
**ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ
НА РАБОТУ РАДИОСРЕДСТВ****SPACE WEATHER IMPACT
ON RADIO DEVICE OPERATION**

О.И. Бернгардт*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, berng@iszf.irk.ru***O.I. Bergardt***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, berng@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе проведен обзор влияния факторов космической погоды на работу радиосредств. Обзор основан на работах, монографиях и стратегических научных планах исследования космической погоды последних лет. Основное внимание уделено влиянию ионосферных процессов, обусловленных космической погодой, на распространение радиоволн, в основном коротких. Приведены некоторые примеры такого влияния на основе данных радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН на 2012–2016 гг.: ослабление сигналов возвратно-наклонного зондирования во время солнечных вспышек, эффекты перемещающихся ионосферных возмущений различных масштабов в сигналах возвратно-наклонного зондирования, эффекты магнитосферных волн в сигналах ионосферного рассеяния.

Ключевые слова: космическая погода, аппаратурные эффекты.

Abstract. This paper reviews the space weather impact on operation of radio devices. The review is based on recently published papers, books, and strategic scientific plans of space weather investigations. The main attention is paid to ionospheric effects on propagation of radiowaves, basically short ones. Some examples of such effects are given based on 2012–2016 ISTP SB RAS EKB radar data: attenuation of ground backscatter signals during solar flares, effects of travelling ionospheric disturbances of different scales in ground backscatter signals, effects of magnetospheric waves in ionospheric scatter signals.

Keywords: space weather, technical effects.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы влияния космической погоды на развитие технологическое общество, и в частности на работу радиоэлектронных средств, в последнее время встают особенно остро. В связи с вовлечением компьютерных и роботизированных средств в большую часть нашей повседневной жизни встает естественный вопрос: насколько устойчиво и корректно будет работать эта радиоэлектронная аппаратура (не всегда контролируемая обычными пользователями) и ее программное обеспечение при изменении внешних условий [Goodman, Aarons, 1990].

Проблема возникла достаточно давно в связи с помехами на системах проводной связи [Barlow, 1849] и сбоями аппаратуры на сетях электропередач [Love, Coisson, 2016], особенно значительными в высоких широтах.

В настоящее время наблюдается резкое нарастание количества высокоточной техники, иногда имеющей особенности, несущественные в типичных условиях. Однако в условиях, отличающихся от ожидаемых, подобные особенности могут быть критичными для функционирования радиоэлектронных устройств, в том числе и бытовых приборов [Whiteson et al., 2014], используемых практически повсеместно.

Проблема воздействия космической погоды на радиосредства для регулярных потребителей стала наиболее заметна при анализе данных глобальных

систем позиционирования, являющихся в настоящее время де-факто основным элементом систем позиционирования и временной привязки. Как оказалось, основная функция этой системы — точное определение местоположения — зависит от характеристик окружающей среды. В частности, во время геомагнитных возмущений системы могут чаще и сильнее ошибаться, а иногда и отказывать [Afraimovich et al., 2004; Афраймович и др., 2007; Kim et al., 2014]. Этот эффект проявляется не только при позиционировании наземных, но и космических объектов [Xiong et al., 2016].

Внезапные возмущения космической погоды, приводящие к мощным рассеянным сигналам на установках радиолокации, радиосвязи и радиозондирования [Багаряцкий, 1961; Свердлов, 1982], требуют развития систем прогноза подобных помех и уменьшения степени их влияния на радиоаппаратуру.

Таким образом, оценка влияния космической погоды на работу радиосредств, прогноз последствий такого влияния, готовность к проблемам, вызванным таким влиянием, и ликвидация его возможных последствий являются насущными задачами, стоящими перед любым обществом, достаточно развитым технологически [The Sun to the Earth — and Beyond..., 2003; Solar and Space Physics..., 2013]. Промежуток между запуском оборудования в эксплуатацию, возникновением проблем его функционирования при эксплуатации и созданием и вводом в строй нового, более устойчивого оборудования во

многих случаях составляет несколько лет. Особенно высоки эти сроки для космических средств. Естественным решением этой проблемы будут учет возможности отказа и оценка влияния эффектов космической погоды на конечный результат работы этого оборудования до его замены на новое, а также предсказание периодов возможных сбоев.

Обычно задача оценки влияния космической погоды на разные сферы человеческой деятельности и уменьшения последствий этого влияния решается различными способами — от введения в действие национальных стратегий [Solar and Space Physics..., 2013; National Space Weather Strategy, 2015], планов [National Space Weather Action Plan, 2015], законодательных актов [Obama, 2016] и доступного информирования [Space Weather — Effects on Technology, 2012] до привлечения энтузиастов и возможностей бытовых устройств и компьютеров (так называемая народная наука, citizen science [Barnard et al., 2014; Aurorasaurus, 2016; Wikipedia, 2016]). Проводится стимулирование и поддержка различных систем мониторинга и прогноза, как глобальных [<http://www.swpc.noaa.gov/>], так и локальных, посвященных конкретным аспектам космической погоды [Love et al., 2016]. Детальные обзоры воздействия космической погоды на разные виды техники могут быть найдены в монографиях [The Sun to the Earth..., 2003; Solar and Space Physics..., 2013; Effects of Space Weather..., 2004; Goodman, 2005; Space Weather..., 2007].

К основным геоэффективным проявлениям космической погоды, активно исследуемым сегодня, можно отнести [National Space Weather Strategy, 2015]: солнечные радиовсплески, влияющие на работу приемных радиосредств; наведенные геоэлектрические поля, влияющие на проводные системы энергоснабжения и связи; ионизирующую радиацию, влияющую на работоспособность электронной аппаратуры и жизнедеятельность организмов; расширение верхних слоев атмосферы, ведущее к повышению температуры и плотности этих слоев и влияющее на динамику и время жизни искусственных спутников Земли; а также ионосферные возмущения, влияющие на процессы распространения и рассеяния радиоволн.

Начало развертывания в ИСЗФ СО РАН системы импульсных декаметровых когерентных радаров, в том числе и в рамках проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН», поднимает вопросы непрерывного мониторинга космической погоды для решения не только фундаментальных, но и прикладных задач, важных для технологически развитого общества.

ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Термин «суровая космическая погода» (severe space weather) возник сравнительно недавно для описания влияния солнечной и геомагнитной активности на работоспособность аппаратуры и функционирование инфраструктуры [Severe Space Weather Events, 2008; Solar and Space Physics, 2013], хотя проявления космической погоды известны очень

давно [Barlow, 1849]. На большую часть происходящих на Земле крупномасштабных явлений определяющее влияние оказывает ближайший к Земле источник излучения и частиц — Солнце. Хотя и существуют примеры обратного влияния человеческой деятельности на крупномасштабные природные процессы и искусственной генерации некоторых природных феноменов [Baker et al., 2014; Gombosi et al., 2017], однако основным и постоянным источником формирования космической погоды является Солнце. Поток частиц и излучения от Солнца, высокодинамичный в пространстве и времени, связан с внутренними солнечными процессами и, в связи с невозможностью проводить мониторинг глубинных процессов на Солнце в режиме реального времени, прогнозируем в основном в среднем. Человек по отношению к Солнцу выступает главным образом наблюдателем вариаций солнечной активности и исследователем регулярных процессов, происходящих в верхних слоях Солнца. Достаточно давно известны 11–12-летние циклы солнечной активности, связанные с переполусовкой магнитного поля Солнца и проявляющиеся во всех его параметрах, от уровня радиоизлучения ($F10.7$) до оптически наблюдаемого на протяжении уже несколько веков количества солнечных пятен (число Вольфа). Вращение Солнца вокруг своей оси с периодом 25–30 сут приводит также к периодическим вариациям потоков корпускулярно-волнового излучения.

Скорость движения таких потоков от Солнца к Земле различна: если волновое излучение распространяется со скоростью света и достигает зоны Земли примерно за 8 мин, то корпускулярная составляющая движется приблизительно в тысячу раз медленнее. Следовательно, если в первом случае движение излучения в большинстве задач можно считать прямолинейным и не учитывать движение объектов в Солнечной системе, то в случае движения частиц необходимо учитывать вращение Солнца, орбитальное движение Земли и ее суточное вращение и рассчитывать движение частиц по получающейся сложной траектории — с учетом геометрии (конуса) выхода потока частиц от Солнца и распределения их скоростей. Поэтому расчет влияния корпускулярно-волнового потока от Солнца, с учетом возможных задержек проявления эффектов, растяжения этих эффектов во времени и в пространстве (за счет разницы в скоростях частиц и углах их выхода от Солнца) [Odstreil, 2003], а также возможности накопления частиц в магнитосфере Земли (приводящей к дополнительным задержкам эффектов во времени), является сложной задачей. Решение этой задачи требует создания сложных физических моделей, в том числе и численных, больших вычислительных ресурсов, продолжительных и точных экспериментов, а также большого набора разнообразной диагностической аппаратуры в различных точках Земли и космического пространства, работающей в режиме постоянного мониторинга и передачи данных в центры их накопления, автоматической обработки и совместного моделирования в режиме реального времени. Существенным вкладом в решение этой задачи являются измерения этих потоков

спутниками ACE и DSCVR в точке Лагранжа L1, на расстоянии около 1 млн км от Земли. Они позволяют увеличивать точность и детальность краткосрочных предсказаний состава и динамики корпускулярно-волнового излучения [Machol et al., 2012] по сравнению с более заблаговременными, хотя и менее точными и детальными прогнозами на основе удаленных наблюдений за активностью Солнца в различные (наземные и космические) телескопы.

Корпускулярное излучение, достигая границы магнитосферы Земли, взаимодействует с ней. Траектории заряженных частиц существенно искривляются, и частицы начинают двигаться под сильным влиянием магнитного поля Земли. В свою очередь, такое движение порождает электрические поля и токи в магнитосфере.

Особое место при этом занимают высокоширотные области вокруг магнитных полюсов (каспы), где направление магнитного поля близко к вертикальному, что приводит к высыпанию заряженных частиц из магнитосферы в эту область по направлению к поверхности Земли. Наблюдаемые при этом оптические эффекты — полярное сияние (*auroga borealis*) — хорошо известны людям издавна и являются одним из следствий прихода солнечного возмущения в магнитосферу Земли. Регулярные наблюдения за подобными эффектами также ведутся с прошлого века и осуществляются как учеными с помощью различных специализированных оптических приборов: камер всего неба, фотометров, так и фотоаппаратами-любителями.

Высыпающиеся частицы приводят к изменению процессов ионизации-рекомбинации в нижних слоях ионосферы (D и E) и, в свою очередь, увеличивают электронную концентрацию в этих областях. Это повышение приводит к усилению поглощения радиоволн, что проявляется в понижении амплитуды или пропадании радиосигналов на трассах, проходящих через эти области.

Мониторинг подобных эффектов ведется посредством наблюдений за амплитудой радиосигналов на длинных радиотрассах (например, сетями наклонных ионозондов или путем приема сигнала радиовещательных станций) либо за амплитудой радиосигналов от космических источников (например, с помощью радиометров). Уменьшение амплитуды сигнала является также одним из следствий прихода в магнитосферу Земли частиц и излучения.

Разница потенциалов, возникающая вследствие разделения движущихся в солнечном ветре зарядов в магнитосфере Земли под действием магнитного поля, приводит к формированию продольных (вдоль магнитных силовых линий) токов. Эти токи замыкаются через E-слой ионосферы (высоты 90–120 км над поверхностью Земли), обладающий максимальной электропроводимостью вследствие особенностей распределений частот столкновений заряженных и нейтральных частиц. Формирующиеся при этом в E-слое полярной ионосферы сильные горизонтальные токи приводят к возмущениям магнитного поля, регистрируемым на поверхности Земли приборами для измерения полного вектора магнитного поля — магнитометрами. Эти геомаг-

нитные возмущения, наблюдения которых ведутся с XIX в., также являются одним из следствий прихода в магнитосферу Земли заряженных частиц.

Кроме процессов, вызванных движением заряженных частиц в ионосфере, происходит изменение структуры магнитного поля Земли вследствие появления дополнительных заряженных источников. Основным проявлением этого эффекта, связанным с регулярным корпускулярно-волновым излучением Солнца (солнечным ветром), является, конечно, отличие внешнего магнитного поля Земли от дипольного, в том числе существование резкой и уплощенной переходной области в направлении Солнца и сильно вытянутой области в противоположном направлении.

Наличие солнечного ветра способно изменить размеры и форму магнитосферы. В результате географическая область явлений, связанных с высыпаниями частиц (полярные сияния, сильные ионосферные токи, поглощение радиоволн), сдвигается от высоких широт к средним. При этом становится возможным наблюдать, например, северное сияние на широтах центральных областей и южных границ РФ (до 40-го градуса магнитной широты), где оно обычно не наблюдается [Фельдштейн и др., 2010]. Остальные эффекты (поглощение радиоволн, сильные токи в ионосфере и возмущения магнитного поля Земли) демонстрируют аналогичную динамику во время активизации потоков солнечного ветра.

Очевидно, что волновое излучение от Солнца приходит намного раньше корпускулярного и также оказывает влияние на процессы, происходящие в верхней атмосфере Земли. Основным эффектом является само существование ионосферы — ионизированного солнечным излучением плазменного слоя в нейтральной атмосфере Земли. Соответственно, любые изменения солнечного излучения приводят к изменению электронной концентрации в ионосфере на высотах, соответствующих линиям поглощения этого излучения газами, составляющими земную атмосферу и ионосферу. Таким образом, изменение электронной концентрации на различных высотах над Землей [Mikhailov, Petrone, 2016] может являться одним из следствий возмущений в солнечном ветре.

Важным фактом является существование в ионосфере, магнитосфере и атмосфере Земли хорошо разделенных зон, на границе которых характеристики среды резко меняются. Это приводит к существованию в этих зонах собственных колебаний, которые распространяются в среде относительно независимо.

Примером таких колебаний могут служить шумановские резонансы в слое между поверхностью Земли и ионосферой [Schumann, 1952], внутренние гравитационные волны в атмосфере и их проявления в ионосфере [Lognonné et al., 1998], быстрые магнитозвуковые волны в магнитосфере [Леонovich, Мазур, 2008] и так далее. Поэтому многие процессы, происходящие в системе магнитосфера—ионосфера—атмосфера, могут рассматриваться как суперпозиция собственных колебаний этой системы. Те колебания, которые менее всего затухают со временем, будут существовать в этой системе дольше всего и будут

вызывать эффекты последствия, когда система продолжает изменяться, несмотря на то что причина этих изменений уже исчезла.

Другим эффектом, проявляющимся в этой системе, является ее динамика под действием вынуждающей силы. Например, изменение силы тяжести за счет периодического движения Луны вокруг Земли приводит к формированию приливных волн, отражающихся не только в океане, но и в атмосфере и ионосфере [Альперт, 1949], а движение границы день/ночь (солнечного терминатора) по атмосфере приводит к возникновению внутренних гравитационных волн.

Таким образом, в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли существуют как собственные, так и вынужденные колебания, которые могут приводить к формированию дополнительных возмущений в периоды, когда воздействие солнечного ветра отсутствовало или уже прекратилось. Это иногда приводит к дополнительному растяжению воздействия солнечного ветра во времени и пространстве, и в том числе к возникновению эффекта «памяти» в системе магнитосфера—ионосфера—атмосфера.

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА РАДИОСРЕДСТВА

Функционирование радиосредств определяется совокупностью электромагнитных процессов внутри и снаружи устройства. Мы будем называть эффекты прямыми, если нарушения функционирования вызываются процессами внутри радиоустановки, а если снаружи — непрямыми.

К прямым эффектам относятся наведение электромагнитных полей в проводниках внутри радиоустановки, изменение потенциалов за счет дополнительной ионизации фоновым излучением, возникновение дополнительных токов за счет проникновения дополнительных зарядов извне, а также повышение фонового электромагнитного излучения различных типов и концентрации различных частиц во время возмущений. Это может приводить к сбоям радиоаппаратуры под действием наведенного тока, приводящего к сбоям ее программно-аппаратного функционирования, к понижению соотношения сигнал/шум, дополнительной ионизации оборудования под действием электромагнитного излучения, а также к изменению характеристик оборудования под действием частиц.

