 2015; Шубин, 2017]. Частоты столкновений в вычислительных экспериментах рассчитывались с использованием модели NRLMSISE. Геомагнитное поле, необходимое для моделирования, рассчитывалось по модели International Geomagnetic Reference Field 13-й генерации (IGRF13) [Alken et al., 2021]. Для возмущенных условий 23 января в 11:00 UTC были проведены два эксперимента для выявления влияния литосферы на регистрируемые амплитуды сигналов на уровне поверхности Земли. Один численный эксперимент проведен с литосферой, соответствующей океану, а второй численный эксперимент проведен с литосферой, соответствующей переходу океан–суша.

3. ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ

В работе рассмотрены протонные события GLE66 30 октября 2003 г. и SPE 23 января 2012 г.

30 октября 2003 г. Вспышечные события, наблюдавшиеся в октябре–ноябре 2003 г., являются

самыми мощными проявлениями 23-го цикла солнечной активности [Веселовский и др., 2004; Gopalswamy et al., 2012]. Событие GLE66 произошло 29 октября (21:05 UT), в этот и следующий день наблюдался повышенный уровень солнечных протонов. 28 октября 2003 г. (11:20 UT) произошло событие GLE 65. То есть 30 октября 2003 г. произошло наложение эффектов от двух GLE-событий. По интенсивности событие GLE 65 ($J = 29500 \text{ p (cm}^2 \text{ с стер)}^{-1}$) заметно превосходило GLE 66 ($J = 3300 \text{ p (cm}^2 \text{ с стер)}^{-1}$). Нами было рассмотрено событие 30 октября 2003 г., поскольку именно для этого дня имелись данные радара EISCAT. Для события 30 октября 2003 г. с целью выявления зависимости амплитуды и фазы сигналов РСДН-20 проведено 5 вычислительных экспериментов. Два — для спокойных условий 31 октября в 04:00 UT и в 12:00 UT. Два — для возмущенных условий 30 октября в то же время. И один дополнительный эксперимент с профилями ионосферных параметров, полученных по модели GDMI для 31 октября в 12:00 UT, для сравнения с реалистичной ионосферой, полученной по данным EISCAT.

23 января 2012 г. Три последовательные и перекрывающиеся во времени вспышки на Солнце (C2.5/SF, M1.1/1N и M8.7) произошли в активной области NOAA 11402 (расположенной на N25 W20) 23 января 2012 г. Максимальная фаза первой вспышки (C2.5) наблюдалась около 01:50 UT, для второй вспышки (M1.1) — около 03:15 UT, а третья достигла максимума около ~03:59 UT. По данным спутников GOES протонное событие достигло максимума в 15:30 UT 23 января 2012 г. Уровень потоков составлял $6310 \text{ p (cm}^2 \text{ с стер)}^{-1}$ по данным спутников GOES для протонов с энергией $>10 \text{ МэВ}$. Данное протонное событие не относится к классу GLE. Для события SPE 23 января 2012 г. проведено 4 вычислительных эксперимента, по два для спокойных условий 22 января и возмущенных 23 января, в 03:00 UTC и в 11:00 UTC [Makhmutov et al., 2013].

4. ОБЛАСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УСЛОВИЯ СРЕД РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Профили электронной концентрации представлены на рис. 1 и рис. 2 для дат 30–31 октября 2003 г. и 22–23 января 2012 г. соответственно. На рисунках спокойные условия показаны сплошной линией, а возмущенные прерывистой линией. В панелях *a* и *b* показаны профили для условий ночи и дня соответственно. На рисунке 1б пунктирной линией показан высотный профиль концентрации электронов, полученный по модели ионосферы GDMI, для условий дня 30 октября 2003 г. в точке с координатами, соответствующими г. Тромсё, Норвегия. Остальные профили построены по данным радара некогерентного рассеяния VHF

