

УДК 550.388.2

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЧ-РАДИОВОЛН НА АВРОРАЛЬНЫХ ТРАССАХ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2020 г. Д. В. Благовещенский*

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения (ГУАП), г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: donatbl@mail.ru

Поступила в редакцию 16.04.2019 г.

После доработки 27.08.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

На двух авроральных радиотрассах Диксон–Певек ($D = 2800$ км) и Ловозеро–Певек ($D = 4200$ км) исследованы вариации параметров распространения декаметровых волн по данным наклонного зондирования ионосферы для двух дней – слабо возмущенного и сильно возмущенного. Анализировались значения следующих параметров: $F2$ МНЧ и E_s МНЧ (максимально наблюдаемые частоты при отражении сигнала от слоя $F2$ и от слоя E_s), $F2Spread$ (диффузное отражение), боковые отражения. Получены следующие новые результаты. Для обеих трасс уровень значений $F2$ МНЧ за сильно возмущенный день выше, чем за слабо возмущенный день, но во время суббурь значения $F2$ МНЧ либо малы, либо отсутствуют за счет повышенного поглощения. На трассе Диксон–Певек имеет место рост значений E_s МНЧ во время возмущенного периода. На трассе Ловозеро–Певек вероятность появления E_s -отражений падает во время возмущенного дня. Для трассы Диксон–Певек диффузность в слое $F2$ наиболее характерна для сильно возмущенного периода, а для трассы Ловозеро–Певек, наоборот, для слабо возмущенных условий. Боковые отражения на трассе Диксон–Певек появляются достаточно редко. На трассе Ловозеро–Певек в слабо возмущенный день боковых отражений крайне мало, а в сильно возмущенный день они вообще отсутствуют.

DOI: 10.31857/S0016794020030025

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что солнечные вспышки, пятна и т.п. вызывают в околоземном пространстве резкие изменения. Эти неблагоприятные изменения в виде магнитных бурь и суббурь влияют на надежность работы как космических аппаратов, так и различных систем, например, радиосвязи, а, следовательно, и на распространения радиоволн. Магнитосферные бури и суббури вызывают геомагнитные возмущения, следствием которых является широкий спектр неоднородностей и процессов в ионосфере Земли.

К высокоширотной области относят ионосферу на геомагнитных широтах $\Phi \geq 65^\circ$, включающих в себя авроральную зону ($\Phi \approx 65^\circ - 75^\circ$) и полярную шапку ($\Phi \geq 75^\circ$). Рассматриваемая область широт наиболее тесно связана с магнитосферой и протекающими в ней процессами, а через нее с солнечным ветром. Она в наибольшей степени подвержена возмущениям. Высыпание энергичных частиц из магнитосферы, существование интенсивных электрических полей магнитосферного происхождения, а также наличие по-

лярного ветра являются главными особенностями высокоширотной ионосферы. Существует настоятельная потребность в анализе данных по всем возможным проявлениям солнечно-магнитосферно-ионосферных связей и их воздействию на распространяющиеся радиоволны в периоды возникновения суббурь и бурь. В первую очередь это касается высоких широт, поскольку здесь магнитные возмущения проявляются наиболее существенно и практически все время.

В высоких широтах ионосфера весьма неоднородна, поскольку она состоит, прежде всего, из различных крупномасштабных структур со своими особенностями поведения (главный ионосферный провал, овал полярных сияний, полярная шапка и т.п.). Кроме того, высокоширотная ионосфера подвержена воздействию высыпающихся потоков частиц во время возмущений, электрических полей, ветров и т.д. Динамика ионосферы приводит к нарушению ее регулярной структуры и образованию мелкомасштабных неоднородностей и градиентов электронной концентрации. Неоднородности и градиенты при распространении радиоволн иногда приводят к