К непрямым эффектам относится изменение среды распространения радиосигнала, например изменение коэффициента преломления ионосферы. В этом случае нарушения функционирования оборудования связаны с изменением среды, которую оно использует для передачи данных или своего функционирования. По видам среды не прямые эффекты можно разделить на изменения условий в магнитосфере, ионосфере, атмосфере, на поверхности или под поверхностью Земли.

Солнечные радиовсплески

Наиболее интенсивным солнечным эффектом является электромагнитное излучение, наблюдае-

мое в различных частях солнечного спектра. Солнечный радиосум и радиовсплески (внезапные усиления радиоизлучения), открытые в 40-х гг. прошлого века, достаточно активно исследуются по сей день [Bastian et al., 1998; Solar and Space Weather Radiophysics..., 2004; Lee, 2007; Shibasaki et al., 2011].

Внутри радиовсплеска возможны вариации интенсивности с характерными временами от миллисекунд до секунд [Chernov, 2011]. Это приводит к дополнительному увеличению мгновенной интенсивности радиоизлучения на десятки децибел по сравнению со средним уровнем всплеска [Benz, 1986], и так уже повышенным относительно уровня радиоизлучения «спокойного» Солнца. За счет указанных особенностей основное влияние радио-всплесков сводится к возникновению неожиданных помех в работе радиолокационной, радиосвязной и радиоприемной аппаратуры [Bala et al., 2002].

Наведенные геоэлектрические поля

Геомагнитные возмущения могут приводить к усилению токов в коре Земли, в основном за счет усиления авроральных токов в полярной ионосфере [Boteler, 1994; Pirjola, 2000]. Геомагнитно-наведенные токи влияют на стабильность функционирования электрических систем [Campbell, 1978; Pulkkinen et al., 2005; Thomson et al., 2011]. В этом смысле они являются прямыми механизмами воздействия на радиоэлектронное оборудование. Указанные токи являются, по-видимому, первым замеченным проявлением влияния космической погоды на электрические приборы [Barlow, 1849].

В настоящее время в некоторых организациях используются системы прогноза геоэлектрических полей [Erinmez et al., 2002; Thomson et al., 2011]. Повышение интереса к геоэлектрическим полям связано с эффектами в сетях электрического питания, зачастую приводящими к продолжительным сбоям в Северной Америке, Швеции, Австралии [Béland, Small, 2004; Pulkkinen et al., 2005; Marshall et al., 2011].

Ионизирующая радиация

Воздействие радиации на различные электронные устройства известно достаточно давно [Ionizing Radiation Effects..., 2015] и сводится к изменению их характеристик (постоянному и временному) за счет приходящей радиации или атмосферных процессов, ею вызванных. Этот эффект может наблюдаться даже на бытовых устройствах, например смартфонах [Whitson et al., 2014].

Но наиболее сильно эти эффекты наблюдаются на космических аппаратах. В среднем, согласно данным CLUSTER, ухудшение эффективности солнечных панелей спутников за счет действия солнечной радиации составляет порядка 5 % в год, что ограничивает время их функционирования [Keil, 2007]. Еще более важным эффектом является деградация оптической и электронной аппаратуры спутников, которая может привести в том числе и к их потере [Lotbanu et al., 2015].

В настоящее время более 8000 авиационных полетов в год совершается над Северным полюсом

Таблица 1

Режимы распространения радиоволн в ионосфере на различных частотах

Диапазон	Частоты	Режим распространения
УНЧ	<3 кГц	волноводное, поверхностная волна
ОНЧ	3–30 кГц	волноводное, поверхностная волна
НЧ (ДВ)	30–300 кГц	волноводное, поверхностная волна
СВ	300–3000 кГц	поверхностная волна, ионосферная волна
КВ	3–30 МГц	поверхностная волна, ионосферная волна с существенной рефракцией, метеорное рассеяние, скачковое распространение
УКВ	30–300 МГц	ионосферная волна (слаборефрагирующая), метеорное рассеяние
СВЧ	300–3000 МГц	ионосферная волна (слаборефрагирующая)
ОВЧ	3–30 ГГц	ионосферная волна (слаборефрагирующая)
УВЧ	30–300 ГГц	ионосферная волна (слаборефрагирующая)

[Space Weather — Effects on Technology, 2012], что приводит к необходимости учета влияния доз солнечной радиации на здоровье летного состава, пассажиров, а также на состояние электронной аппаратуры.

Расширение верхней атмосферы

Слежение за плотностью, ветрами, температурой и составом нейтральной атмосферы является важной задачей, тесно связанной также с вопросами контроля космической погоды.

Системы космического базирования сегодня обеспечивают решение большого числа практических задач. Многие из этих спутников являются низкоорбитальными и испытывают существенное влияние нейтральной атмосферы, приводящее к их торможению и преждевременному понижению орбиты. Оно, в свою очередь, приводит к уменьшению времени жизни спутника и усложняет слежение за ним. Нейтральная атмосфера в основном контролируется солнечной активностью через нагрев поверхности и атмосферы солнечным излучением и через передачу тепла от плазмы в высокоширотных регионах, в которых омический нагрев вызывается процессами и токами в ионосфере и магнитосфере [Buonsanto, 1999]. В настоящее время, кроме того, исследуется связь внезапных стратосферных потеплений с эффектами расширения верхней атмосферы [Liu et al., 2013].

Ионосферные возмущения

Рассмотренные выше механизмы относились к прямому воздействию «суровой космической погоды» на радиосредства. Основным механизмом непрямого воздействия космической погоды на радиосредства являются ионосферные возмущения [Buonsanto, 1999; Kutiev et al., 2013]. Ионосфера — это частично ионизированный газ, разделяемый на несколько основных слоев (обычно обозначаемых буквами D, E, F по степени удаленности от поверхности Земли). Она расположена на высоте примерно от 60 до 2000 км и оказывает существенное влияние на распространение радиоволн. Взаимодействие радиоволн с ионосферой зависит от частоты, расстояния от приемника до передатчика, состояния

ионосферы и подстилающей земной поверхности. Достаточно детальное описание процессов распространения радиоволн можно найти в монографиях [Гинзбург, 1960; Budden, 1988].

Основные радиосредства, находящиеся под влиянием космической погоды, — это средства КВ-радиосвязи, средства связи поверхность—космос, глобальные навигационные системы, загоризонтные радиолокаторы, спутниковые высотомеры и радары космического базирования [Goodman, Aarons, 1990]. Устойчивость функционирования большинства этих средств определяется ионосферными условиями [Cannon et al., 2004].

В табл. 1 приведены основные механизмы распространения радиоволн различных частотных диапазонов.

В нижней части спектра (УНЧ- и ОНЧ-диапазоны) распространение радиоволн может быть описано как волноводное распространение в эффективном волноводе, образованном поверхностью Земли и ионосферой. В верхней части спектра (СВЧ, УВЧ) распространение радиоволн можно считать почти прямолинейным, на которое ионосфера влияет очень слабо. Между этими диапазонами воздействие ионосферы на распространение радиоволн наиболее существенно, а КВ-диапазон сильнее всего подвержен влиянию солнечных возмущений и наиболее удобен для создания инструментов для контроля таких эффектов [Goodman, 2005].

В табл. 2 приведены основные функции радиоаппаратуры с указанием соответствующих радиодиапазонов.

УНЧ-диапазон (<3 кГц) рассматривался в литературе достаточно подробно [Bannister, 1986; Pappert, Moler, 1978]. При его анализе ионосфера и Земля предполагаются идеальными, однородными и с резкими границами. Ионосфера работает на этих длинах волн как идеальный проводник и в основном не влияет на распространение этих волн. Тем не менее нижняя часть ионосферы, особенно спорадический E-слой, может влиять на характеристики радиоволны (в основном фазовые) за счет интерференции волн, отраженных от регулярного и спорадического слоев [Pappert, 1980].

Таблица 2

Применение различных частотных диапазонов

Диапазон	Функции
УНЧ и ОНЧ	навигация, сигналы точного времени и частоты
ДВ	навигация, радиовещание
СВ	радиовещание с амплитудной модуляцией сигнала
КВ	радиосвязь, сигналы точного времени, радиолокация, любительская радиосвязь, системы определения положения
УКВ	телевидение, радиовещание с частотной модуляцией сигнала, авиационная радиосвязь
СВЧ и УВЧ	GPS/ГЛОНАСС-навигация, радиолокация, телевидение

Основной моделью описания распространения колебаний в ОНЧ- и НЧ-диапазонах является волноводное распространение. В этом подходе рассматривается пространство между ионосферой и поверхностью Земли как единый волновод. В этом случае возникают поперечные электрические (ТЕ) или поперечные магнитные (ТМ) моды (каждая со своими характеристиками), в зависимости от типа антенны, используемой для генерации излучения. При этом они не являются независимыми вследствие присутствия неоднородного магнитного поля.

С точки зрения влияния ионосферы на распространение радиоволн ОНЧ-/НЧ-диапазон сильнее, чем УНЧ, контролируется состоянием ионосферы, а следовательно, и более подвержен влиянию возмущений космической погоды. В отсутствие существенных возмущений космической погоды распространение радиоволн ОНЧ-/НЧ-диапазона достаточно стабильно. Возмущения космической погоды могут приводить за счет интерференции различных мод и условий их распространения, например, к внезапным аномалиям фазы (sudden phase anomalies, SPA), возникающим во время усиления D-слоя при солнечных вспышках. При вторжении частиц в полярную шапку, например во время магнитных бурь или поглощения в полярной шапке (polar cap absorption events, PCA), условия распространения изменяются также, что приводит к фазовым и амплитудным искажениям сигнала. Существенное влияние на характеристики сигнала оказывают и другие факторы, такие как проводимость Земли. Наиболее важными эти факторы являются в полярных областях, где сочетается влияние как ионосферы, так и сезонной динамики подстилающей поверхности.

Многие исследователи при рассмотрении объединяют СВ- и КВ-радиодиапазоны, поскольку для обоих характерна так называемая пространственная (небесная, или ионосферная) волна — сильно рефрагирующая в ионосфере траектория распространения сигнала. Кроме того, в обоих диапазонах может наблюдаться так называемая поверхностная (земная) волна, связываемая с распространением радиоволны вдоль поверхности Земли. Ослабление небесной волны, например за счет поглощения в D-слое, увеличит вероятность наблюдения земной волны. Однако иногда удобно рассматривать СВ-диапазон совместно с ДВ-диапазоном, как, например, для предсказания характеристик интен-

сивности излучения на этих длинах волн [Wang, 1985; Ghasemi et al., 2013]. Обзор экспериментальных данных по распространению СВ-радиоволн можно найти в работах [Knight, 1983; Виленский и др., 1983].

В УКВ-диапазоне проявления космической погоды связаны в основном с изменениями фазы и амплитуды распространяющихся сигналов из-за ионосферных неоднородностей различных масштабов. В случае если неоднородности имеют достаточно мелкий поперечный пространственный масштаб, явление наблюдается как сцинтилляции (мерцания) [Basu, Basu, 1981; Basu et al., 1985; Aarons, 1982; Priyadarshi, 2015], если же неоднородности относительно крупномасштабны — то как плавные изменения характеристик принятого сигнала.

Основные ионосферные эффекты: групповая задержка сигнала, фарадеевские замирания, доплеровское смещение частоты и т. д. — зависят от интегрального значения электронной концентрации вдоль траектории распространения. Обычно такая величина называется полным электронным содержанием (ПЭС) и может быть измерена по данным двухчастотных GPS-приемников [Klobuchar, 1975]. Большая часть ошибок (до 70 %) глобального спутникового позиционирования может быть скорректирована учетом такой ионосферной поправки. Еще большего успеха можно добиться, зная полное трехмерное распределение электронной концентрации в режиме реального времени. Проявление глобальных крупномасштабных возмущений космической погоды в ионосфере удобно приближенно оценивать с использованием глобального электронного содержания — полного количества электронной плазмы во всей ионосфере Земли [Afraimovich et al., 2008], полученного интегрированием карт ПЭС по всему миру.

Промежуточный между СВ- и УКВ-диапазонами КВ-диапазон наиболее сложен для описания. Это связано с тем, что критические (плазменные) частоты основных ионосферных слоев (кроме D) находятся в пределах этого диапазона, а гирочастоты сравнимы с нижней границей диапазона. Одновременно распространение радиоволн КВ-диапазона может описываться в рамках геометрикооптического (лучевого скачкового) [Гинзбург, 1960] и модового [Куркин и др., 1981] распространения, объединяя особенности УКВ- и НЧ-диапазонов. Высокая чувствительность

к поглощению также делает его похожим на нижние частотные диапазоны, особенно СВ. В то же время часть КВ-сигналов с частотами выше критической частоты может распространяться в рамках слабого искажения траектории, но при сильном влиянии поляризационных эффектов, что делает их близкими с УКВ-диапазоном. Существование неоднородностей порядка длины волны, особенно в полярных широтах, приводит к мощному обратному рассеянию на естественных неоднородностях плазмы (радиоавворе), как и в УКВ-диапазоне. Существование естественных ионосферных неоднородностей, меньших радиуса Френеля, приводит к амплитудно-фазовым замираниям (сцинтилляциям). Доплеровские смещения частоты, превышающие 1 Гц, также роднят этот диапазон с УКВ- и СВЧ-диапазонами.

Поэтому влияние космической погоды на КВ-диапазон весьма существенно и включает в себя практически весь спектр эффектов, наблюдаемых в остальных диапазонах: поглощение за счет ионизации во время солнечных вспышек, поглощение в полярной шапке, радиоаввору, многомодовое распространение, групповые и фазовые задержки за счет рефракции, поляризационные эффекты Фарадея и Коттона—Мутона [Гинзбург, 1960; Goodman, 1991] и т. д.

Широкое использование КВ-систем требует понимания среды распространения, которая, в свою очередь, контролируется космической погодой. Наиболее сильное возмущение космической погоды, влияющее на распространение радиоволн, — это геомагнитная буря, проявляющаяся на всех широтах, в том числе и на наименее возмущенных средних [Akasofu, 1977]. Доплеровские смещения частоты и частотные искажения сигнала также определяются временной динамикой ионосферного канала [Basler et al., 1988] и определяют устойчивость приема. Особенно сильны эти эффекты в полярных и экваториальных широтах.

Основным радиосредством, реагирующим на все или почти все проявления космической погоды, являются коротковолновые загоризонтные радиолокаторы с импульсным или непрерывным излучением сигнала. Научным эквивалентом их являются импульсные радары SuperDARN [Chisham et al., 2007], ионозонды-пеленгаторы с непрерывным ЛЧМ-сигналом [Uryadov et al., 2013] или ионозонды наклонного зондирования [Ivanov et al., 2003]. Принцип действия радара состоит в посылке сложного радиосигнала, который частично рассеивается на ионосферных неоднородностях, частично преломляется в ионосфере и частично рассеивается обратно земной поверхностью. На примере данных Екатеринбургского КВ-радар (ЕКВ) ИСЗФ СО РАН мы будем иллюстрировать влияние космической погоды на радиосредства.

ЗАГОРИЗОНТНАЯ РАДИОЛОКАЦИЯ КАК МЕТОД КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Основными задачами загоризонтной радиолокации являются обнаружение и исследование характе-

ристик рассеивателей за линией горизонта с использованием эффектов распространения радиоволн и сложных алгоритмов отбраковки шумов, связанных с естественными источниками. При этом влияние среды распространения на групповые и фазовые задержки обычно остается существенным. Обзоры этих радиосредств можно найти в [Headrick, Skolnik, 1974; Алебастров и др., 1984; Headrick, 1990; Principles of Modern Radar, 2010]. В научных задачах в качестве рассеивателя выступают неоднородности среды распространения (в основном ионосферы).

При распространении КВ-радиоволн возникновение дополнительных ионосферных слоев приводит к возникновению дополнительных траекторий распространения [Tsunoda et al., 2016] и, как следствие, к усложнению привязки радиолокационной дальности (групповой задержки сигнала) и азимута к реальным положениям рассеивающих объектов или направлениям на них [Reinisch et al., 1997; Bergardt et al., 2016; Chen et al., 2016; Warrington et al., 2016]. Зависимость траекторий распространения от частоты приводит к сильным фазовым искажениям сигнала, что дополнительно усложняет детектирование сложных сигналов на дальних трассах. Кроме того, может изменяться амплитуда сигнала за счет расфокусировки/фокусировки сигнала [Bergardt et al., 2016] и его поглощения в нижних слоях ионосферы [Bergardt et al., 2016; Gauld et al., 2002; Settini et al., 2014; Settini et al., 2015; Sonnenschein et al., 1997]. На все это накладываются эффекты, уже описанные ранее: изменение групповых и фазовых задержек и поляризационные искажения. Даже для корректного определения скорости передвижения рассеивателей требуется корректный учет фоновой ионосферы [Gillies et al., 2011].