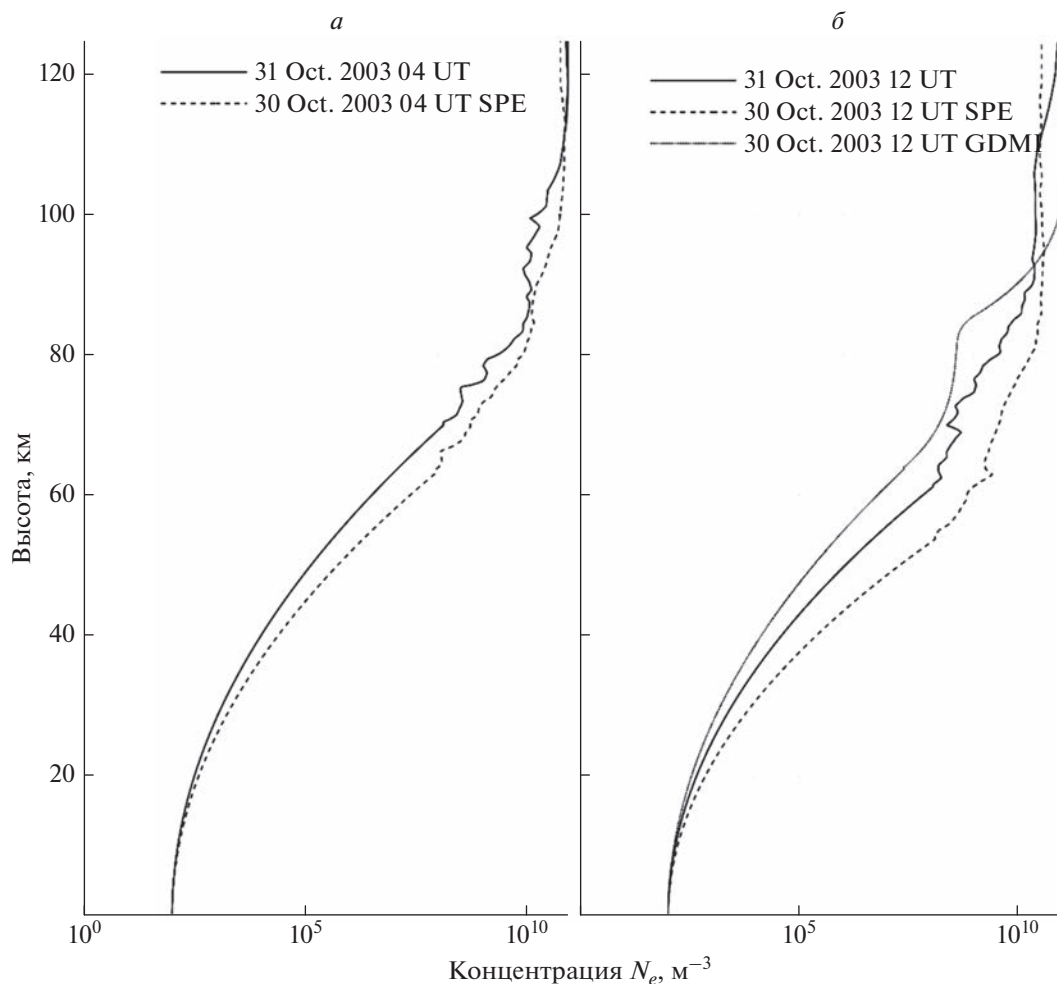


Рис. 1. Высотные профили электронной концентрации для 30–31 октября 2003 г. в панелях (а) 04 UT и (б) 12 UT.

EISCAT (Тромсё, Норвегия). Все профили начинаются с высот 60–70 км, ниже концентрация электронов экстраполировалась к значению 100 м^{-3} . Модель GDMI так же, как IRI или другие общие модели ионосферы, не воспроизводит повышение концентрации, вызванное вторжением высокоэнергичных солнечных протонов, поэтому ее профиль, рассчитанный для даты и времени протонного события, более соответствует спокойным условиям.

Частота столкновений электронов с нейтралами и ионами была рассчитана на основе профилей электронной концентрации и данных модели NRLMSISE2000 с использованием формул из книги Schunk and Nagy [2009] стр. 109.

Профиль проводимости литосферы на суше был задан с учетом результатов исследований, полученных несколькими научными группами, и опубликованных в работе [Korja et al., 2002]. В океане использовалась однородная литосфера с $\sigma = 2$ и $\epsilon = 81$.

Численные 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 $256 \times 1000 \text{ км}$ 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 [Berenger, 1994].