Таблица 1. Координаты высокоширотных геофизических станций России

Станция	Географическая широта, град N	Географическая долгота, град E	Геомагнитная широта, град N	Геомагнитная долгота, град E
Ловозеро	68.0	35.0	63.3	127.0
Диксон	73.5	80.6	64.3	162.6
Тикси	71.5	129.0	64.5	191.0
Певек	70.0	171.0	64.8	223.4

изменению траектории волны в пространстве – вместо траектории вдоль дуги большого круга образуется новый путь сигнала (боковой), например, с отражением от градиентов ионизации или в результате рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях. Подобные боковые сигналы являются существенной помехой при приеме сигналов в системах радиосвязи, навигации и радиолокации. Поэтому их изучению необходимо уделять должное внимание. Ранее предпринимались неоднократные попытки исследования природы образования нестандартных мод распространения и условий их возникновения [Goodman and Ballard, 2004; Stocker et al., 2002; Hunsucker and Hargreaves, 2003; Milan et al., 1998; Vilella et al., 2009]. Так, в работе [Goodman and Ballard, 2004] исследовалось распространение ВЧ-радиоволн посредством E_s -слоя с большими значениями E_s МНЧ. В работе [Stocker et al., 2002] отмечается, что для высокоширотных трасс распространение вне дуги большого круга является нормальной особенностью. Согласно работе [Hunsucker and Hargreaves, 2003] с началом суббури область высыпаний, вызывающих ионосферные неоднородности, резко смещается к югу до широт 62° – 64° (the hard “drizzle” precipitation). В работе [Milan et al., 1998] изучалась степень уменьшения дециметрового диапазона частот МНЧ – ННЧ на четырех трассах во время магнитных бурь. Объяснение этому – уменьшение во время бури электронной концентрации в F -области. В работе [Vilella et al., 2009] отмечается необходимость учета свойств радиоаппаратуры в оценке значений ННЧ на трассах. Все перечисленное помогает лучше понять картину явлений. Однако для высоких широт полученных результатов, особенно для различной геомагнитной возмущенности, явно недостаточно.

В настоящей работе ставится задача рассмотреть особенности распространения ДКМ (дециметровых) волн по данным наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) на двух авроральных радиотрассах Диксон–Певек и Ловозеро–Певек во время слабо возмущенных ($\Sigma Kp = 13$ –) и сильно возмущенных ($\Sigma Kp = 28$ –) магнитных условий. Поставленный вопрос актуален, поскольку не все стороны процессов, связанных с геофизически-

ми возмущениями в высоких широтах, к настоящему времени поняты и объяснены.

2. ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследований были использованы две ВЧ-радиотрассы Диксон–Певек длиной $D = 2800$ км и Ловозеро–Певек длиной $D = 4200$ км. Трассы являются высокоширотными и расположены в зоне полярных сияний, точнее ближе к поясу ионосферных неоднородностей, лежащему в южной части аврорального овала. Первая радиотрасса в спокойных условиях не испытывает воздействия полярного овала, а вторая – пересекает его дважды. При смещении овала во время возмущенного периода обе пересекают овал, но по-разному. Географические и геомагнитные координаты пунктов приема и передачи трасс можно видеть из таблицы. В ней также приведены координаты ст. Тикси, положение которой практически соответствует середине трассы Диксон–Певек. Геомагнитные данные этой станции будут нужны в дальнейшем анализе при оценке степени магнитной активности и уровня поглощения на трассах. Из таблицы 1 можно видеть, что все указанные в ней пункты лежат на близкой геомагнитной широте.

Рассматриваемые две радиотрассы снабжены аппаратурой наклонного зондирования ионосферы, которая позволяет находить основные характеристики распространяющихся радиоволн до частоты $f_{\max} = 30$ МГц. К ним, в частности, высокоширотным, относятся: максимально наблюдаемые частоты при отражении сигналов от слоев F_2 (F_2 МНЧ) и E_s (E_s МНЧ). Максимальная частота диффузных образований в слое F (F Spread) [Гершман и др., 1984]. Частота, на которой имеют место боковые сигналы, $f_{\text{бок}}$. Сеансы зондирования ионосферы производились каждые 15 мин.

3. МАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ В ОБЛАСТИ НАХОЖДЕНИЯ РАДИОТРАСС

Анализ данных распространения радиоволн на радиотрассах проводился за период двух суток – 07 и 08 февраля 2014 г. Первые сутки характеризуются слабо возмущенными геомагнитными условиями, поскольку для них значения Kp -индексов

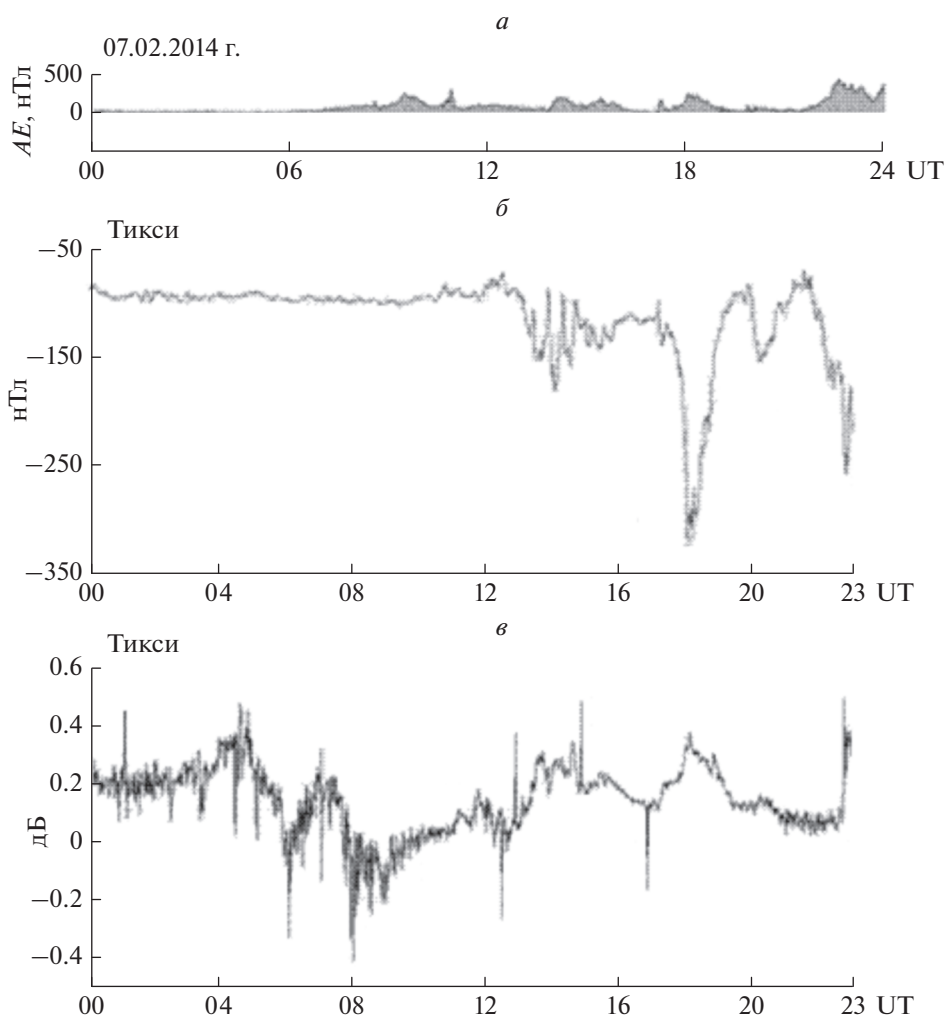


Рис. 1. Вариации геофизических параметров для слабо возмущенного дня 07.02.2014 г.: (а) – AE -индекс; (б) – данные H -компоненты магнитного поля для ст. Тикси; (в) – риометрические данные по поглощению для ст. Тикси.