Для поддержки функционирования загоризонтных радиосредств используются системы моделирования распространения радиосигнала в неоднородной замагниченной ионосферной плазме [Fridman et al., 2016; Landeau et al., 1997; Reinisch et al., 1997; Settini et al., 2015; Warrington et al., 2016], поскольку если их не использовать, то ошибки, вносимые ионосферой, будут очень велики [Reinisch et al., 1997; Bergardt et al., 2015b]. Для корректного решения задачи распространения сигнала необходимо знать среду распространения или по крайней мере иметь хорошую ее модель. Существуют различные модели для прогноза и коррекции характеристик распространения в приложении к различным радиосистемам (например, IONCAP, VOACAP, ICEPAC, ASAPS), в основном ориентированные на прогноз различных ионосферных характеристик [Zolesi, Cander, 2014]. Могут также использоваться для прогноза функционирования КВ-радиосредств в различных условиях медианные месячные модели ионосферы, созданные более 50 лет назад и постоянно улучшающиеся [Bilitza et al., 2014, 2017]. Примеры такого улучшения — это NeQuick [Radicella, Leitinger, 2001], PIM [Daniell et al., 1995]. Одной из общепринятых моделей является международная справочная модель IRI, корректируемая по различным данным [Bilitza et al., 2014, 2017; Settini et al., 2015]. Большей частью такие модели являются либо статистическими, либо сглаженными, что не дает возможно-

сти эффективно отслеживать локальные изменения, наиболее выраженные на высоких широтах.

Наиболее точным является контроль характеристик ионосферы в реальном времени по данным сетей инструментов с корректировкой по ним моделей распространения радиосигналов [Settimi et al., 2015; Bilitza et al., 2017; Hernández-Pajares et al., 2017].

Радар ЕКВ (56.5° N, 58.5° E), запущенный в опытную эксплуатацию в декабре 2012 г., является импульсным когерентным радаром декаметрового диапазона, установленным совместно с Институтом геофизики УрО РАН (ИГФ УРО РАН) на территории обс. «Арти» ИГФ УрО РАН. Приемно-передающая аппаратура радара создана в Университете Лестера (Великобритания) и закуплена на средства СО РАН. Монтаж антенной решетки радара проведен при финансовой поддержке Росгидрометеослужбы. В настоящее время этот радар является единственным в РФ научным импульсным декаметровым загоризонтным радаром.

Приемо-передающая антенная система радара представляет собой линейную фазированную решетку и обеспечивает ширину лепестка диаграммы направленности 3–6° в зависимости от частоты и сектор обзора 50°, последовательно перебираемый фиксированными позициями лучей. Пространственное и временное разрешение радара составляет соответственно 15–45 км и 2 мин. Частотный диапазон 8–20 МГц обеспечивает работу радара в режиме загоризонтного радиолокатора, а пиковая импульсная мощность 10 кВт позволяет работать в диапазоне дальностей до 3500–4500 км. Короткие зондирующие сигналы обеспечивают низкую (порядка 600 Вт) среднюю мощность радара, что позволяет ему работать в режиме круглосуточного мониторинга. Примерный сектор обзора радара приведен на рис. 1. За счет рефракционных эффектов этот сектор несколько расширяется, и при решении конкретных задач необходимо учитывать состояние фоновой ионосферы для расчета области, откуда приходит сигнал.

В главной фазе геомагнитной бури плазменная частота ионосферы может падать до 50 % от своего предбуревого значения с восстановлением в течение нескольких дней. Коэффициент рефракции, траектории распространения радиосигналов, групповая и фазовая задержки распространения также изменяются очень существенно.

Изменение электронной концентрации в ионосферных слоях E и F обычно приводит к искажению

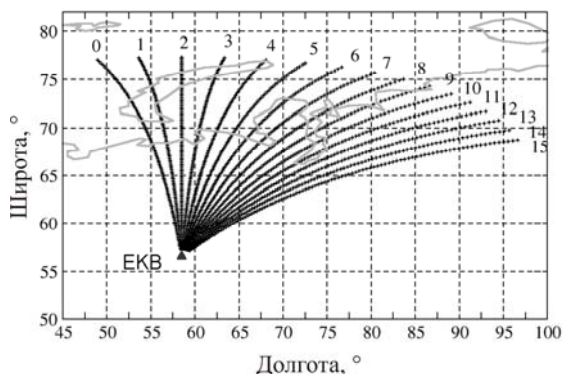


Рис. 1. Примерный сектор обзора радара ЕКВ в географических координатах без учета рефракции в ионосфере. Цифрами указаны номера лучей радара

траектории распространения радиосигнала, и чем ниже частота, тем сильнее эти искажения. Самые слабые искажения, которые сводятся к изменению групповых задержек при распространении в ионосфере либо к поляризационным искажениям, связанным с фарадеевскими замираниями [Гинзбург, 1960; Budden, 1988], происходят в СВЧ- и УКВ-диапазонах. В этом случае основным эффектом будут ошибки в определении дальности, рассчитываемой по групповым или фазовым задержкам сигнала. Такая ошибка характерна для различных радиолокационных систем и широко известна в данных глобальных систем позиционирования (GPS) [Klobuchar et al., 1987]. Фарадеевские замирания могут приводить к дополнительным вариациям мощности сигналов, ощутимым при радиоастрономических наблюдениях [Афраймович, 2007].

Основным фактором, влияющим на распространение радиоволн КВ-диапазона, является рефракция, вызванная крупномасштабной неоднородностью ионосферы. Для иллюстрации влияния изменений фоновых ионосферных характеристик на радиосигнал (рис. 2) приведена мощность рассеянного сигнала как функция радиолокационной дальности и времени по данным радара ЕКВ для трех выбранных дней: 19.05.2016, 30.08.2016 и 22.09.2016. Из рис. 2, *a–в* видно, что ночным часам местного времени (22–24, 00–08 LST) соответствуют области больших радиолокационных дальностей (зона II), а дневному времени (09–19 LST, зона I) — области малых радиолокационных дальностей. Из рис. 2, *б* видно, что суточный ход радиолокационной дальности может превышать 1000 км. На рис. 2, *з* приведено пояснение этого эффекта с точки зрения рефракции в дневное (черный цвет) и ночное (серый цвет) время. Видно, что при ночном уменьшении электронной концентрации N_e (справа на рис. 2, *з*) и повышении ее максимума траектория становится длиннее, а радиолокационная (групповая) задержка до границы мертвой зоны, соответственно, больше. Этот эффект является регулярным суточным и зависит от трехмерного распределения электронной концентрации на всей траектории распространения сигнала.

Собственными радиоволнами, распространяющимися в замагниченной ионосфере, являются обыкновенная и необыкновенная волна, в зависимости от угла с магнитным полем имеющие различные поляризации. После распространения в ионосфере с разными скоростями этих волн их суперпозиция будет испытывать фарадеевские замирания. Фаза замирания в первом приближении пропорциональна полному электронному содержанию [Кравцов, Орлов, 1980].

Поскольку ионосфера — диспергирующая среда, то различные частоты распространяются в ней с различными скоростями. Это приводит к тому, что при распространении в среде сигнал искажается. Искажения узкополосных КВ-сигналов были рассмотрены, например, в [Засенко и др., 1993]. Подобные искажения могут быть связаны как с рефракцией и эффектами фокусировки сигнала, так и с частотной дисперсией поглощения в ионосфере. Кроме ионизации F-слоя ионосферы может меняться электронная концентрация и в D- и

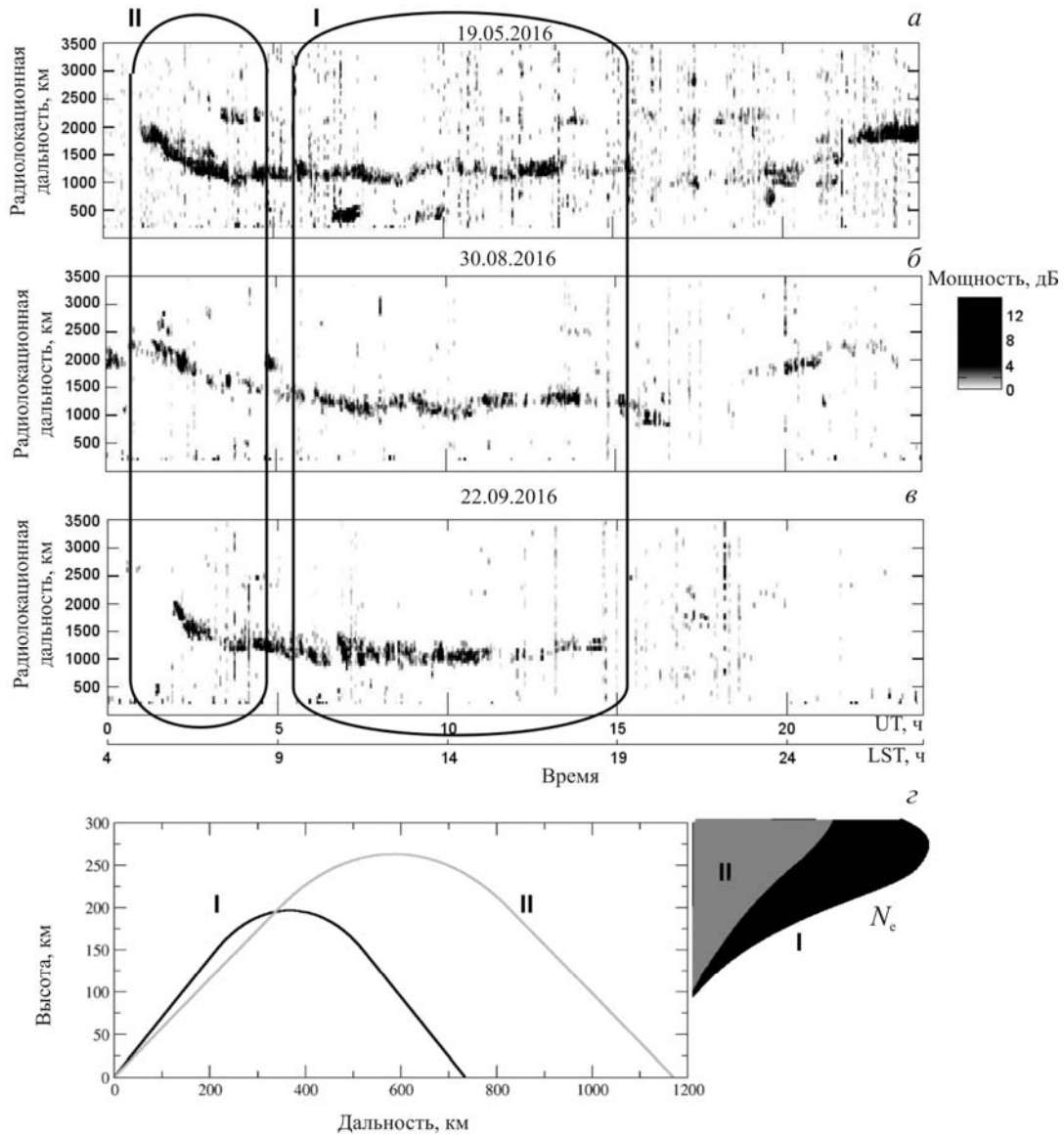


Рис. 2. Мощность рассеянного сигнала радара ЕКВ 19.05.2016 (а), 30.08.2016 (б) и 22.09.2016 (в) как функция радиолокационной дальности рассеяния и времени, $LST=UT+4$; примерная траектория сигнала при распространении в дневное (черный цвет) и ночное (серый цвет) время (z)

Е-слоях, приводя к повышенному поглощению радиоволн. Поглощение радиоволн возникает, когда эффективная частота столкновения электронов с другими частицами становится достаточно высокой. За счет этого энергия волны передается более тяжелым частицам — ионам и нейтралам, переходя в нагрев. Наиболее часто это происходит во время солнечных вспышек, когда происходит увеличение электронной концентрации в D-слое [Rogov et al., 2015]. В основном поглощение значительно в КВ-диапазоне и на более низких частотах, а на частотах УКВ-диапазона уже весьма мало.

На рис. 3, а–е показаны поведение мощности рассеянного сигнала во время нескольких рентгеновских вспышек: 08.05.2014 (M5.2), 11.04.2013 (M6.5), 25.10.2013 (M9.4) — и соответствующий им ход рентгеновского излучения по данным спутников GOES. Видно, что часто во время рентгеновских вспышек мощность сигнала может существенно уменьшаться без изменения дальности рассеяния, а

следовательно, основной эффект связан с появлением слаборефрагирующей, но сильно поглощающей ионизированной области, обычно D-слоя. Рисунок 3, ж иллюстрирует изменение интенсивности сигнала при распространении в присутствии сильно ионизированной нижней области, рис. 3, з — в ее отсутствие. Штриховой линией на рис. 3, ж условно показана амплитуда сигнала, уменьшающаяся при прохождении поглощающего слоя. Траектория сигнала существенно не изменяется, но амплитуда сигнала значительно убывает при распространении в поглощающем слое.

Ионизация нижних слоев ионосферы, происходящая под действием энергичных солнечных протонов и приводящая к случаям поглощения радиоволн в полярной шапке (РСА), обычно продолжается от часов до нескольких дней и особенно критична при распространении КВ-радиоволн на полярных радиотрассах [Pettone et al., 2004], поскольку приводит к существенному уменьшению

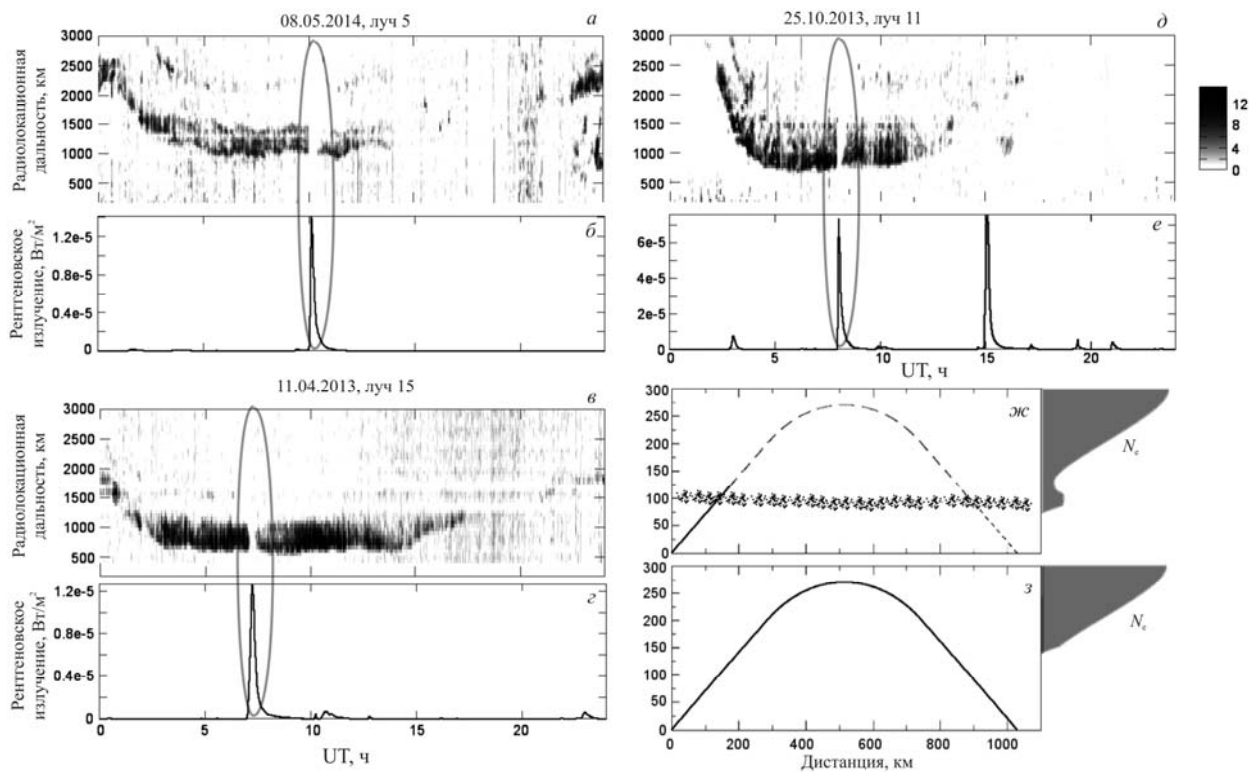


Рис. 3. Мощность рассеянного сигнала радара ЕКВ как функция радиолокационной дальности рассеяния и времени во время рентгеновских вспышек M5.2 08.05.2014 (а), M6.5 11.04.2013 (с), M9.4 25.10.2013 (д) и соответствующий им ход рентгеновского излучения по данным спутников GOES (б, з, е); примерные траектории и амплитуды сигнала при распространении в присутствии (ж) и в отсутствие (з) поглощающего слоя на высоте 100 км

амплитуды распространяющейся волны (вплоть до 100 дБ).