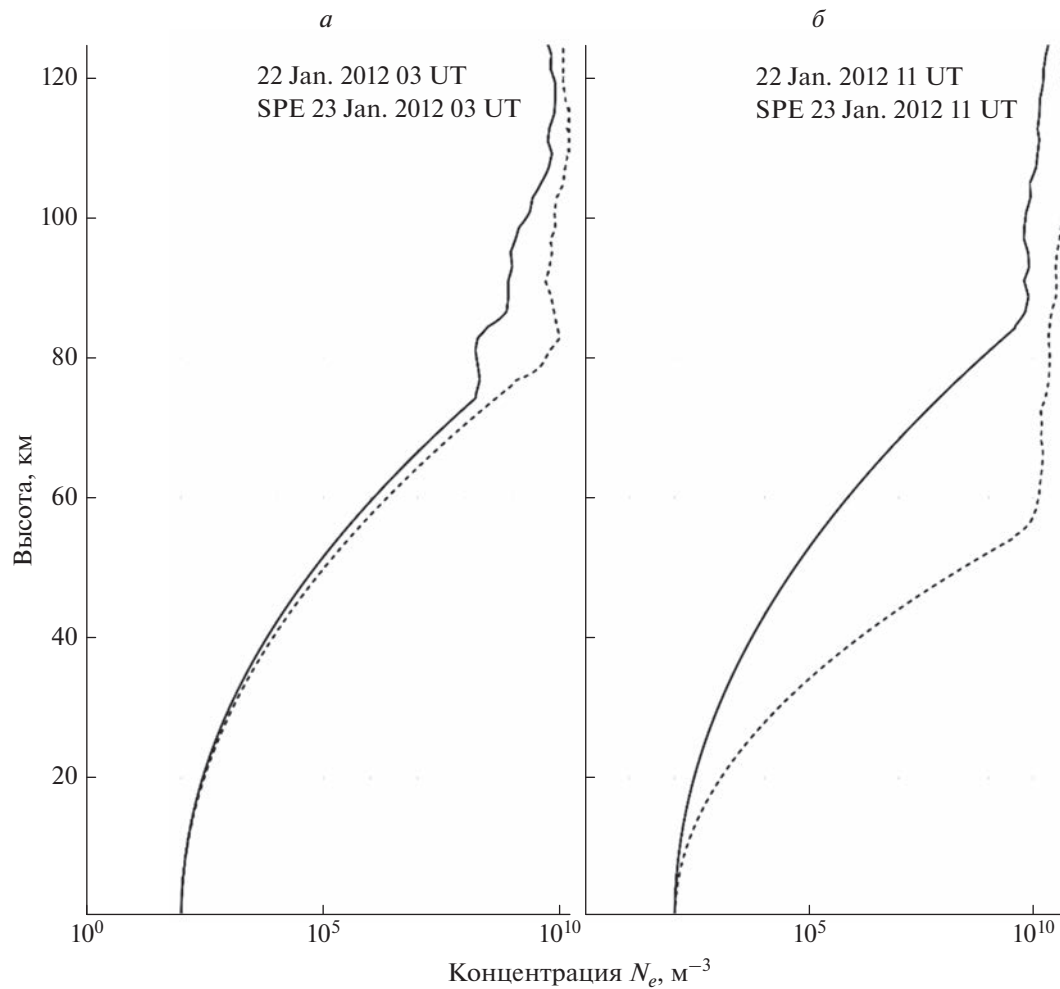


Рис. 2. Высотные профили электронной концентрации для 22–23 января 2012 г. в панелях (а) 03 UT и (б) 11 UT.

Сигнал источника представлял собой сумму синусоид на частотах системы РСДН-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.

5. МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИГНАЛОВ

Модель распространения электромагнитных сигналов, разработанная в ПГИ, основана на численном интегрировании системы уравнений Максвелла вместе с замыкающим эту систему линейным уравнением движения электронов в ионосферной плазме. Метод использует ряд

новых приемов и имеет ряд важных преимуществ по сравнению с традиционным методом конечных разностей во временной области (КРВО). В разработанном методе электрическое и магнитное поля вычисляются в одни и те же моменты времени в одинаковых узлах пространственной сетки, а также используется расщепление по пространственным направлениям и физическим процессам. На шагах распространения по пространственным направлениям используется противопотоковая аппроксимация пространственных производных (метод Годунова с коррекцией потоков) [Годунов и Куликов, 2014]. А на каждом шаге учета вращения и затухания поля вместо конечно-разностной аппроксимации производной по времени используется точное решение соответствующей 6-мерной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. При помощи нового метода с хорошей точностью был воспроизведен ряд важных физических эффектов распространения волн в волноводе Земля–ионосфера. В частности, в работе [Ахметов и др., 2019б] про-

Таблица 1. Затухание сигнала РСДН-20 в пересчете на км радиотрассы

Вычислительный эксперимент	Потери энергии, %/км	Затухание E, %/км	Затухание H, %/км
Тромсё. SPE 30 октября 2003 г., 04 UT			
“31oct2003 11905 Гц”	0.240678	0.127209	0.112714
“31oct2003 12649 Гц”	0.276668	0.145651	0.133934
“31oct2003 14881 Гц”	0.263436	0.139311	0.13582
“SPE 30oct2003 11905 Гц”	0.306162	0.162255	0.155929
“SPE 30oct2003 12649 Гц”	0.337245	0.178869	0.17244
“SPE 30oct2003 14881 Гц”	0.243411	0.127738	0.123848
Тромсё. SPE 30 октября 2003 г., 12 UT			
“GDMI 30oct2003 11905 Гц”	0.279985	0.148221	0.1394
“GDMI 30oct2003 12649 Гц”	0.316359	0.166765	0.160563
“GDMI 30oct2003 14881 Гц”	0.259782	0.136315	0.134038
“31oct2003 11905 Гц”	0.327718	0.173162	0.168238
“31oct2003 12649 Гц”	0.357219	0.189466	0.184873
“31oct2003 14881 Гц”	0.261538	0.138388	0.133867
“SPE 30oct2003 11905 Гц”	0.41121	0.221513	0.217786
“SPE 30oct2003 12649 Гц”	0.427975	0.229802	0.226715
“SPE 30oct2003 14881 Гц”	0.326614	0.173385	0.170827
Тромсё. SPE 23 января 2012 г., 03 UT			
“22jan2012 3UT 11905 Гц”	0.181799	0.0913188	0.0893064
“22jan2012 3UT 12649 Гц”	0.249305	0.126725	0.128175
“22jan2012 3UT 14881 Гц”	0.264272	0.136587	0.138469
“SPE 23jan2012 3UT 11905 Гц”	0.556011	0.307182	0.305686
“SPE 23jan2012 3UT 12649 Гц”	0.552423	0.303438	0.302468
“SPE 23jan2012 3UT 14881 Гц”	0.429361	0.231117	0.229702
Тромсё. SPE 23 октября 2015 г., 11 UT			
“22jan2012 11UT 11905 Гц”	0.172702	0.0875821	0.0810475
“22jan2012 11UT 12649 Гц”	0.316817	0.164762	0.167633
“22jan2012 11UT 14881 Гц”	0.395985	0.20532	0.225009
“SPE 23jan2012 11UT 11905 Гц”	0.581663	0.324073	0.320813
“SPE 23jan2012 11UT 12649 Гц”	0.576904	0.318938	0.31742
“SPE 23jan2012 11UT 14881 Гц”	0.459178	0.24825	0.247094