следующие: 0+, 0, 1, 1, 1+, 2+, 3–, 4 и $\sum Kp = 13$ –. Видно, что начало суток характеризуется совершенно спокойными геомагнитными условиями, а к концу суток наблюдается рост степени возмущенности до умеренных значений. Вторые сутки, наоборот, характеризуются сильно возмущенными геомагнитными условиями. Для них значения Kp иные: 5–, 5–, 4, 2, 2+, 2, 4–, 4+ и $\sum Kp = 28$ –. Здесь в начале и конце суток наблюдаются существенно возмущенные условия за счет суббурь, а в районе полдня наблюдается слабое геомагнитное возмущение. На рисунках 1 и 2 показаны в одном временном масштабе вариации AE -индекса, H -компоненты магнитного поля и риометрических данных по поглощению (AA) для ст. Тикси соответственно для 07 и 08 февраля 2014 г. Выше отмечалось, что данные по ст. Тикси важны для оценки степени возмущенности на обеих радиотрассах. Что касается AE -индекса, то он, как известно, наиболее уместен для описания процессов в авро-

ральной зоне. Из рисунка 1 можно видеть, что заметные магнитные вариации начались примерно с 10:00 UT. Небольшие суббури в 18:00 и 23:00 UT интенсивностью менее 200 нТл вызвали подъем уровня поглощения в эти часы по ст. Тикси до 0.35 дБ. Но это поглощение слабо и за ним ничего не последовало. Наибольшие вариации магнитного поля и поглощения имели место 08 сентября 2014 г. (рис. 2). Суббуря с 00:00 до 02:00 UT ($AE_{\text{макс}} = 650$ нТл) вызвала рост поглощения до $AA_{\text{макс}} = 3.5$ дБ. Второй рост магнитной активности начинается с 14:00 UT и до конца дня. Значения $AE_{\text{макс}} = 800$ нТл в 19:45 UT и $H_{\text{макс}} = 580$ нТл в 20:00 UT приводят к росту поглощения $AA_{\text{макс}}$ до почти 3 дБ в 20:00 UT. Уровни риометрического поглощения AA в 3 дБ и 3.5 дБ являются уже существенными и могут вызвать полное поглощение радиоволн утром и вечером рассматриваемых суток, что будет показано далее.