Существование резких изменений фоновых параметров ионосферы или солнечного ветра, а также резких пространственных градиентов ионосферных параметров приводит к образованию различных неоднородностей. Учитывая наличие собственных колебаний и возможность изменений в системе магнитосфера—ионосфера—атмосфера под действием вынуждающих сил, указанные эффекты могут осциллировать в пространстве и времени по сложным законам, определяющимся характеристиками собственных колебаний системы и динамикой внешнего воздействия. На практике это приводит к возникновению пространственно-временных вариаций всех указанных параметров с различными пространственно-временными масштабами: планетарных волн [Liu et al., 2010], внутренних гравитационных волн [Hunsucker, 1982] и т. д., — и, соответственно, к временной модуляции указанных выше эффектов.

На рис. 4 приведена мощность рассеянного сигнала радара ЕКВ как функция радиолокационной дальности рассеяния и времени в присутствии перемещающихся ионосферных возмущений. На рис. 4, а, б показаны случаи крупномасштабных неоднородностей F-слоя без формирования дополнительной моды (траектории) распространения сигнала, в основном сводящиеся к изменению формы профиля электронной концентрации без изменения его монотонности. Аналогичные неоднородности обычно рассматриваются как внутренние или акустико-гравитационные волны [Oinats et al., 2016]. Принцип

формирования подобных эффектов аналогичен показанному на рис. 2, з. На рис. 4, в, з приведены случаи крупномасштабных неоднородностей с формированием дополнительной моды, обычно сводящиеся к формированию волнообразных по высоте возмущений, нарушающих монотонность профиля электронной концентрации и проявляющихся в виде полос на диаграмме дальность—время, причем направление этих полос указывает на направление перемещения этих неоднородностей [Stocker et al., 2000]. Подобные неоднородности возникали, например, при прохождении волн от Челябинского болида 15.02.2013 [Berngardt et al., 2015c; Кутелев, Бернгардт, 2013] или при прохождении ударных волн от землетрясений [Ogawa et al., 2012; Berngardt et al., 2017].

За счет изменения фазы волны вследствие распространения в рефрагирующей ионосфере сигнал приобретает изменяющийся во времени фазовый сдвиг, в первом приближении описываемый доплеровским смещением частоты. Сдвиг частоты в КВ-диапазоне в зависимости от внешних условий может составлять до десятка герц.

При уменьшении пространственного масштаба неоднородностей колебания становятся все быстрее и становятся более заметными в доплеровском смещении частоты. На рис. 5 приведена мощность и доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала радара ЕКВ в единицах скорости (далее — доплеровская скорость) как функции радиолокационной дальности рассеяния и времени во время таких среднимасштабных неоднородностей. Видно

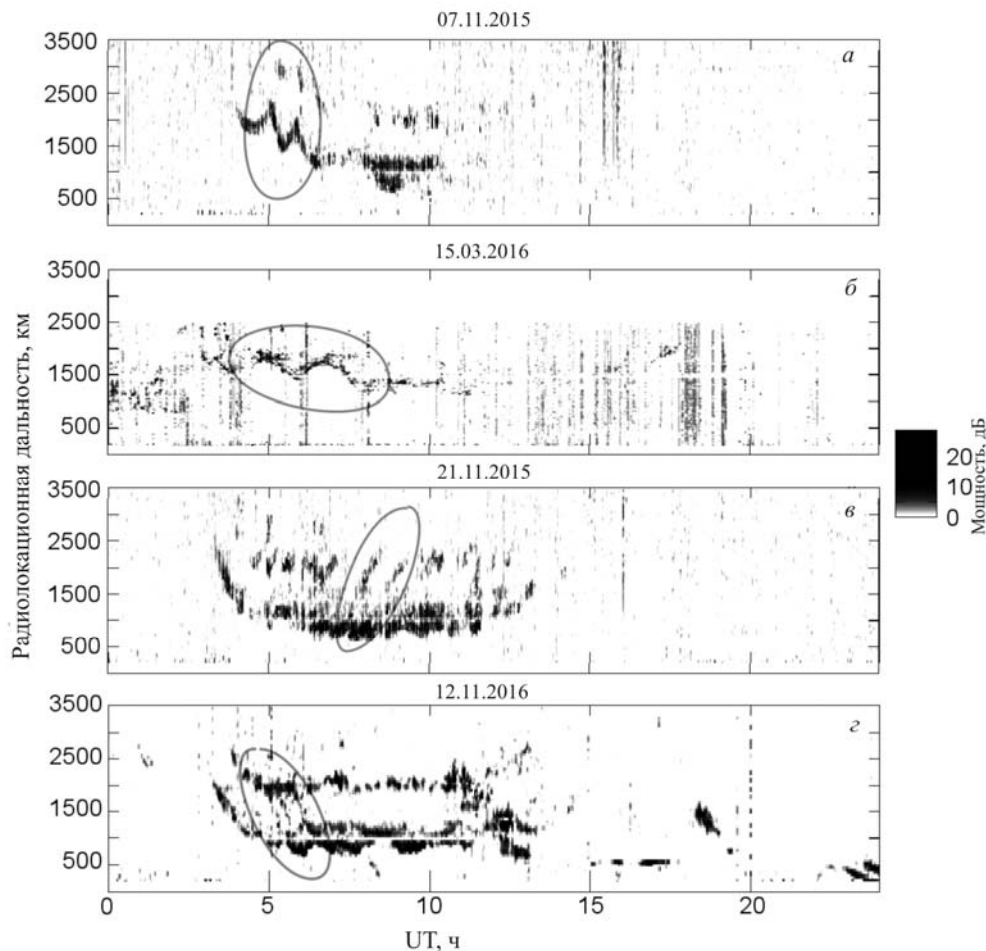


Рис. 4. Мощность рассеянного сигнала радара ЕКВ как функция радиолокационной дальности рассеяния и времени в присутствии перемещающегося ионосферного возмущения — крупномасштабных неоднородностей F-слоя — без формирования (а, б) и с формированием (в, г) дополнительной моды распространения сигнала

близкое соответствие между доплеровской скоростью и вариациями мощности, связанными, по-видимому, не только с движением точки отражения по дальности (рис. 2, г), но и с эффектами фокусировки [Stocker et al., 2000; Кутелев, Бернгардт, 2013], т. е. являющимися комбинацией эффектов, рассмотренных на рис. 4. Понятно, к чему будет приводить дальнейшее уменьшение масштабов неоднородностей — к замираниям сигнала со все меньшим периодом, т. е. к эффекту скинтилляций (мерцаний).

Ионосферные неоднородности, приводящие к скинтилляциям сигнала, исследовались во многих работах, в том числе и их зависимость от различных проявлений солнечной и геомагнитной активности. Положительная корреляция их появления с индексом солнечной активности характерна как для экваториальных, так и для высоких широт [Aarons et al., 1980; Rino, Matthews, 1980]. Причинами скинтилляций могут являться неоднородности различных масштабов — от метровых до километровых, включая среднемасштабные неоднородности, размеры которых сравнимы и меньше радиуса зоны Френеля [Basu, Basu, 1981; Basu et al., 1985, 1988; Mullen et al., 1985; Aarons, 1982; Weber et al., 1985; Groves et al., 1997; Wernik et al., 2003; Gherm et al., 2011]. Следует заметить, что скинтилляции более интенсивны на экваториальных широтах, хотя наблюдаются также

на высоких широтах, и связаны в основном с развитием различных неустойчивостей [Tsunoda, 1988]. В экваториальной ионосфере основным механизмом скинтилляций являются плюмы — плазменные структуры. Плюмы имеют характерные размеры порядка нескольких сотен километров в горизонтальном и вертикальном направлении. На высоких широтах скинтилляции связаны с ростом мелкомасштабных неоднородностей [Rino, Matthews, 1980; Aarons, 1982]. Скинтилляции на средних широтах обычно вызваны комбинацией высокоширотных механизмов и эффектом возникновения неоднородностей в субавроральной ионосфере, в том числе и возникновением спорадических слоев [Goodman, 1967].

Влияние мелкомасштабных неоднородностей (с характерным масштабом порядка половины длины волны радиосигнала) может также приводить к существенному обратному рассеянию в КВ- и УКВ-радиодиапазонах, известному как радиоаврора. Существуют многочисленные типы таких неоднородностей, характерные как для полярной [Багаряцкий, 1961; Свердлов, 1982; Haldoupis, 1989], так и для экваториальной ионосферы [Patra et al., 2014; Chau, Kudeki, 2013]. Особенностью большей части таких неоднородностей является их вытянутость вдоль линий магнитного поля Земли.

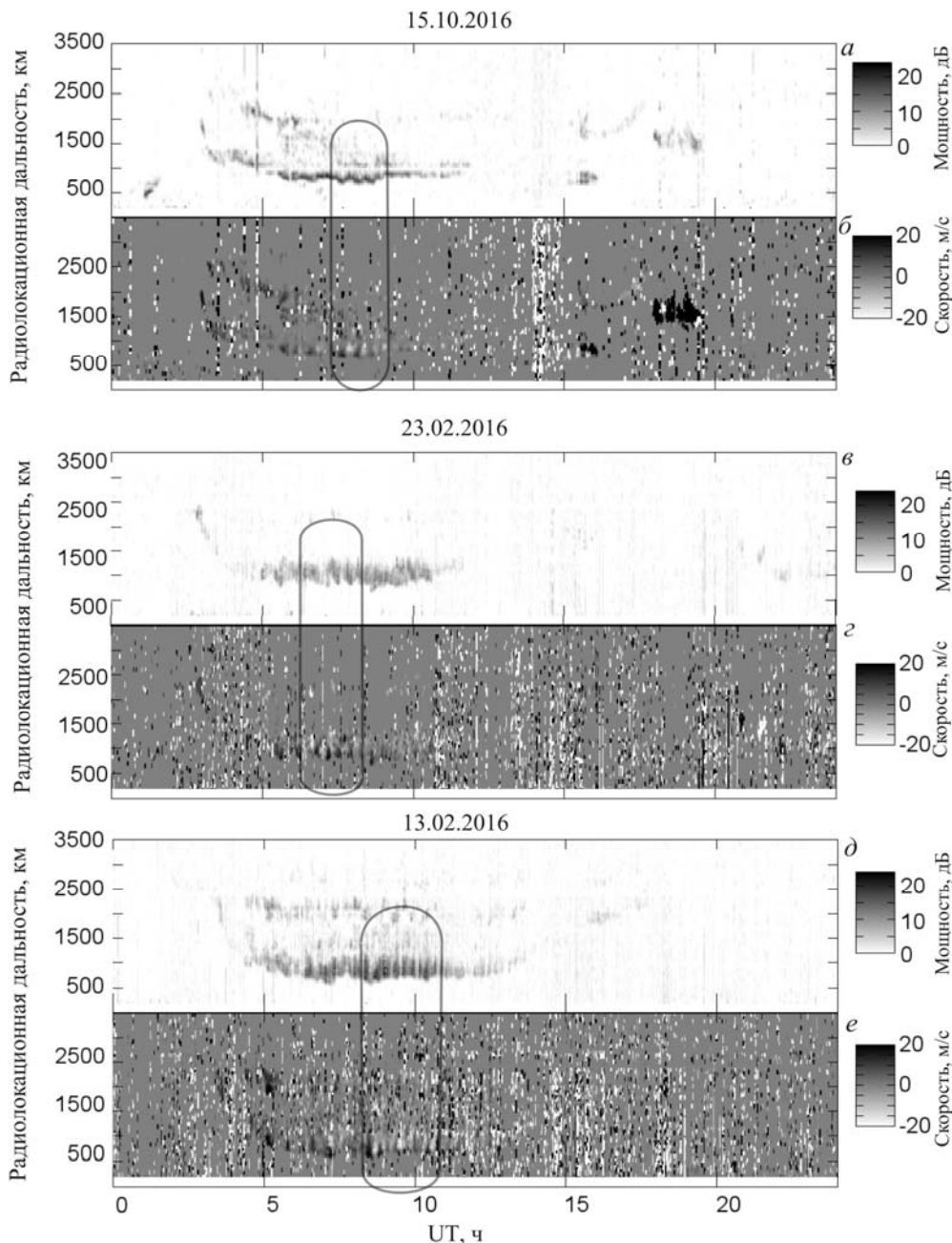


Рис. 5. Мощность рассеянного сигнала радара ЕКВ (а, в, д) и доплеровское смещение частоты в единицах скорости (б, з, е) как функции радиолокационной дальности рассеяния и времени в присутствии среднемасштабных неоднородностей

Морфологии высокоширотной радиоавороры посвящено много работ. Основной ее характеристикой является связь с положением полярного овала, вызывающая, например, известную суточную зависимость радиоавороры с усилением в ночное время, и интенсивностью электрического поля, что является одним из основных эффектов, сопровождающих возмущения космической погоды. Исследованиям радиоавороры посвящены, например, работы советских и российских ученых [Багаряцкий, 1961; Свердлов, 1982; Uryadov et al., 2013], в том числе недавняя работа на основе данных радара ЕКВ [Bergardt et al., 2015a]. Обзор наблюдений радиоавороры сетью радаров SuperDARN приведен в [Chisham et al., 2007].

Следует заметить, что вероятность появления мелкомасштабных неоднородностей часто связана

с областями высоких токов. Как уже говорилось, изменение характеристик солнечного ветра приводит к изменению этой системы токов, а именно к расширению области полярного овала и в экваториальном, и в полярном направлении. Сопровождающие полярный овал ионосферные токи, сдвигаясь в более экваториальные области, за счет генерации магнитных полей проявляются в данных магнитных станций [Rostoker, 1972], что позволяет оценивать степень геомагнитного возмущения в ионосфере. Кроме того, возможно построение индексов, характеризующих степень роста полярного овала, путем непосредственного анализа возмущений межпланетного магнитного поля [Troshichev et al., 2006].