Примечание. Серым цветом отмечены возмущенные условия.

демонстрировано хорошее соответствие расчетных волновых характеристик с известными экспериментальными данными [Lebed et al., 2017; Larchenko et al., 2018] для такого тонкого эффекта, как поляризация волн ионосферного источника в высокоширотной замагниченной ионосферной плазме. Модель имеет опубликованное описание [Мингалев и др., 2018], протестирована на задачах с известными точными аналитическими решениями [Akhmetov et al., 2018]. Неоднократно применялась для решения задач распространения электромагнитных волн в волноводе Земля–ионосфера [Ахметов и др., 2019а, 2021а, 2021б].

6. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В статье рассматриваются два события SPE с точки зрения распространения ОНЧ-сигналов системы РСДН-20 в высокоширотной области. Результаты численных оценок затухания амплитуды и фазовой задержки для всех анализируемых в работе случаев были сведены в две общие таблицы. В табл. 1 представлены оценки ослабления амплитуд магнитной и электрической составляющих электромагнитной волны и потерь энергии в процентах, приведенных к 1 км радиотрассы. В табл. 2 представлены оценки запаздывания маг-

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. SPE 30 (GLE 66) октября 2003 г., 04 UT			
“31oct2003 11905 Гц”	0.0146209	0.0219159	0.0217099
“31oct2003 12649 Гц”	0.0114504	0.0176644	0.0167182
“31oct2003 14881 Гц”	0.00783274	0.00989578	0.00910698
“SPE 30oct2003 11905 Гц”	0.0151856	0.0251155	0.0252268
“SPE 30oct2003 12649 Гц”	0.0127703	0.019898	0.0185305
“SPE 30oct2003 14881 Гц”	0.00799709	0.0121774	0.0117928
Тромсё. SPE 30 (GLE 66) октября 2003 г., 12 UT			
“GDMI 30oct2003 11905 Гц”	0.0151961	0.0224768	0.0221088
“GDMI 30oct2003 12649 Гц”	0.0121339	0.0183243	0.0176964
“GDMI 30oct2003 14881 Гц”	0.00799634	0.010873	0.0105521
“31oct2003 11905 Гц”	0.0162568	0.0265743	0.0250244
“31oct2003 12649 Гц”	0.0125742	0.0192411	0.0199322
“31oct2003 14881 Гц”	0.0080247	0.0116785	0.0116827
“SPE 30oct2003 11905 Гц”	0.0135013	0.0242763	0.0239856
“SPE 30oct2003 12649 Гц”	0.0116747	0.0186586	0.0192697
“SPE 30oct2003 14881 Гц”	0.00871178	0.0121396	0.0117093
Тромсё. SPE 23 января 2012 г., 03 UT			
“22jan2012 03 UT 11905 Гц”	0.0171571	0.0257283	0.0241661
“22jan2012 03 UT 12649 Гц”	0.0123451	0.0202134	0.0193831
“22jan2012 03 UT 14881 Гц”	0.00710067	0.00741321	0.00863405
“SPE 23jan2012 03 UT 11905 Гц”	0.0152374	0.0223968	0.0218158
“SPE 23jan2012 03 UT 12649 Гц”	0.0112347	0.0165808	0.0170667
“SPE 23jan2012 03 UT 14881 Гц”	0.0106179	0.011965	0.0114507
Тромсё. SPE 23 октября 2015 г., 11 UT			
“22jan2012 11UT 11905 Гц”	0.0129858	0.0213077	0.0191338
“22jan2012 11UT 12649 Гц”	0.0096322	0.0174474	0.0135822
“22jan2012 11UT 14881 Гц”	0.00679729	0.00789902	0.00648728
“SPE 23jan2012 11UT 11905 Гц”	0.0166962	0.0234595	0.0232947
“SPE 23jan2012 11UT 12649 Гц”	0.0117584	0.018142	0.0173659
“SPE 23jan2012 11UT 14881 Гц”	0.00860066	0.0106172	0.0104043

Примечание. Серым цветом отмечены возмущенные условия.