На рис. 6 приведены мощность рассеянного сигнала радара ЕКВ (а), доплеровская скорость (б)

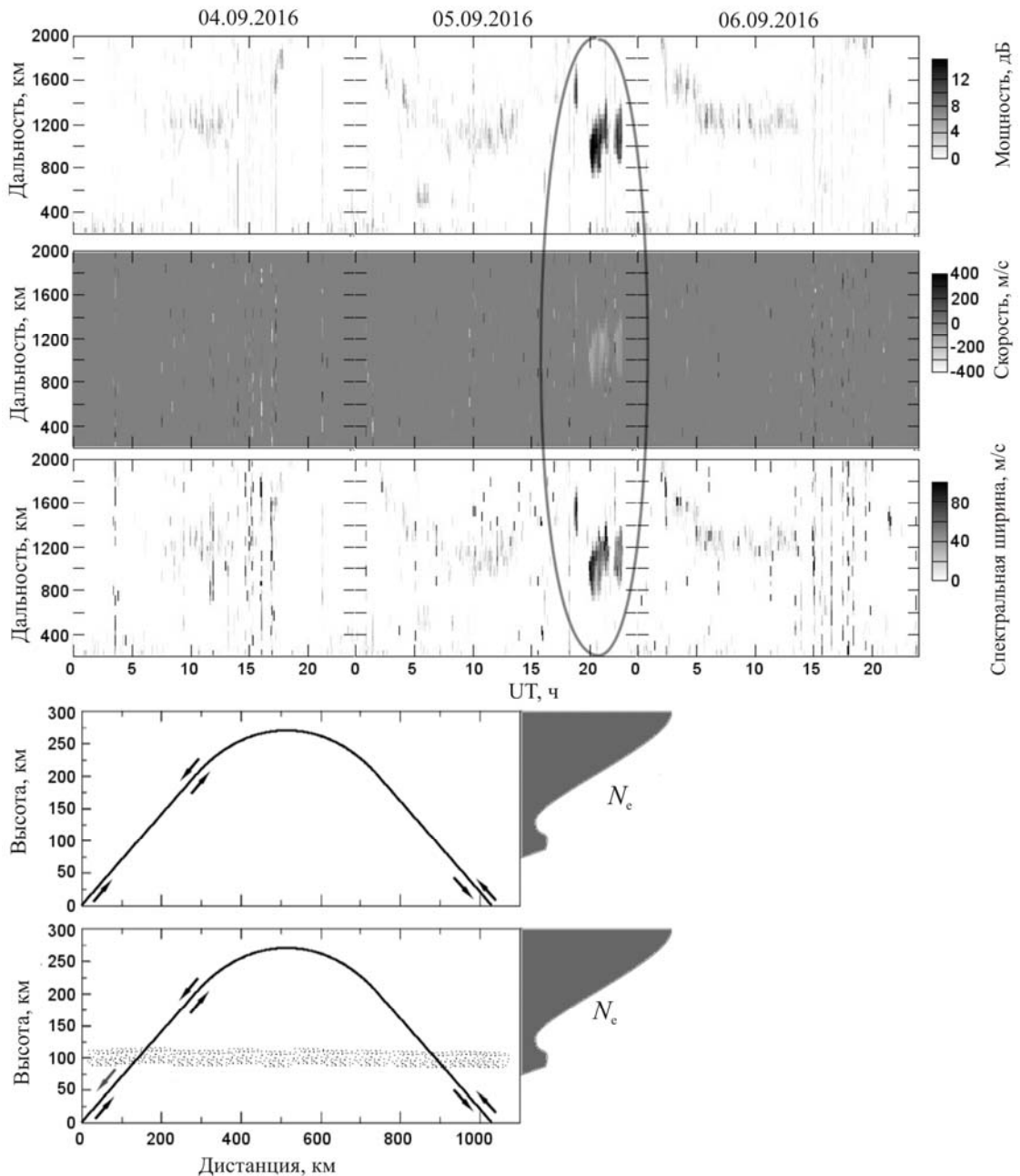


Рис. 6. Мощность рассеянного сигнала радара ЕКВ (а), доплеровская скорость (б) и ширина спектра сигнала в единицах скорости (в) как функции радиолокационной дальности рассеяния и времени; примерные траектории и амплитуды сигналов при распространении в отсутствие (д) и в присутствии (е) слоя с неоднородностями на высоте 100 км

и спектральная ширина в единицах доплеровской скорости (в) как функции радиолокационной дальности рассеяния и времени в период 04–06.09.2016 на луче 7. Из рисунка видны большая пространственная область, занимаемая радиоаворой, и высокие эквивалентные доплеровские скорости неоднородностей, превышающие 200 м/с. Сигнал, рассеянный на таких неоднородностях, носит очень сложный характер и обладает существенной изменчивостью во времени, что подтверждает большая ширина его спектра.

Следует заметить, что не только вариации электронной плотности могут приводить к изменениям доплеровского смещения частоты принятого сигнала, но и вариации электрического поля. В этом случае

наблюдается модуляция доплеровского смещения частоты сигнала, рассеянного на магнитоориентированных неоднородностях [Bland et al., 2014]. Эти эффекты, наблюдавшиеся на радаре ЕКВ, анализируются в работах [Mager et al., 2015; Chelpanov et al., 2016].

Примеры таких колебаний показаны на рис. 7. На рисунке приведены мощность рассеянного сигнала (а, в, д) и доплеровская скорость (б, з, е). Из рисунка видно, что существуют области радиоаворы, где доплеровское смещение частоты меняет знак (отмечено овалом). Такие области квазипериодической смены знака могут быть как длиннопериодными (рис. 7, а, б), так и короткопериодными (рис. 7, в–е). Учитывая, что на больших высотах плазма может

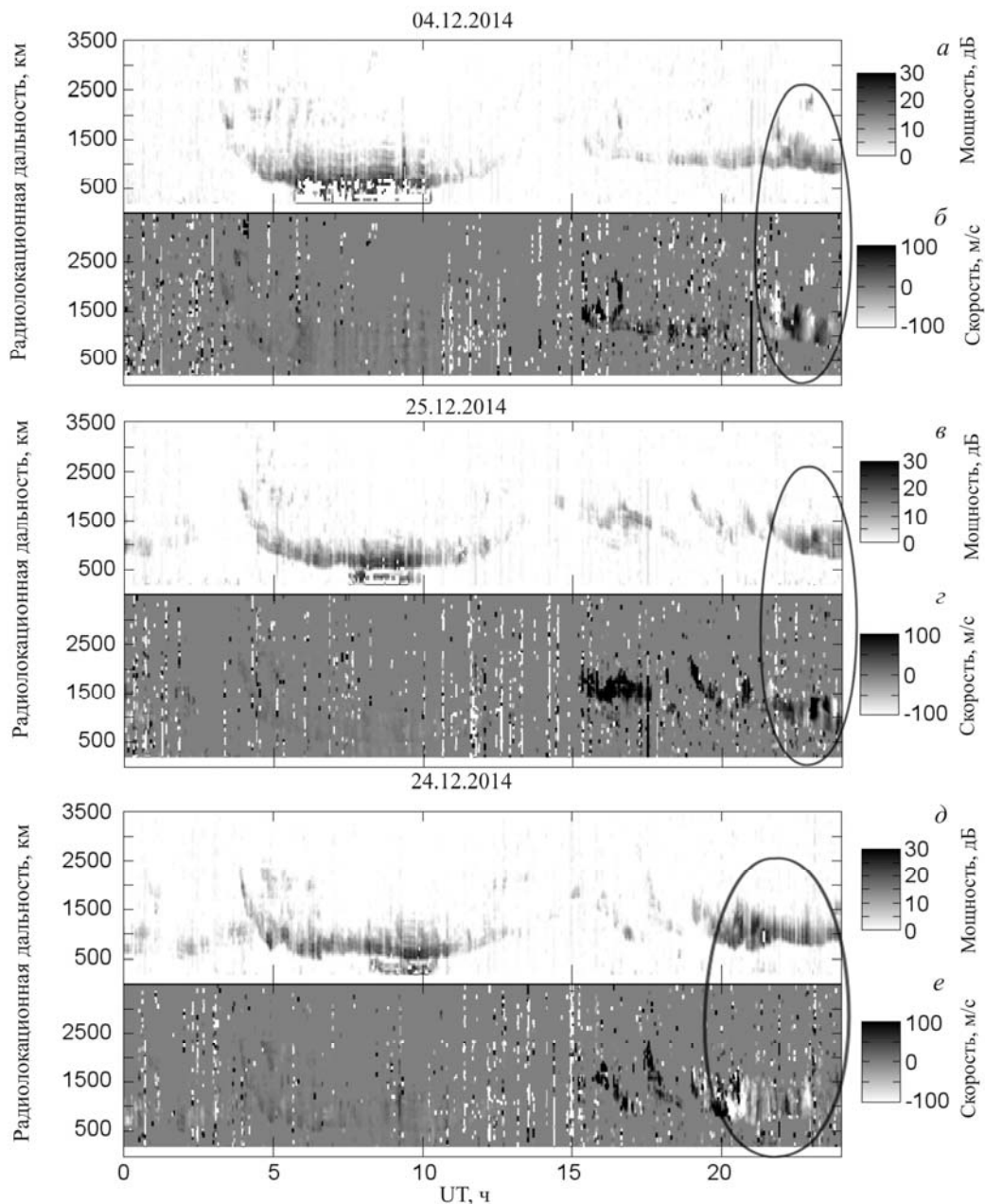


Рис. 7. Мощность рассеянного сигнала (а, в, д) и доплеровская скорость (б, г, е) во время наблюдения УНЧ-колебаний характеристик радиоавроры 04.12.2014, 25.12.2014 и 24.12.2014. Овалами отмечены области наблюдения колебаний

считаться замагниченной, доплеровская скорость неоднородностей определяется $E \times V$ -дрейфом, а колебания доплеровской скорости могут объясняться поворотом электрического поля вследствие как изменения структуры токов в E-слое [Chisham et al., 2007], так и прохождения в магнитосфере волн различных типов [Chelpanov et al., 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сделана попытка провести обзор влияния возмущений космической погоды на функционирование радиосредств. Основное внимание уделено влиянию космической погоды на распространение коротких радиоволн. На примере данных ЕКВ-радаров ИСЗФ СО РАН продемонстрированы некоторые проявления такого влияния. Приведены

примеры изменения групповой задержки сигнала, рассеянного земной поверхностью, связанные с динамикой фоновой электронной концентрации. Приведены также примеры поглощения подобного рассеянного сигнала во время солнечных вспышек. Продемонстрировано влияние крупномасштабных неоднородностей на групповую задержку и структуру сигнала, рассеянного от земной поверхности, а также среднемасштабных неоднородностей на групповую задержку и доплеровское смещение частоты рассеянного сигнала. Приведены примеры появления сигнала, рассеянного на магнитоориентированных неоднородностях, и вариаций доплеровского смещения частоты такого сигнала, связываемых чаще всего с магнитосферными волнами. Таким образом, показано, что импульсные декаметровые радары, включая радары SuperDARN, являются многофунк-

циональными чувствительными комплексами, испытывающими существенное влияние различных факторов космической погоды и позволяющими выполнять задачи контроля за эффектами космической погоды в ионосфере.

Автор благодарен NOAA за предоставление данных GOES [<http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>], а также сотрудникам ИСЗФ СО РАН А.В. Тащилину и С.Б. Луношкину за полезные обсуждения. Автор благодарен М.В. Успенскому за плодотворное обсуждение работы. Экспериментальные данные получены с использованием ЕКВ-радар ИСЗФ СО РАН в рамках выполнения проекта П.12.2.3. Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН 7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алебастров В., Гойхман Э., Заморин И. Основы загоризонтной радиолокации / Под ред. А.А. Колосова. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.
- Альперт Я.Л. Современное состояние вопроса об исследованиях ионосферы. III. Некоторые дополнительные вопросы // Успехи физических наук. 1949. Т. 38, вып. 3. С. 309–337. DOI: 10.3367/UFNr.0038.194907a.0309
- Афраймович Э.Л. Ионосферная фарадеевская модуляция интенсивности радиоастрономических сигналов // Доклады Академии наук. 2007. Т. 417, № 6. С. 818–822.
- Афраймович Э.Л., Жеребцов Г.А., Смольков Г.Я. Тотальный сбой спутниковой навигационной системы GPS во время солнечной вспышки 6 декабря 2006 г. / Доклады Академии наук. 2007. Т. 416, № 6. С. 817–821.
- Багаряцкий Б.А. Радиолокационные отражения от полярных сияний // Успехи физических наук. 1961. Т. 73, № 2. С. 197–241. DOI: 10.3367/UFNr.0073.196102a.0197.
- Виленский И.М., Ямпольский В.С., Цыдыпов Ч.Ц. Распространение средних радиоволн в ионосфере. Наука, 1983. 116 с.
- Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Физматгиздат, 1960. 550 с.
- Засенко В.Е., Ильин Н.В., Орлов И.И. Тонкая структура сигналов, отраженных от ионосферы // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. 1993. Вып. 100. С. 158–173.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.А. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
- Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 124 с.
- Кутелев К.А., Бернгардт О.И. Моделирование сигнала ВНЗ-радар SuperDARN в присутствии движущейся среднemasштабной неоднородности во время падения метеорита «Челябинск» // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 24. С. 15–26.
- Леонович А.С., Мазур В.А. Собственные сверхнизкочастотные магнитозвуковые колебания ближнего плазменного слоя // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 4. С. 336–343.
- Свердлов Ю.Л. Морфология радиоавроры. Л.: Наука, 1982. 160 с.
- Фельдштейн Я.И., Воробьев В.Г., Зверев В.Л. Планетарные закономерности полярных сияний. Итоги МГТ (обзор) // Геомагнетизм и аэронавигация. 2010. Т. 50, № 4. С. 435–458.
- Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations // Proc. IEEE. 1982. V. 70, N 4. P. 360–378. DOI: 10.1109/PROC.1982.12314.
- Aarons J., MacKenzie E., Bhavnani K. High latitude analytic formulas for scintillation levels // Radio Sci. 1980. V. 15, N 1. P. 115–127. DOI: 10.1029/RS015i001p00115.
- Afraimovich E.L., Astafeyeva E.I., Berngardt O.I., et al. Mid-latitude amplitude scintillations of GPS signals and GPS failures at the auroral oval boundary // Radiophysics and Quantum Electronics. 2004. V. 47, N 7. P. 453–468. DOI: 10.1023/B:RAQE.0000047237.67771.bc.
- Afraimovich E.L., Astafeyeva E.I., Oinats A.V., et al. Global electron content: a new conception to track solar activity // Ann. Geophys. 2008. V. 26, N 2. P. 335–344. DOI: 10.5194/angeo-26-335-2008.
- Akasofu S.-I. Physics of Magnetospheric Substorms. Dordrecht; Boston: D. Reidel Publishing Co, 1977. 617 p. DOI: 10.1007/978-94-010-1164-8.
- Aurorasaurus. 2016. URL: <http://aurorasaurus.org> (дата обращения 12 декабря 2016).
- Baker D.N., Jaynes A.N., Hoxie V.C., et al. An impenetrable barrier to ultrarelativistic electrons in the Van Allen radiation belts // Nature. 2014. V. 515, N 7528. P. 531–534. DOI: 10.1038/nature13956.
- Bala B., Lanzerotti L.J., Gary D.E., Thomson D.J. Noise in wireless systems produced by solar radio bursts // Radio Sci. 2002. V. 37, N 2. P. 2-1–2-7. DOI: 10.1029/2001RS002481.
- Bannister R. Simplified formulas for ELF propagation at shorter distance // Radio Sci. 1986. V. 21, N 3. P. 529–537. DOI: 10.1029/RS021i003p00529.
- Barlow W.H. On the spontaneous electrical currents observed in the wires of the electric telegraph // Phil. Trans. R. Soc. 1849. V. 139. P. 61–72.
- Barnard L., Scott C., Owens M., et al. The solar stormwatch CME catalogue: results from the first space weather citizen science project // Space Weather. 2014. V. 12, N 12. P. 657–674. DOI: 10.1002/2014SW001119.
- Basler R.P., Price G.H., Tsunoda R.T., Wong T.L. Ionospheric distortion of HF signals // Radio Sci. 1988. V. 23, N 4. P. 569–579. DOI: 10.1029/RS023i004p00569.
- Bastian T.S., Benz A.O., Gary D.E. Radio emission from solar flares // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1998. V. 36, N 1. P. 131–188. DOI: 10.1146/annurev.astro.36.1.131.
- Basu S., Basu Su. Equatorial scintillations — a review // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1981. V. 43, N 5–6. P. 473–489. DOI: 10.1016/0021-9169(81)90110-0.
- Basu Su., Basu S., MacKenzie E., Whitney H.E. Morphology of phase and intensity scintillations in the auroral oval and polar cap // Radio Sci. 1985. V. 20, N 3. P. 347–356. DOI: 10.1029/RS020i003p00347.
- Basu Su., Basu S., Weber E.J., Coley W.R. Case study of polar cap scintillation modeling using DE 2 irregularity measurements at 800 km // Radio Sci. 1988. V. 23, N 4. P. 545–553. DOI: 10.1029/RS023i004p00545.
- Béland J., Small K. Space Weather Effects on Power Transmission Systems: The Cases of Hydro-Québec and Transpower New Zealand Ltd // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 287–299. DOI: 10.1007/1-4020-2754-0_15.
- Benz A.O. Millisecond radio spikes // Solar Phys. 1986. V. 104. P. 99–110. DOI: 10.1007/BF00159950.
- Berngardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN scalar radar equations // Radio Sci. 2016. V. 51, N 10. P. 1703–1724. DOI: 10.1002/2016rs006081.
- Berngardt O.I., Zolotukhina N.A., Oinats A.V. Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: first results // Earth, Planets and Space. 2015a. V. 67, 143. DOI: 10.1186/s40623-015-0302-3.
- Berngardt O.I., Kutelev K.A., Kurkin V.I., et al. Bistatic sounding of high-latitude ionospheric irregularities using a decameter EKB radar and an UTR-2 radio telescope: first results // Radiophysics and Quantum Electronics. 2015b. V. 58, N 6. P. 390–408. DOI: 10.1007/s11141-015-9614-1.
- Berngardt O.I., Perevalova N.P., Dobrynina A.A., et al. Toward the azimuthal characteristics of ionospheric and seismic effects of Chelyabinsk meteorite fall according to the data from

- coherent radar, GPS, and seismic networks // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015c. V. 120, N 12. P. 10754–10771. DOI: 10.1002/2015JA021549.
- Berthardt O.I., Perevalova N.P., Podlesnyi A.V. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk chirp ionosonde data in 2011–2016 // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. V. 122. P. 4736–4754. DOI: 10.1002/2016JA023511.
- Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration // *J. Space Weather and Space Climate.* 2014. V. 4. 12 p. DOI: 10.1051/swsc/2014004.
- Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions // *Space Weather.* 2017. V. 15, iss. 2. P. 418–429. DOI: 10.1002/2016sw001593.
- Bland E.C., McDonald A.J., Menk F.W., Devlin J.C. Multipoint visualization of ULF oscillations using the Super Dual Auroral Radar Network // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41, N 18. P. 6314–6320. DOI: 10.1002/2014gl061371.
- Boteler D.H. Geomagnetically induced currents: present knowledge and future research // *IEEE Trans. on Power Delivery.* 1994. V. 9, N 1. P. 50–58. DOI: 10.1109/61.277679.
- Budden K.G. *The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere.* Cambridge University Press, 1988. 688 p.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 88, N 3. P. 563–601. DOI: 10.1023/A:1005107532631.
- Campbell W.H. Induction of auroral zone electric currents within the Alaska pipeline // *Pure and Applied Geophysics.* 1978. V. 116, N 6. P. 1143–1173. DOI: 10.1007/BF00874677.
- Cannon P.S., Angling M.J., Heaton J.A.T., et al. *The Effects of Space Weather on Radio Systems with a Focus on HF Systems // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure.* Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 185–201. DOI: 10.1007/1-4020-2754-0_10.
- Chau J.L., Kudeki E. Discovery of two distinct types of equatorial 150 km radar echoes // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40, N 17. P. 4509–4514. DOI: 10.1002/grl.50893.
- Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., et al. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: an Ekaterinburg coherent decameter radar case study // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121, N 2. P. 1315–1326. DOI: 10.1002/2015JA022155.
- Chen X.C., Lorentzen D.A., Moen J.I., et al. F-region ionosphere effects on the mapping accuracy of SuperDARN HF radar echoes // *Radio Sci.* 2016. V. 51, N 5. P. 491–506. DOI: 10.1002/2016rs005957.
- Chernov G.P. *Fine Structure of Solar Radio Bursts.* Springer, 2011. 300 p. DOI: 10.1007/978-3-642-20015-1. (Astrophys. Space Sci. Library. V. 375).
- Chisham G., Lester M., Milan S.E., et al. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions // *Surv. Geophys.* 2007. V. 28, N 1. P. 33–109. DOI: 10.1007/s10712-007-9017-8.
- Daniell R.E., Brown L.D., Anderson D.N., et al. Parameterized ionospheric model: a global ionospheric parameterization based on first principles models // *Radio Sci.* 1995. V. 30, N 5. P. 1499–1510. DOI: 10.1029/95RS01826.
- Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. 334 p. DOI: 10.1007/1-4020-2754-0. (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. V. 176).
- Erinmez I.A., Kappenman J.G., Radasky W.A. Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company's electric power transmission system // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. V. 64, N 5–6. P. 743–756. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00036-6.
- Fridman S.V., Nickisch L.J., Hausman M., Zunich G. Assimilative model for ionospheric dynamics employing delay, Doppler, and direction of arrival measurements from multiple HF channels // *Radio Sci.* 2016. V. 51, N 3. P. 176–183. DOI: 10.1002/2015rs005890.
- Gauld J.K., Yeoman T.K., Davies J.A., et al. SuperDARN radar HF propagation and absorption response to the substorm expansion phase // *Ann. Geophys.* 2002. V. 20. P. 1631–1645. DOI: 10.5194/angeo-20-1631-2002.
- Ghasemi A., Abedi A., Ghasemi F. *Propagation Engineering in Radio Links Design.* New York: Springer-Verlag, 2013. 549 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-5314-7.
- Gherm V.E., Zernov N.N., Strangeways H.J. Effects of diffraction by ionospheric electron density irregularities on the range error in GNSS dual-frequency positioning and phase decorrelation // *Radio Sci.* 2011. V. 46, N 3, RS3002. DOI: 10.1029/2010rs004624.
- Gillies R.G., Hussey G.C., Sofko G.J., et al. Improvement of HF coherent radar line-of-sight velocities by estimating the refractive index in the scattering volume using radar frequency shifting // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, A01302. DOI: 10.1029/2010JA016043.
- Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A., et al. Anthropogenic space weather // *Space Sci. Rev.* 2017. 55 p. DOI: 10.1007/s11214-017-0357-5.
- Goodman J.M. Electron content inhomogeneities in the lower ionosphere // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72, N 21. P. 5542–5546. DOI: 10.1029/JZ072i021p05542.
- Goodman J.M. *HF Communications: Science & Technology.* New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 631 p.
- Goodman J.M. *Space Weather & Telecommunications.* Springer US, 2005. 382 p. DOI: 10.1007/b102193.
- Goodman J.M., Aarons J. Ionospheric effects on modern electronic systems // *Proc. IEEE.* 1990. V. 78, N 3. P. 512–528. DOI: 10.1109/5.52228.
- Groves K.M., Basu S., Weber E.J., et al. Equatorial scintillation and systems support // *Radio Sci.* 1997. V. 32, N 5. P. 2047–2064. DOI: 10.1029/97rs00836.
- Haldoupis C.I. A review on radio studies of auroral E-region ionospheric irregularities // *Ann. Geophys.* 1989. V. 7. P. 239–258.
- Headrick J.M. Looking over the horizon // *IEEE Spectrum.* 1990. V. 27. P. 36–39. DOI: 10.1109/6.58421.
- Headrick J.M., Skolnik M. Over the horizon radar in the HF band // *Proc. IEEE.* 1974. V. 62, N 6. P. 664–673. DOI: 10.1109/PROC.1974.9506.
- Hernández-Pajares M., Wielgosz P., Paziewski J., et al. Direct MSTID mitigation in precise GPS processing // *Radio Sci.* 2017. 2016RS006159. DOI: 10.1002/2016rs006159.
- Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // *Rev. Geophys.* 1982. V. 20, N 2. P. 293–315. DOI: 10.1029/RG020i002p0293.
- Ionizing Radiation Effects in Electronics: From Memories to Imagers. CRC Press, 2015. 394 p.
- Ivanov V.A., Kurkin V.I., Nosov V.E., et al. CHIRP ionosonde and its application in the ionospheric research // *Radio-physics and Quantum Electronics.* 2003. V. 46, N 11. P. 821–851.
- Keil W. *Radiation Effects on Spacecraft and Countermeasures, Selected Cases // Space Weather: Research Towards Applications in Europe.* Dordrecht: Springer, 2007. P. 231–240. DOI: 10.1007/1-4020-5446-7_21.
- Kim H., Clauer C.R., Deshpande K., et al. Ionospheric irregularities during a substorm event: observations of ULF pulsations and GPS scintillations // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. V. 114. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.03.006.
- Klobuchar J.A. *A First-Order, Worldwide, Ionospheric Time Delay Algorithm: AFCRL-TR-75-0502.* ADA018862. 1975. 26 p.
- Klobuchar J.A., Anderson D.N., Bishop G.J., Doherty P.H. Measurements of transionospheric propagation parameters in the polar cap ionosphere // *AFGL-TR-87-1021.* 1987. N 973. 12 p.
- Knight P. *Medium frequency propagation: a survey // BBC RD 1983/5 (RA 210).* 20 p.
- Kutiev I., Tzagouri I., Perrone L., et al. Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere // *J. Space Weather and Space Climate.* 2013. V. 3, N 27. A06. DOI: 10.1051/swsc/2013028.

- Landeau T., Gauthier F., Ruelle N. 1997. Further improvements to the inversion of elevation-scan backscatter sounding data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 59, N 1. P. 125–138.
- Lee J. Radio emissions from solar active regions // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 133. P. 73–102. DOI: 10.1007/s11214-007-9206-2.
- Liu H., Wang W., Richmond A.D., Roble R.G. Ionospheric variability due to planetary waves and tides for solar minimum conditions // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010. V. 115, N A6, A00G01. DOI: 10.1029/2009JA015188.
- Liu H., Jin H., Miyoshi Y., Fujiwara H., Shinagawa H. Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: local time and height dependence simulated by GAIA model // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40, N 3. P. 635–640. DOI: 10.1002/grl.50146.
- Lognonné P., Clévéde E., Kanamori H. Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal-mode summation for a spherical Earth model with realistic atmosphere // *Geophys. J. Intern.* 1998. V. 135, N 2. P. 388–406. DOI: 10.1046/j.1365-246x.1998.00665.x.
- Lotóaniu T.M., Singer H.J., Rodriguez J.V., et al. Space weather conditions during the Galaxy 15 spacecraft anomaly // *Space Weather.* 2015. V. 13, N 8. P. 484–502. DOI: 10.1002/2015SW001239.
- Love J.J., Coisson P. The geomagnetic blitz of September 1941 // *Eos. Earth & Space Science News.* 2016. V. 97. P. 18–22. DOI: 10.1029/2016EO059319.
- Love J.J., Pulkkinen A., Bedrosian P.A., et al. Geoelectric hazard maps for the continental United States // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 18. P. 9415–9424. DOI: 10.1002/2016GL070469.
- Machol J.L., Green J.C., Redmon R.J., et al. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae // *Space Weather.* 2012. V. 10, N 3. S03005. DOI: 10.1029/2011SW000746.
- Mager P.N., Bergardt O.I., Klimushkin D.Yu., et al. First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 130–131. P. 112–126. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.05.017.
- Marshall R.A., Smith E.A., Francis M.J., et al. A preliminary risk assessment of the Australian region power network to space weather // *Space Weather.* 2011. V. 9, N 10. S10004. DOI: 10.1029/2011SW000685.
- Mikhailov A.V., Perrone L. Geomagnetic control of the mid-latitude daytime f_oF1 and f_oF2 long-term variations: physical interpretation using European observations // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121, N 7. P. 7193–7203. DOI: 10.1002/2016ja022716.
- Mullen J.P., MacKenzie E., Basu S., Whitney H. UHF/GHz scintillation observed at Ascension Island from 1980 through 1982 // *Radio Sci.* 1985. V. 20, N 3. P. 357–365. DOI: 10.1029/RS020i003p00357.
- National Space Weather Action Plan. National Science and Technology Council, 2015. 42 p.
- National Space Weather Strategy. National Space and Technology Council, 2015. 18 p.
- Obama B. Executive Order: Coordinating Efforts to Prepare the Nation for Space Weather Events. 2016. URL: <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2016/10/13/execute-order-coordinating-efforts-prepare-nation-space-weather-events> (дата обращения 12 декабря 2016).
- Odstrcil D. Modeling 3-D solar wind structure // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32, N 4. P. 497–506. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00332-6.
- Ogawa T., Nishitani N., Tsugawa T., Shiokawa K. Giant ionospheric disturbances observed with the SuperDARN Hokkaido HF radar and GPS network after the 2011 Tohoku earthquake // *Earth, Planets and Space.* 2012. V. 64. P. 1295–1307. DOI: 10.5047/eps.2012.08.001.
- Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., et al. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data // *Earth, Planets and Space.* 2016. V. 68, 8. DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8.
- Pappert R.A. Effects of a large patch of sporadic E on the nighttime propagation at lower ELF // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1980. V. 42, N 5. P. 417–425. DOI: 10.1016/0021-9169(80)90001-X.
- Pappert R.A., Moler W.F. A theoretical study of ELF normal mode reflection and absorption produced by nighttime ionospheres // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1978. V. 40, N 9. P. 1031–1045. DOI: 10.1016/0021-9169(78)90008-9.
- Patra A.K., Srinivasulu P., Pavan Chaitanya P.P. First results on low-latitude E- and F-region irregularities obtained using the Gadanki Ionospheric Radar Interferometer (GIRI) // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. V. 119, N 12. P. 10276–10293. DOI: 10.1002/2014ja020604.
- Perrone L., Alfonsi L., Romano V., de Franceschi G. Polar cap absorption events of November 2001 at Terra Nova Bay, Antarctica // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22, N 5. P. 1633–1648. DOI: 10.5194/angeo-22-1633-2004.
- Pirjola R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000. V. 28, N 6. P. 1867–1873. DOI: 10.1109/27.902215.
- Principles of Modern Radar: Basic Principles. Scitech Publishing, 2010. 960 p. DOI: 10.1049/SBRA021E.
- Priyadarshi S. A review of ionospheric scintillation models // *Surveys in Geophys.* 2015. V. 36, N 2. P. 295–324. DOI: 10.1007/s10712-015-9319-1.
- Pulkkinen A., Lindahl S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system // *Space Weather.* 2005. V. 3, N 8. S08C03. DOI: 10.1029/2004SW000123.
- Radicella S.M., Leitinger R. The evolution of the DGR approach to model electron density profiles // *Adv. Space Res.* 2001. V. 27, N 1. P. 35–40. DOI: 10.1016/S0273-1177(00)00138-1.
- Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., et al. Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar // *Radio Sci.* 1997. V. 32, N 4. P. 1681–1694. DOI: 10.1029/97rs00841.
- Rino C.L., Matthews S.J. On the morphology of auroral zone radio wave scintillation // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 85, N A8. P. 4139–4151. DOI: 10.1029/JA085iA08p04139.
- Rogov D.D., Moskaleva E.V., Zaalov N.Y. Modeling of high frequency radio wave absorption on oblique soundings during a solar X-ray flare // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55, N 2. P. 597–604. DOI: 10.1016/j.asr.2014.11.001.
- Rostoker G. Geomagnetic indices // *Rev. Geophys.* 1972. V. 10, N 4. P. 935–950. DOI: 10.1029/RG010i004p00935.
- Schumann W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist // *Zeitschrift für Naturforschung A.* 1952. V. 7, iss. 2. P. 149–154. DOI: 10.1515/zna-1952-0202.
- Settimi A., Ippolito A., Cesaroni C., Scotto C. Scientific review on the ionospheric absorption and research prospects of a complex eikonal model for one-layer ionosphere // *Intern. J. Geophys.* 2014. V. 2014. DOI: 10.1155/2014/657434.
- Settimi A., Pietrella M., Pezzopane M., Bianchi C. The IONORT-ISP-WC system: inclusion of an electron collision frequency model for the D-layer // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55, N 8. P. 2114–2123. DOI: 10.1016/j.asr.2014.07.040.
- Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report. Washington: The National Academies Press, 2008. 144 p. DOI: 10.17226/12507.
- Shibasaki K., Alissandrakis C.E., Pohjolainen S. Radio emission of the quiet Sun and active regions (Invited Review) // *Solar Phys.* 2011. V. 273. P. 309–337. DOI: 10.1007/s11207-011-9788-4.
- Solar and Space Physics: A Science for a Technological Society. Washington: The National Academies Press, 2013. 446 p. DOI: 10.17226/13060.
- Solar and Space Weather Radiophysics — Current Status and Future Developments. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers,

2004. 424 p. DOI: 10.1007/1-4020-2814-8. (Astrophys. Space Sci. Library. V. 314).

Sonnenschein E., Censor D., Rutkevich I., Bennett J.A. Ray trajectories in an absorbing ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997. V. 59, N 16. P. 2101–2110. DOI: 10.1016/s1364-6826(97)00035-7.

Space Weather — Effects on Technology. Canadian Space Weather Forecast Centre, 2012. 3 p.

Space Weather: Research Towards Applications in Europe. Dordrecht: Springer, 2007. 332 p. DOI: 10.1007/1-4020-5446-7. (Astrophys. and Space Sci. Library. V. 344).