нитной и электрической составляющих электромагнитной волны и вектора потока энергии от той же волны, распространяющейся в вакууме со скоростью света в радианах, приведенной к 1 км радиотрассы. На рис. 3 представлены зависимости амплитуды электрического поля сигнала от расстояния до источника, типом линии показаны частоты системы РСДН-20. На рис. 3а линиями разного оттенка серого представлены амплитуды поля E сигналов системы РСДН-20, распространяющихся в спокойных условиях 22 января и во

время SPE 23 января. На рис. 3б линиями разного оттенка серого представлены амплитуды поля E во время SPE 23 января при различной литосфере: вся область — суша, вся область — океан, переход океан—суша.

7. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В первую очередь необходимо отметить ряд ограничений в интерпретации результатов, свя-

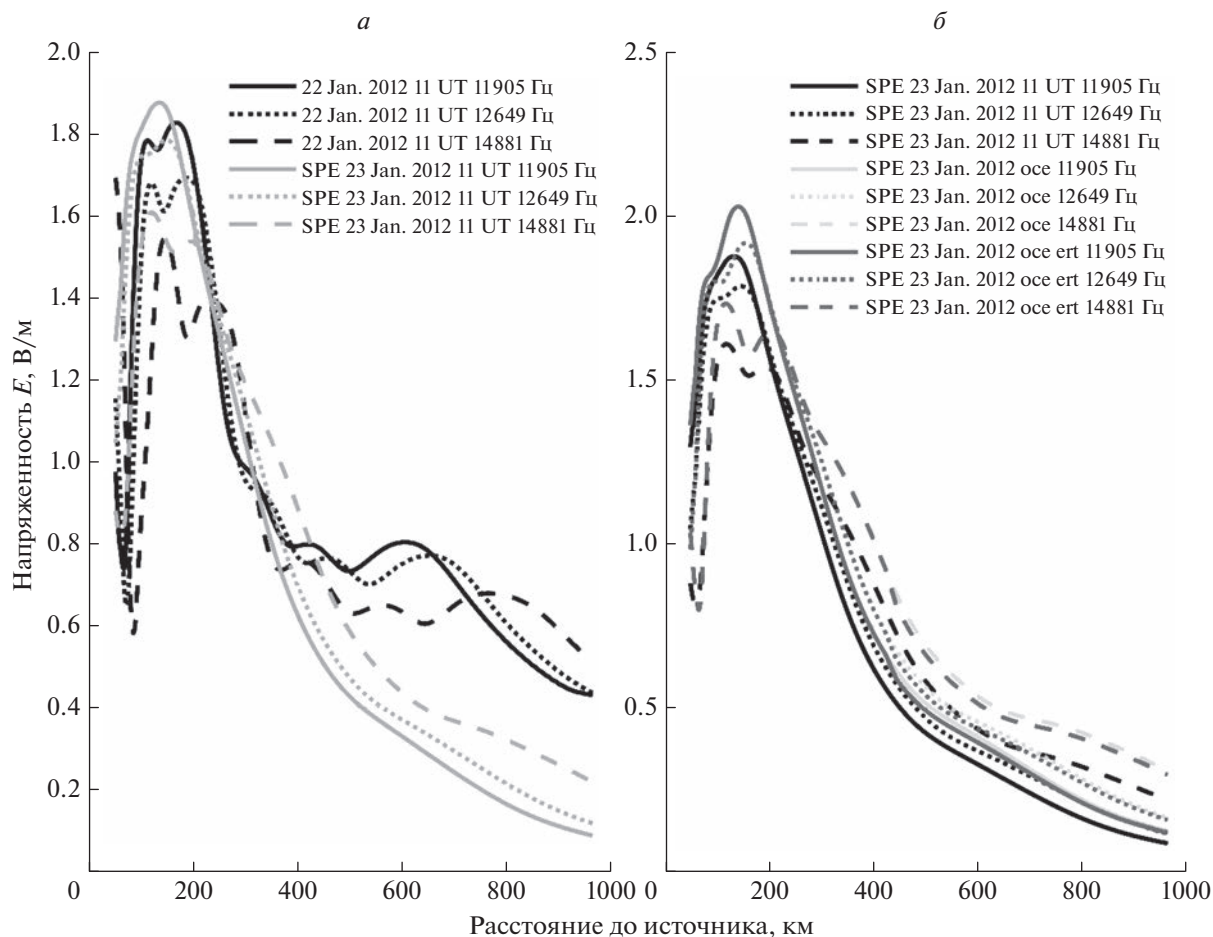


Рис. 3. Зависимости амплитуды электрического поля сигнала от расстояния до источника, типом линии показаны частоты системы РСДН-20. На панели (а) представлены амплитуды сигналов, распространяющихся в спокойных условиях 22 января и во время SPE 23 января. На панели (б) представлены амплитуды поля E во время SPE 23 января при различной литосфере: вся область — суша, вся область — океан, переход океан—суша.