Stocker A.J., Arnold N.F., Jones T.B. The synthesis of travelling ionospheric disturbance (TID) signatures in HF radar observations using ray tracing // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18, N 1. P. 56–64. DOI: 10.1007/s00585-000-0056-4.

The Sun to the Earth — and Beyond: A Decadal Research Strategy in Solar and Space Physics / National Research Council. Washington: The National Academies Press, 2003. 196 p. DOI: 10.17226/10477.

Thomson A.W.P., Dawson E.B., Reay S.J. Quantifying extreme behavior in geomagnetic activity // *Space Weather.* 2011. V. 9, N 10, S10001. DOI: 10.1029/2011SW000696.

Troshichev O., Janzhura A., Stauning P. Unified PCN and PCS indices: method of calculation, physical sense, and dependence on the IMF azimuthal and northward components // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2006. V. 111, N A5, A05208. DOI: 10.1029/2005JA011402.

Tsunoda R.T. High-latitude F region irregularities: a review and synthesis // *Rev. Geophys.* 1988. V. 26, N 4. P. 719–760. DOI: 10.1029/RG026i004p00719.

Tsunoda R.T., Maruyama T., Tsugawa T., et al. Off-great-circle paths in transequatorial propagation 2. Non-magnetic-field-aligned reflections // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121, iss. 11. P. 11,176–11,190. DOI: 10.1002/2016ja022404.

Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Vertogradova E.G. Spread-F radar observations in the midlatitude ionosphere using an ionosonde–Radiodirection finder // *Radiophys. Quantum Electronics.* 2013. V. 56, N 1. P. 1–11. DOI: 10.1007/s11141-013-9411-7.

Wang J.C.H. A sky-wave propagation study in preparation for the 1605–1705 kHz broadcasting conference // *IEEE Trans. on Broadcasting.* 1985. V. BC-31, N 1. P. 10–17. DOI: 10.1109/TBC.1985.266546.

Warrington E.M., Stocker A.J., Siddle D.R., et al. Near real-time input to a propagation model for nowcasting of HF communications with aircraft on polar routes // *Radio Sci.* 2016. V. 51, N 7. P. 1048–1059. DOI: 10.1002/2015rs005880.

Weber E.J., Tsunoda R.T., Buchau J., et al. Coordinated measurements of auroral zone enhancements // *J. Geophys. Res.* 1985. V. 90, N A7. P. 6497–9513. DOI: 10.1029/JA090iA07p06497.

Wernik A.W., Secan J.A., Fremouw E.J. Ionospheric irregularities and scintillation // *Adv. Space Res.* 2003. V. 31, N 4. P. 971–981. DOI: 10.1016/s0273-1177(02)00795-0.

Whiteson D., Mulhearn M., Shimmin C., et al. Observing ultra-high energy cosmic rays with smartphones // *LANL ARXIV.* 2014. arXiv: 1410.2895.

Wikipedia. List of citizen science projects. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_citizen_science_projects. 2016. (дата обращения 12 декабря 2016).

Xiong C., Stolle C., Lühr H. The Swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities // *Space Weather.* 2016. V. 14, N 8. P. 563–577. DOI: 10.1002/2016SW001439.

Zolesi B., Cander L.R. Ionospheric Prediction and Forecasting. Berlin; Heidelberg: Springer Geophysics, 2014. 252 p. DOI: 10.1007/978-3-642-38430-1.

URL: <http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux> (дата обращения 12 декабря 2016).

URL: <http://www.swpc.noaa.gov> (дата обращения 12 декабря 2016).

REFERENCES

Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations. *Proc. IEEE.* 1982, vol. 70, no. 4, pp. 360–378. DOI: 10.1109/PROC.1982.12314.

Aarons J., MacKenzie E., Bhavnani K. High latitude analytic formulas for scintillation levels. *Radio Sci.* 1980, vol. 15, no. 1, pp. 115–127. DOI: 10.1029/RS015i001p00115.

Afraimovich E.L. Ionospheric Faraday modulation of radioastronomical signals intensity. *Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sci.]*. 2007, vol. 417, no. 6, pp. 818–822. (In Russian).

Afraimovich E.L., Astaf'eva E.I., Berngardt O.I., et al. Mid-latitude amplitude scintillations of GPS signals and GPS failures at the auroral oval boundary. *Radiophysica and Quantum Electronics.* 2004, vol. 47, no. 7, pp. 453–468. DOI: 10.1023/B:RAQE.0000047237.67771.bc.

Afraimovich E.L., Zhrebtsov G.A., Smol'kov G.Ya. Total failure of the satellite navigation system GPS during December 6, 2006 solar flare. *Doklady Akademii nauk [Doklady Earth Sci.]*. 2007, vol. 416, no. 6, pp. 817–821. (In Russian).

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., et al. Global electron content: a new conception to track solar activity. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, no. 2, pp. 335–344. 617 p. DOI: 10.5194/angeo-26335-2008.

Akasofu S.-I. *Physics of Magnetospheric Substorms.* Boston, D. Reidel Publishing Co, 1977, DOI: 10.1007/978-94-010-1164-8.

Alebastrov V., Gohjman Je., Zamorin I. Osnovy zagorizontnoi radiolokatsii [*Fundamentals of Over-the-Horizon Radiolocation*]. Moscow, Radio i Svyaz' Publ., 1984, 256 p. (In Russian).

Al'pert Ya.L. The current state of the problem of ionospheric studies. III. Some additional questions. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Soviet Physics–Uspekhi (Adv. Phys. Sci.)]*. 1949, vol. 38, iss. 3, pp. 309–337. DOI: 10.3367/UFNr.0038.194907a.0309.

Aurorasaurus. 2016. URL: <http://aurorasaurus.org> (accessed December 12, 2016).

Bagaryatsky B.A. Radar reflections from aurorae. *Uspekhi fizicheskikh nauk [Soviet Physics–Uspekhi (Adv. Phys. Sci.)]*. 1961, vol. 73, no. 2, pp. 197–241. DOI: 10.3367/UFNr.0073.196102a.0197. (In Russian).

Baker D.N., Jaynes A.N., Hoxie V.C., et al. An impenetrable barrier to ultrarelativistic electrons in the Van Allen radiation belts. *Nature.* 2014, vol. 515, no. 7528, pp. 531–534. DOI: 10.1038/nature13956.

Bala B., Lanzerotti L.J., Gary D.E., Thomson D.J. Noise in wireless systems produced by solar radio bursts. *Radio Sci.* 2002, vol. 37, no. 2, pp. 2-1–2-7. DOI: 10.1029/2001RS002481.

Bannister R. Simplified formulas for ELF propagation at shorter distance. *Radio Sci.* 1986, vol. 21, no. 3, pp. 529–537. DOI: 10.1029/RS021i003p00529.

Barlow W.H. On the spontaneous electrical currents observed in the wires of the electric telegraph. *Phil. Trans. R. Soc.* 1849, vol. 139, pp. 61–72.

Barnard L., Scott C., Owens M., et al. The Solar Stormwatch CME catalogue: results from the first space weather citizen science project. *Space Weather.* 2014, vol. 12, no. 12, pp. 657–674. DOI: 10.1002/2014SW001119.

Basler R.P., Price G.H., Tsunoda R.T., Wong T.L. Ionospheric distortion of HF signals. *Radio Sci.* 1988, vol. 23, no. 4, pp. 569–579. DOI: 10.1029/RS023i004p00569.

Bastian T.S., Benz A.O., Gary D.E. Radio emission from solar flares. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* 1998, vol. 36, no. 1, pp. 131–188. DOI: 10.1146/annurev.astro.36.1.131.

Basu S., Basu Su. Equatorial scintillations — a review. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1981, vol. 43, no. 5–6, pp. 473–489. DOI: 10.1016/0021-9169(81)90110-0.

Basu Su., Basu S., MacKenzie E., Whitney H.E. Morphology of phase and intensity scintillations in the auroral oval and polar cap. *Radio Sci.* 1985, vol. 20, no. 3, pp. 347–356. DOI: 10.1029/RS020i003p00347.

- Basu S., Basu S., Weber E.J., Coley W.R. Case study of polar cap scintillation modeling using DE 2 irregularity measurements at 800 km. *Radio Sci.* 1988, vol. 23, no. 4, pp. 545–553. DOI: 10.1029/RS023i004.p00545.
- Béland J., Small K. Space Weather Effects on Power Transmission Systems: The Cases of Hydro-Québec and Transpower New Zealand Ltd. *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 287–299. DOI: 10.1007/1-4020-2754-0_15.
- Benz A.O. Millisecond radio spikes. *Solar Phys.* 1986, vol. 104, pp. 99–110. DOI: 10.1007/BF00159950.
- Bergardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN scalar radar equations. *Radio Sci.* 2016, vol. 51, no. 10, pp. 1703–1724. DOI: 10.1002/2016rs006081.
- Bergardt O.I., Zolotukhina N.A., Oinats A.V. Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: first results. *Earth, Planets and Space*. 2015a, vol. 67, 143. DOI: 10.1186/s40623-015-0302-3.
- Bergardt O.I., Kutelev K.A., Kurkin V.I., et al. Bistatic sounding of high-latitude ionospheric irregularities using a decimeter EKB radar and an UTR-2 radio telescope: first results. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015b, vol. 58, no. 6, pp. 390–408. DOI: 10.1007/s11141015-9614-1.
- Bergardt O.I., Perevalova N.P., Dobrynina A.A., et al. Toward the azimuthal characteristics of ionospheric and seismic effects of Chelyabinsk meteorite fall according to the data from coherent radar, GPS, and seismic networks. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015c, vol. 120, no. 12, pp. 10754–10771. DOI: 10.1002/2015JA021549.
- Berghardt O.I., Perevalova N.P., Podlesnyi A.V., Kurkin V.I., Zherebtsov G.A. Vertical midscale ionospheric disturbances caused by surface seismic waves based on Irkutsk chirp ionosonde data in 2011–2016. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 4736–4754. DOI: 10.1002/2016JA023511.
- Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration. *J. Space Weather and Space Climate*. 2014, vol. 4, A07. 12 p. DOI: 10.1051/swsc/2014004.
- Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I.A., Reinisch B., and Huang X. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017, vol. 15, iss. 2, pp. 418–429. DOI: 10.1002/2016sw001593.
- Bland E.C., McDonald A.J., Menk F.W., Devlin J.C. Multipoint visualization of ULF oscillations using the Super Dual Auroral Radar Network. *Geophys. Res. Lett.* 2014, vol. 41, no. 18, pp. 6314–6320. DOI: 10.1002/2014gl061371.
- Boteler D.H. Geomagnetically induced currents: present knowledge and future research. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1994, vol. 9, no. 1, pp. 50–58. DOI: 10.1109/61.277679.
- Budden K.G. *The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere*. Cambridge University Press, 1988, 688 p.
- Buonsanto M.J. Ionospheric storms — a review. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, no. 3, pp. 563–601. DOI: 10.1023/A:1005107532631.
- Campbell W.H. Induction of auroral zone electric currents within the Alaska pipeline. *Pure and Applied Geophysics*. 1978, vol. 116, no. 6, pp. 1143–1173. DOI: 10.1007/BF00874677.
- Cannon P.S., Angling M.J., Heaton J.A.T., et al. The Effects of Space Weather on Radio Systems with a focus on HF systems. *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 185–201. DOI: 10.1007/1-4020-2754-0_10.
- Chau J.L., Kudeli E. Discovery of two distinct types of equatorial 150 km radar echoes. *Geophys. Res. Lett.* 2013, vol. 40, no. 17, pp. 4509–4514. DOI: 10.1002/grl.50893.
- Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., et al. Experimental evidence of drift compressional waves in the magnetosphere: an Ekaterinburg coherent decimeter radar case study. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, no. 2, pp. 1315–1326. DOI: 10.1002/2015JA022155.
- Chen X.C., Lorentzen D.A., Moen J.I., et al. F-region ionosphere effects on the mapping accuracy of SuperDARN HF radar echoes. *Radio Sci.* 2016, vol. 51, no. 5, pp. 491–506. DOI: 10.1002/2016rs005957.
- Chernov G.P. *Fine Structure of Solar Radio Bursts*. Springer, 2011, 300 p. DOI: 10.1007/978-3-642-20015-1. (*Astrophys. Space Sci. Library*. vol. 375).
- Chisham G., Lester M., Milan S.E., et al. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions. *Surv. Geophys.* 2007, vol. 28, no. 1, pp. 33–109. DOI: 10.1007/s10712-007-9017-8.
- Daniell R.E., Brown L.D., Anderson D.N., et al. Parameterized ionospheric model: a global ionospheric parameterization based on first principles models. *Radio Sci.* 1995, vol. 30, no. 5, pp. 1499–1510. DOI: 10.1029/95RS01826.
- Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2004. 334 p. DOI: 10.1007/1-4020-2754-0. (NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, vol. 176).
- Erinmez I.A., Kappenman J.G., Radasky W.A. Management of the geomagnetically induced current risks on the national grid company's electric power transmission system. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002, vol. 64, no. 5–6, pp. 743–756. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00036-6.
- Fel'dshtejn Ya.I., Vorob'ev V.G., Zverev V.L. Planetary patterns of auroras. The results of the International Geophysical Year (Review). *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2010, vol. 50, no. 4, pp. 435–458. (In Russian).
- Fridman S.V., Nickisch L.J., Hausman M., Zunich G. Assimilative model for ionospheric dynamics employing delay, Doppler, and direction of arrival measurements from multiple HF channels. *Radio Sci.* 2016, vol. 51, no. 3, pp. 176–183. DOI: 10.1002/2015rs005890.
- Gauld J.K., Yeoman T.K., Davies J.A., et al. SuperDARN radar HF propagation and absorption response to the substorm expansion phase. *Ann. Geophys.* 2002, vol. 20, pp. 1631–1645. DOI: 10.5194/angeo-20-1631-2002.
- Ghasemi A., Abedi A., Ghasemi F. *Propagation Engineering in Radio Links Design*. New York, Springer-Verlag, 2013, 549 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-5314-7.
- Gherm V.E., Zernov N.N., Strangeways H.J. Effects of diffraction by ionospheric electron density irregularities on the range error in GNSS dual-frequency positioning and phase decorrelation. *Radio Sci.* 2011, vol. 46, no. 3, RS3002. DOI: 10.1029/2010rs004624.
- Gillies R.G., Hussey G.C., Sofko G.J., et al. Improvement of HF coherent radar line-of-sight velocities by estimating the refractive index in the scattering volume using radar frequency shifting. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A01302. DOI: 10.1029/2010JA016043.
- Ginzburg V.L. *Rasprostraneniye elektromagnitnykh voln v plazme* [Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma]. Moscow, Fizmatizdat Publ., 1960. 550 p. (In Russian).
- Gombosi T.I., Baker D.N., Balogh A., Erickson P.J., Huba J.D., Lanzerotti L.J. *Anthropogenic Space Weather*. *Space Sci. Rev.* 2017, 55 p. DOI: 10.1007/s11214-017-0357-5.
- Goodman J.M. Electron content inhomogeneities in the lower ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1967, vol. 72, no. 21, pp. 5542–5546. DOI: 10.1029/JZ072i021p05542.
- Goodman J.M. *HF Communications: Science & Technology*. New York, Van Nostrand Reinhold Publ., 1991, 631 p.
- Goodman J.M. *Space Weather & Telecommunications*. Springer US, 2005, 382 p. DOI: 10.1007/b102193.
- Goodman J.M., Aarons J. 1990. Ionospheric effects on modern electronic systems. *Proc. IEEE*. vol. 78, no. 3, pp. 512–528. DOI: 10.1109/5.52228.
- Groves K.M., Basu S., Weber E.J., et al. Equatorial scintillation and systems support. *Radio Sci.* 1997, vol. 32, no. 5, pp. 2047–2064. DOI: 10.1029/97rs00836.
- Haldoupis C.I. A review on radio studies of auroral E-region ionospheric irregularities. *Ann. Geophys.* 1989, vol. 7, pp. 239–258.