занных с модельной природой полученных данных. На рис. 3 представлены графики амплитуды сигналов в зависимости от расстояния до источника для случая 23 января 2012 г. в 11 UT, аналогичным образом выглядят графики амплитуды сигналов и для других обсуждаемых в работе случаев. На рис. 3 заметен существенно разный характер затухания вблизи источника ($\sim$ до 300 км) и на удалении от него. Несмотря на задание источника плоскостью в области моделирования, реализующей гигантскую антенну, призванную уйти от интерференционных особенностей поведения сигналов в ближней зоне, из-за расхождения структуры поля и условий среды возникают вторичные источники сигнала, делающие анализ амплитуд и фаз сигналов вблизи излучающей плоскости нецелесообразным. Таким образом, из всей модельной области реально для анализа поведения сигналов, связанных с особенностями ионосферы в условиях вторжения солнечных

протонов, может использоваться только небольшая, дальняя от источника часть в направлении распространения. Второе важное ограничение модельных результатов — горизонтально однородная ионосфера. В реальности, в условиях вторжения высокоэнергетических частиц в полярную ионосферу, области горизонтально однородной ионосферы вероятно будут иметь незначительные размеры на фоне общей сильно горизонтально неоднородной структуры электронной плотности. В работе [Ахметов и др., 2021в] показано, что горизонтальные неоднородности ионосферной плазмы вносят сильные искажения в амплитуду и фазу сигналов РСДН-20. В той же работе показан нелинейный характер зависимости искажений от направления прохождения сигнала через область горизонтально неоднородной ионосферы. В связи с вышеизложенным можно сделать вывод, что обсуждаемые далее оценки изменений амплитуды и фазы сигналов РСДН-20, вызван-

ные SPE, носят исключительно локальный характер. Авторы не могут рекомендовать их применение для вычисления точных значений амплитуд и фаз сигналов, распространяющихся на продолжительных высокоширотных радиотрассах (более 100–200 км). Полученные результаты предназначены в первую очередь для качественной оценки состояния ионосферы по данным достаточно густой сети регистрирующих станций с расстоянием между пунктами регистрации порядка 100–200 км, регистрирующих сигналы далеких источников.

Практически во всех численных экспериментах эффект от увеличения концентрации на высотах *D*-слоя и ниже приводит к снижению амплитуды в результате повышенного сопротивления волновода (табл. 1), что согласуется с результатами эмпирических исследований сигналов в диапазоне ОНЧ [Cummer et al., 1997; Maugra et al., 2018]. Из табл. 1 и рис. 1 и 2 видно, что эффект затухания амплитуд тем сильнее, чем больше концентрация электронов на высотах 70–80 км. Кроме того, хорошо заметна частотная зависимость затухания: высокие частоты затухают меньше, чем более низкие, что, видимо, связано с глубиной проникновения сигналов в области ионосферы с высокой концентрацией электронов. Низкочастотные сигналы проникают глубже, вследствие чего затухают сильнее. Аналогичная частотная зависимость наблюдается и при распространении над сушей и океаном. Так, при пересечении сигналом береговой линии с океана на сушу потери энергии увеличиваются на 0.000329%/км на частоте 11905 Гц; на 0.000153%/км на частоте 12649 Гц; на 0.000082%/км на частоте 14881 Гц. В целом разница при распространении над сушей или океаном незначительна на фоне влияния ионосферной электронной плотности, что позволяет ею пренебречь на коротких радиотрассах 100–200 км.

Поведение фазовой задержки табл. 2 менее предсказуемо: при увеличении концентрации она может как увеличиваться — случаи 30 октября 2003 г. в 04 UT и 23 января 2017 г. в 11 UT, так и уменьшаться на частотах 11905 и 12649 Гц во время SPE 30 октября 2003 г. в 12 UT и 23 января 2017 г. в 03 UT. Интересно, что задержка во всех случаях увеличивалась на частоте 14881 Гц. Это говорит о сложном характере отражения сигналов от ионосферы, затрагивающем значительную область как по вертикали, так и по горизонтальным координатам. В целом изменение фазы, вызванное SPE-событиями, не велико. Дополнительная задержка потока энергии сигнала при пересечении береговой линии со стороны океана составила 0.0012929 рад/км на частоте 11905 Гц; на 0.0023423 рад/км на частоте 12649 Гц; на — 0.002278 рад/км на частоте 14881 Гц. Такие изменения могут быть сравнимы с изменениями, вызванными SPE-событиями.

Резюмируя вышеизложенное, можно сформулировать требования к системам регистрации, которые могут быть использованы для локального мониторинга ионосферы с целью выдачи прогноза по условиям радиосвязи в диапазоне ОНЧ: радиотрасса должна состоять из двух пунктов регистрации, расположенных на одной линии с источником. Пункты регистрации должны быть удалены от источника на значительное расстояние для исключения влияния интерференции мод, распространяющихся с разным волновым вектором. В случае использования естественных источников, например, молниевых разрядов, необходимо регистрировать совместно с электрическими и магнитные компоненты для обеспечения селекции сигналов по углам прихода. В случае привлечения фазовых характеристик для анализа состояния ионосферы необходимо обеспечить качественную синхронизацию регистрируемых сигналов с мировым временем и учесть особенности проводимости литосферы на радиотрассе.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены два SPE-события с точки зрения их влияния на распространение ОНЧ-сигналов системы РСДН-20 в высокоширотном регионе. В результате обработки данных вычислительных экспериментов получено, что в условиях SPE-событий наблюдаются в основном амплитудные искажения ОНЧ-сигналов. При этом влияние протонных событий сильнее сказывается на амплитудах в дневное время. Существует частотная зависимость влияния высыпаний высокоэнергетических протонов на сигналы РСДН-20: сигналы меньшей частоты реагируют на такие события сильнее.

Фазы сигналов РСДН-20 менее подвержены влиянию слабых SPE. На частоте 14881 Гц при незначительном, менее порядка, увеличении концентрации электронов в *D*- и *E*-слоях ионосферы наблюдается незначительное снижение фазовой задержки. На меньших частотах и в случае увеличения концентрации в области отражения более чем на порядок фазовая задержка возрастает также незначительно.

Исследовано влияние проводимости литосферы на амплитуды и фазы сигналов РСДН-20, показано слабое влияние проводимости на амплитуды сигналов и более выраженное — на скорость их распространения.

Сделаны оценки затухания амплитуд сигналов и задержки фазы в различных геофизических условиях. Оценки могут быть использованы на коротких радиотрассах 100–200 км в области высоких широт для мониторинга состояния ионосферы.

Сформулированы требования к таким радиотрассам.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018) (<https://rscf.ru/project/18-77-10018/>) (Ахметов О.И., Белаховский В.Б.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Суворова З.В., Белаховский В.Б., Черняков С.М. Определение характеристик ИЧЧ-волн, наиболее сильно реагирующих на незначительные изменения электронной плотности ионосферы в области высоких широт // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 4. С. 99–109. 2019a. <https://doi.org/10.12737/szf-54201911>
- Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Суворова З.В. Тестирование численной схемы интегрирования уравнений Максвелла для широкополосных сигналов на задаче распространения электромагнитных волн от ионосферного источника // Труды кольского научного центра РАН. Т. 8. С. 193–198. 2019b. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8.193-198>
- Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Распространение электромагнитных волн в области высоких широт при различных состояниях ионосферы на частотах системы радионавигации РСДН-20 (АЛЬФА) // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 61. № 3. С. 366–378. 2021a. <https://doi.org/10.31857/S0016794021030020>
- Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Распространение электромагнитных волн в области высоких широт при различных состояниях ионосферы на частотах системы точного времени бета // Изв. РАН. Сер. физическая. Т. 85. № 3. С. 315–320. 2021b. <https://doi.org/10.31857/S0367676521020034>
- Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В. Моделирование процесса распространения сигналов радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 Альфа в участках волновода Земля–ионосфера с горизонтально неоднородным распределением концентрации электронов // Physics of Auroral Phenomena. Т. 44. С. 67–70. 2021в. <https://doi.org/10.51981/2588-0039.2021.44.015>
- Веселовский И.С., Панасюк М.И., Авдюшин С.И. и др. Солнечные и гелиосферные явления в октябре–ноябре 2003 г.: причины и следствия // Космич. исслед. Т. 42. № 5. С. 1–57. 2004. <https://doi.org/10.1023/B:COSM.0000046229.24716.02>
- Годунов С.К., Куликов И.М. Расчет разрывных решений уравнений гидродинамики с гарантией неубывания энтропии // Журн. вычислительной математики и математической физики. Т. 54. № 6. С. 1008–1021. 2014. <https://doi.org/10.7868/S0044466914060088>
- Мингалев И.В., Мингалев О.В., Ахметов О.И., Суворова З.В. Явная схема расщепления для уравнений Максвелла // Математическое моделирование. Т. 30. № 12. С. 17–38. 2018.
- Стародубцев С.А., Баишев Д.Г., Григорьев В.Г., Каримов Р.Р., Козлов В.И., Корсаков А.А., Макаров Г.А., Моисеев А.В. Анализ солнечных, космо- и геофизических событий в сентябре 2017 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН // Солнечно-земная физика. Т. 5. № 1. С. 17–38. 2019. <https://doi.org/10.12737/szf-51201903>
- Шубин В.Н. Глобальная эмпирическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы для спокойных геомагнитных условий // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 4. С. 450–462. 2017. <https://doi.org/10.1134/S0016794019040151>
- Alken P., Thébaud E., Beggan C.D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. V. 73. P. 1–25. 2021. <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Akhmetov O.I., Mingalev V.S., Mingalev I.V., Mingalev O.V. Solution of the cauchy problem for the three-dimensional telegraph equation and exact solutions of maxwell's equations in a homogeneous isotropic conductor with a given exterior current source // Computational Mathematics and Mathematical Physics. V. 58. № 4. P. 604–611. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0965542518040036>
- Bashkuev Y., Advokatov V., Buyanova D., Pushkarev M. 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”. id. 01002. 2018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/2018620100>
- Beloglazov M.I., Beloglazova G.P., Vashenyuk E.V., Petrova G.A., Shumilov O.I., Shishaev V.A., Zabavina I.N., Nesterov V.I. The ionospheric effects in D-layer and solar proton precipitation zones during the 16 February 1984 event // Planet. Space Sci. V. 38. № 12. P. 1479–1486. 1990. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(90\)90154-I](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90154-I)
- Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // J. Computational Phys. V. 114. № 2. P. 185–200. 1994. <https://doi.org/10.1006/JCPH.1994.1159>
- Clilverd M., Seppälä A., Rodger C., Thomson N., Verronen P., Turunen E., Ulich T., Lichtenberger J., Steinbach P. Modeling polar ionospheric effects during the October–November 2003 solar proton events // Radio Sci. V. 41. id RS2001. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005RS003290>
- Clilverd M., Rodger C., Thomson N. et al. Remote sensing space weather events: the AARDDVARK network // Space Weather. V. 7. Id. S04001. 2009. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2014.6929921>
- Cummer S.A., Bell T.F., Inan U.S., Chenette D.L. VLF remote sensing of high-energy auroral particle precipitation // J. Geophys. Res. V. 102. A4. P. 7477–7484. 1997. <https://doi.org/10.1029/96JA03721>
- Gopalswamy N., Xie H., Yashiro S., Akiyama S., Mäkelä P., Usoskin I.G. Properties of Ground Level Enhancement Events and the Associated Solar Eruptions During Solar Cycle 23 // Space Sci. Rev. V. 171. P. 23–60. 2012. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.0688>
- Jacobsen T. The Russian VLF navaid system alpha, RSDN-20. <http://www.vlf.it/alphatrunder/alpha.htm/2022>.
- Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., et al. Crustal conductivity in Fennoscandia — a compilation. № 5.