- Headrick J.M. Looking over the horizon. *IEEE Spectrum*. 1990, vol. 27, pp. 36–39. DOI: 10.1109/6.58421.
- Headrick J.M., Skolnik M. Over the horizon radar in the HF band. *Proc. IEEE*. 1974, vol. 62, no. 6, pp. 664–673. DOI: 10.1109/PROC.1974.9506.
- Hernández-Pajares M., Wielgosz P., Paziewski J., Krypiak-Gregorczyk A., Krukowska M., Stepniak K., Kaplon J., Hadas T., Sosnica K., Bosy J., Orus-Perez R., Monte-Moreno E., Yang H., Garcia-Rigo A., Olivares-Pulido G. Direct MSTID mitigation in precise GPS processing. *Radio Sci.* 2017, 2016RS006159. DOI: 10.1002/2016rs006159.
- Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review. *Rev. Geophys.* 1982, vol. 20, no. 2, pp. 293–315. DOI: 10.1029/RG020i002p00293.
- Ionizing Radiation Effects in Electronics: From Memories to Imagers*. CRC Press, 2015. 394 p.
- Ivanov V.A., Kurkin V.I., Nosov V.E., et al. CHIRP ionosonde and its application in the ionospheric research. *Radiophysics and Quantum electronics*. 2003, vol. 46, no. 11, pp. 821–851.
- Keil W. Radiation Effects on Spacecraft and Countermeasures, Selected Cases. *Space Weather: Research Towards Applications in Europe*. Dordrecht: Springer, 2007, pp. 231–240. DOI: 10.1007/1-4020-5446-7_21.
- Kim H., Clauer C.R., Deshpande K., et al. Ionospheric irregularities during a substorm event: observations of ULF pulsations and GPS scintillations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014, vol. 114, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.jastp.2014.03.006.
- Klobuchar J.A. A First-Order, Worldwide, Ionospheric Time Delay Algorithm. *AFCRL-TR-75-0502*. 1975, ADA018862, 26 p.
- Klobuchar J.A., Anderson D.N., Bishop G.J., Doherty P.H. Measurements of transionospheric propagation parameters in the polar cap ionosphere. *AFGL-TR-87-1021*. 1987, no. 973, 12 p.
- Knight P. Medium frequency propagation: a survey. *BBC RD 1983/5 (RA210)*. 1983, 20 p.
- Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.A. Geometrichkaya optika neodnorodnykh sred [*Geometrical Optics of Inhomogeneous Media*]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 304 p. (In Russian).
- Kurkin V.I., Orlov I.I., Popov V.N. Metod normal'nykh voln v probleme korotkovolnovoi radiosvyazi [*Normal Mode Method in a Problem of Short-Wave Radio Communication*]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 124 p. (In Russian).
- Kutelev K.A., Berngardt O.I. Simulation SuperDARN radar ground backscatter signal in the presence of a moving midscale inhomogeneity during the fall of Chelyabinsk meteorite]. *Solnechno-zemnaja fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2013, vol. 24, pp. 15–26. (In Russian)
- Kutiev I., Tsagouri I., Perrone L., et al. Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere. *J. Space Weather and Space Climate*. 2013, vol. 3, no. 27, A06. DOI: 10.1051/swsc/2013028.
- Landeau T., Gauthier F., Ruelle N. Further improvements to the inversion of elevation-scan backscatter sounding data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997, vol. 59, no. 1, pp. 125–138.
- Lee J. Radio emissions from solar active regions. *Space Sci. Rev.* 2007, vol. 133, pp. 73–102. DOI: 10.1007/s11214-007-9206-2.
- Leonovich A.S., Mazur V.A. Eigen ultra-low magnetoacoustic oscillations of the near plasma sheet. *Kosmicheskie issledovaniya* [Space Res.]. 2008, vol. 46, no. 4, pp. 336–343. (In Russian).
- Liu H., Wang W., Richmond A.D., Roble R.G. Ionospheric variability due to planetary waves and tides for solar minimum conditions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010, vol. 115, no. A6, A00G01. DOI: 10.1029/2009JA015188.
- Liu H., Jin H., Miyoshi Y., Fujiwara H., Shinagawa H. Upper atmosphere response to stratosphere sudden warming: local time and height dependence simulated by GAIA model. *Geophys. Res. Lett.* 2013, vol. 40, no. 3, pp. 635–640. DOI: 10.1002/grl.50146.
- Lognonné P., Clévéde E., Kanamori H. Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal-mode summation for a spherical Earth model with realistic atmosphere. *Geophys. J. Intern.* 1998, vol. 135, no. 2, pp. 388–406. DOI: 10.1046/j.1365-246x.1998.00665.x.
- Lotóaniu T.M., Singer H.J., Rodriguez J.V., et al. Space weather conditions during the Galaxy 15 spacecraft anomaly. *Space Weather*. 2015, vol. 13, no. 8, pp. 484–502. DOI: 10.1002/2015SW001239.
- Love J.J., Coisson P. The geomagnetic blitz of September 1941. *Eos. Earth & Space Science News*. 2016, vol. 97, pp. 18–22. DOI: 10.1029/2016EO059319.
- Love J.J., Pulkkinen A., Bedrosian P.A., et al. Geoelectric hazard maps for the continental United States. *Geophys. Res. Lett.* 2016, vol. 43, no. 18, pp. 9415–9424. DOI: 10.1002/2016GL070469.
- Machol J.L., Green J.C., Redmon R.J., Viereck R.A., Newell P.T. Evaluation of OVATION Prime as a forecast model for visible aurorae. *Space Weather*. 2012, vol. 10, no. 3, S03005. DOI: 10.1029/2011SW000746.
- Mager P.N., Berngardt O.I., Klimushkin D.Yu., et al. First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 130–131, pp. 112–126. DOI: 10.1016/j.jastp.2015.05.017.
- Marshall R.A., Smith E.A., Francis M.J., et al. A preliminary risk assessment of the Australian region power network to space weather. *Space Weather*. 2011, vol. 9, no. 10, S10004. DOI: 10.1029/2011SW000685.
- Mikhailov A.V., Perrone L. Geomagnetic control of the midlatitude daytime f_oF1 and f_oF2 long-term variations: physical interpretation using European observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, no. 7, pp. 7193–7203. DOI: 10.1002/2016ja022716.
- Mullen J.P., MacKenzie E., Basu S., Whitney H. UHF/GHz scintillation observed at Ascension Island from 1980 through 1982. *Radio Sci.* 1985, vol. 20, no. 3, pp. 357–365. DOI: 10.1029/RS020i003p00357.
- National Space Weather Action Plan*. National Science and Technology Council, 2015. 42 p.
- National Space Weather Strategy*. National Science and Technology Council, 2015. 18 p.
- Obama B. *Executive Order: Coordinating Efforts to Prepare the Nation for Space Weather Events*. 2016. URL: <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2016/10/13/executive-order-coordinating-efforts-prepare-nation-space-weather-events> (accessed December 12, 2016).
- Odstreil D. Modeling 3-D solar wind structure. *Adv. Space Res.* 2003, vol. 32, no. 4, pp. 497–506. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00332-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00332-6).
- Ogawa T., Nishitani N., Tsugawa T., Shiokawa K. Giant ionospheric disturbances observed with the SuperDARN Hokkaido HF radar and GPS network after the 2011 Tohoku earthquake. *Earth, Planets and Space*. 2012, vol. 64, pp. 1295–1307. DOI: 10.5047/eps.2012.08.001.
- Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Berngardt O.I., Ratovsky K.G. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data. *Earth, Planets and Space*. 2016, vol. 68, iss. 1, 8. DOI: 10.1186/s40623-016-0390-8.
- Pappert R.A. Effects of a large patch of sporadic E on the nighttime propagation at lower ELF. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1980, vol. 42, no. 5, pp. 417–425. DOI: 10.1016/0021-9169(80)90001-X.
- Pappert R.A., Moler W.F. A theoretical study of ELF normal mode reflection and absorption produced by nighttime ionospheres. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1978, vol. 40, no. 9, pp. 1031–1045. DOI: 10.1016/0021-9169(78)90008-9.
- Patra A.K., Srinivasulu P., Pavan Chaitanya P.P. First results on low-latitude E- and F-region irregularities obtained using the Gadanki Ionospheric Radar Interferometer (GIRI). *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, no. 12, pp. 10276–10293. DOI: 10.1002/2014ja020604.
- Perrone L., Alfonsi L., Romano V., de Franceschi G. Polar cap absorption events of November 2001 at Terra Nova Bay, Antarctica. *Ann. Geophys.* 2004, vol. 22, no. 5, pp. 1633–1648. DOI: 10.5194/angeo-221633-2004.

- Pirjola R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2000, vol. 28, no. 6, pp. 1867–1873. DOI: 10.1109/27.902215.
- Principles of Modern Radar: Basic Principles.* Scitech Publishing, 2010. 960 p. DOI: 10.1049/SBRA021E.
- Priyadarshi S. A review of ionospheric scintillation models. *Surveys in Geophysics.* 2015, vol. 36, no. 2, pp. 295–324. DOI: 10.1007/s10712-015-9319-1.
- Pulkkinen A., Lindahl S., Viljanen A., Pirjola R. Geomagnetic storm of 29–31 October 2003: geomagnetically induced currents and their relation to problems in the Swedish high-voltage power transmission system. *Space Weather.* 2005, vol. 3, no. 8, S08C03. DOI: 10.1029/2004SW000123.
- Radicella S.M., Lehtinger R. The evolution of the DGR approach to model electron density profiles. *Adv. Space Res.* 2001, vol. 27, no. 1, pp. 35–40. DOI: 10.1016/S0273-1177(00)00138-1.
- Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., et al. Ionospheric sounding in support of over-the-horizon radar. *Radio Sci.* 1997, vol. 32, no. 4, pp. 1681–1694. DOI: 10.1029/97rs00841.
- Rino C.L., Matthews S.J. On the morphology of auroral zone radio wave scintillation. *J. Geophys. Res.* 1980, vol. 85, no. A8, pp. 4139–4151. DOI: 10.1029/JA085iA08p04139.
- Rogov D.D., Moskaleva E.V., Zaalov N.Y. Modeling of high frequency radio wave absorption on oblique soundings during a solar X-ray flare. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, no. 2, pp. 597–604. DOI: 10.1016/j.asr.2014.11.001.
- Rostoker G. Geomagnetic indices. *Rev. Geophys.* 1972, vol. 10, no. 4, pp. 935–950. DOI: 10.1029/RG010i004p00935.
- Schumann W.O. Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Zeitschrift für Naturforschung A.* 1952, vol. 7, iss. 2, pp. 149–154. DOI: 10.1515/zna-1952-0202. (In German).
- Settimi A., Ippolito A., Cesaroni C., Scotto C. Scientific review on the ionospheric absorption and research prospects of a complex eikonal model for one-layer ionosphere. *Intern. J. Geophys.* 2014, vol. 2014. DOI: 10.1155/2014/657434.
- Settimi A., Pietrella M., Pezzopane M., Bianchi C. The IONORT-ISP-WC system: inclusion of an electron collision frequency model for the D-layer. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 55, no. 8, pp. 2114–2123. DOI: 10.1016/j.asr.2014.07.040.
- Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts: A Workshop Report.* Washington, The National Academies Press, 2008, 144 p. DOI: 10.17226/12507.
- Shibasaki K., Alissandrakis C.E., Pohjolainen S. Radio emission of the quiet Sun and active regions (invited Review). *Solar Phys.* 2011, vol. 273, pp. 309–337. DOI: 10.1007/s11207-011-9788-4.
- Solar and Space Physics: A Science for a Technological Society.* Washington, The National Academies Press, 2013, 446 p. DOI: 10.17226/13060.
- Solar and Space Weather Radiophysics — Current Status and Future Developments.* Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2004, 424 p. DOI: 10.1007/1-4020-2814-8. (Astrophys. Space Sci. Library, vol. 314).
- Sonnenschein E., Censor D., Rutkevich I., Bennett J.A. Ray trajectories in an absorbing ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1997, vol. 59, no. 16, pp. 2101–2110. DOI: 10.1016/S1364-6826(97)00035-7.
- Space Weather — Effects on Technology.* Canadian Space Weather Forecast Centre Publ., 2012, 3 p.
- Space Weather: Research Towards Applications In Europe.* Dordrecht, Springer, 2007. 332 p. DOI: 10.1007/1-4020-5446-7.
- Stocker A.J., Arnold N.F., Jones T.B. The synthesis of travelling ionospheric disturbance (TID) signatures in HF radar observations using ray tracing. *Ann. Geophys.* 2000, vol. 18, no. 1, pp. 56–64. DOI: 10.1007/s00585-000-0056-4.
- Sverdlov Ju.L. *Morfologiya radioavrory* [Morphology of Radioaurora]. Leningrad, Nauka Publ., 1982, 160 p. (In Russian).
- The Sun to the Earth — and Beyond: A Decadal Research Strategy in Solar and Space Physics.* Washington, The National Academies Press, 2003, 196 p. DOI: 10.17226/10477.
- Thomson A.W.P., Dawson E.B., Reay S.J. Quantifying extreme behavior in geomagnetic activity. *Space Weather.* 2011, vol. 9, no. 10, S10001. DOI: 10.1029/2011SW000696.
- Troshichev O., Janzhura A., Stauning P. Unified PCN and PCS indices: method of calculation, physical sense, and dependence on the IMF azimuthal and northward components. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2006, vol. 111, no. A5, A05208. DOI: 10.1029/2005JA011402.
- Tsunoda R.T. High-latitude F region irregularities: a review and synthesis. *Rev. Geophys.* 1988, vol. 26, no. 4, pp. 719–760. DOI: 10.1029/RG026i004p00719.
- Tsunoda R.T., Maruyama T., Tsugawa T., Yokoyama T., Ishii M., Nguyen T.T., Ogawa T., Nishioka M. Off-great-circle paths in transequatorial propagation 2. Non-magnetic-field-aligned reflections. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, iss. 11, pp. 11,176–11,190. DOI: 10.1002/2016ja022404.
- Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Vertogradova E.G. Spread-F radar observations in the midlatitude ionosphere using an Ionosonde-Radiodirection Finder. *Radiophys. Quantum Electronics.* 2013, vol. 56, no. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s11141-0139411-7.
- Vilensky I.M., Yampol'sky V.S., Tsydypov C.T. *Rasprostraneniye srednikh radiovoln v ionosfere* [Propagation of Medium Radio Waves in the Ionosphere]. Nauka Publ., 1983, 116 p. (In Russian).
- Wang J.C.H. A sky-wave propagation study in preparation for the 1605–1705 kHz broadcasting conference. *IEEE Trans. on Broadcasting.* 1985, vol. BC-31, no. 1, pp. 10–17. DOI: 10.1109/TBC.1985.266546.
- Warrington E.M., Stocker A.J., Siddle D.R., et al. Near real-time input to a propagation model for nowcasting of HF communications with aircraft on polar routes. *Radio Sci.* 2016, vol. 51, no. 7, pp. 1048–1059. DOI: 10.1002/2015rs005880.
- Weber E.J., Tsunoda R.T., Buchau J., et al. Coordinated measurements of auroral zone enhancements. *J. Geophys. Res.* 1985, vol. 90, no. A7, pp. 6497–9513. DOI: 10.1029/JA090iA07p06497.
- Wernik A.W., Secan J.A., Fremouw E.J. Ionospheric irregularities and scintillation. *Adv. Space Res.* 2003, vol. 31, no. 4, pp. 971–981. DOI: 10.1016/S02731177(02)00795-0.
- Whiteson D., Mulhearn M., Shimmin C., et al. Observing ultra-high energy cosmic rays with smartphones. *LANL ArXiv.* 2014. arXiv:1410.2895.
- Wikipedia. List of Citizen science projects. 2016. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_citizen_science_projects (accessed December 12, 2016).
- Xiong C., Stolle C., Lühr H. The Swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities. *Space Weather.* 2016, vol. 14, no. 8, pp. 563–577. DOI: 10.1002/2016SW001439.
- Zasenko V.E., Ilyin N.V., Orlov I.I. Fine structure of signals reflected from the ionosphere. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1993, iss.100, pp. 158–173.
- Zolesi B., Cander L.R. *Ionospheric Prediction and Forecasting.* Berlin, Heidelberg Springer Geophysics, 2014, 252 p. DOI: 10.1007/978-3-642-38430-1.
- URL: <http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux> (accessed December 12, 2016).
- URL: <http://www.swpc.noaa.gov> (accessed December 12, 2016).

Как цитировать эту статью

Бернгардт О.И. Влияние факторов космической погоды на работу радиосредств. Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 40–60.

How to cite this article

Berngardt O.I. Space weather impact on radio device operation. Solar-Terrestrial Physics. 2017. Vol. 3, iss. 3. P. 40–60.