- P. 535–558. 2002.
<https://doi.org/10.1186/BF03353044>
- Knipp D., Ramsay A., Beard E., Boright A., Cade T., Hewins I., McFadden R., Denig W., Kilcommons L., Shea M., Smart D. The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses // *Space Weather*. V. 14. P. 614–633. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2016sw001423>
- Larchenko A.V., Pilgaev S.V., Lebed O.M., Fedorenko Yu.V. Features of the structure of the VLF electromagnetic field on the arch. Spitsbergen in experiments on heating the ionosphere // *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. V. 3. P. 115–119. 2018.
- Lebed O.M., Pilgaev S.V., Nikitenko A.S., Larchenko A.V., Fedorenko Yu.V. Estimation of the height of the ionospheric source formed during HF heating by the EISCAT / heating stand based on phase measurements at a network of high-latitude stations in calm and disturbed helio-geophysical conditions // *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. V. 4. P. 67–74. 2017.
- Lynn K.J.W. A relationship between solar proton events, ionospheric uplift observed at VLF and negative ionospheric storms // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 105. P. 61–65. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.07.009>
- Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Y.I. et al. Solar proton event on January 23, 2012 / 33RD international cosmic ray conference. Rio de Janeiro. P. 1440. 2013.
- Maurya A.K., Venkatesham K., Kumar S., Singh R., Tiwari P., Singh A.K. Effects of St. Patrick's Day geomagnetic storm of March 2015 and of June 2015 on low-equatorial D region ionosphere // *J. Geophys. Res. — Space*. V. 123. P. 6836–6850. 2018.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025536>
- Potemra T.A., Zmuda A.J., Haave C.R., Shaw B.W. VLF phase perturbations produced by solar protons in the event of February 5, 1965 // *J. Geophys. Res.* V. 72. P. 6077–6089. 1967.
- Schunk R., Nagy A. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry* (2nd ed., Cambridge Atmospheric and Space Science Series). Cambridge: Cambridge University Press. 355 p. 2009.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511635342>
- Shubin V.N. Global median model of the F2-layer peak height based on ionospheric radio-occultation and ground-based Digisonde observations // *Adv. Space Res.* V. 56. P. 916–928. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.029>
- Zigman V., Kudela K., Grubor D. Response of the Earth's lower ionosphere to the Ground Level Enhancement event of December 13, 2006 // *Adv. Space Res.* V. 53. P. 763–775. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.026>