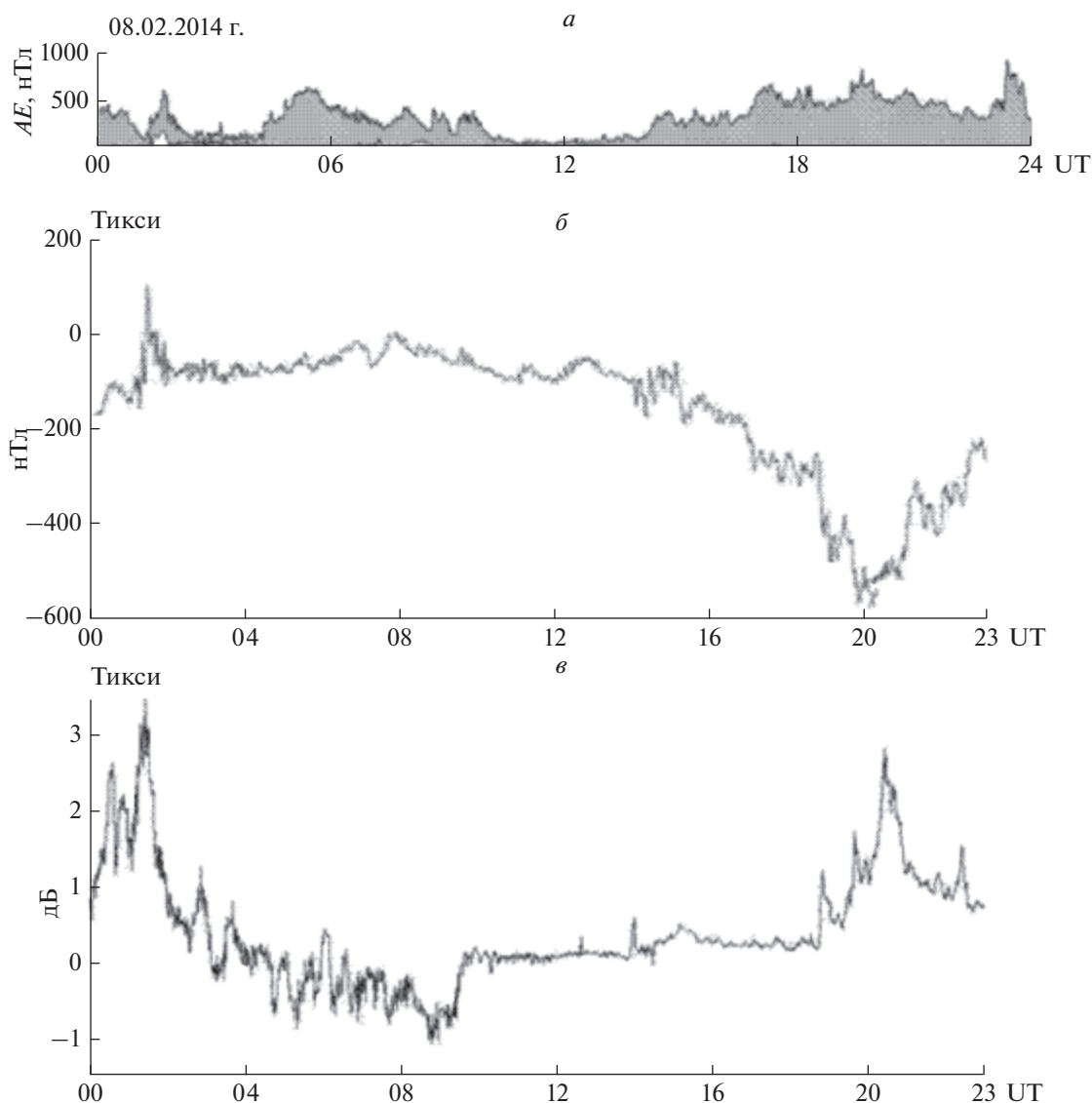


Рис. 2. Вариации геофизических параметров для сильно возмущенного дня 08.02.2014 г.: (а) – AE -индекс; (б) – данные H -компоненты магнитного поля для ст. Тикси; (в) – риометрические данные по поглощению для ст. Тикси.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Динамика треков на ионограммах

Как указывалось выше, сеансы НЗИ на трассах проводились каждые 15 мин. Однако известно, что в высоких широтах весьма возможны существенные изменения того или иного параметра распространения ВЧ-радиоволн за время порядка 15 мин. Подобные изменения можно видеть в качестве примера на рис. 3. На нем представлены 15-мин ионограммы НЗИ для трассы Диксон–Певек (верхняя панель) и соответственно для трассы Ловозеро–Певек (нижняя панель). Необходимо отметить, что трассы Ловозеро–Певек и Диксон–Певек, как указывалось выше, имеют длину более 2000 км. На них односкачковое рас-

пространение посредством слоя E_s невозможно, поскольку подобное распространение реализуется только для трасс, не превышающих 2000 км. Следовательно, на данных трассах могут существовать либо двухскачковые (трех и выше) моды за счет отражения сигнала от слоя E_s , либо комбинированные моды типа M или N .

Например, первый скачок от слоя F_2 и еще один скачок (второй) от слоя называется комбинированной модой типа N ($F-E$). Другой похожей модой, где первый скачок обязан слою F_2 с дальнейшим отражением от слоя E_s сверху и далее второй скачок от слоя F_2 , является мода типа M ($F-E-F$) [Davis, 1990]. Поэтому ниже под термином E_s МНЧ будем подразумевать максимально наблюдаемую частоту для любой из указанных

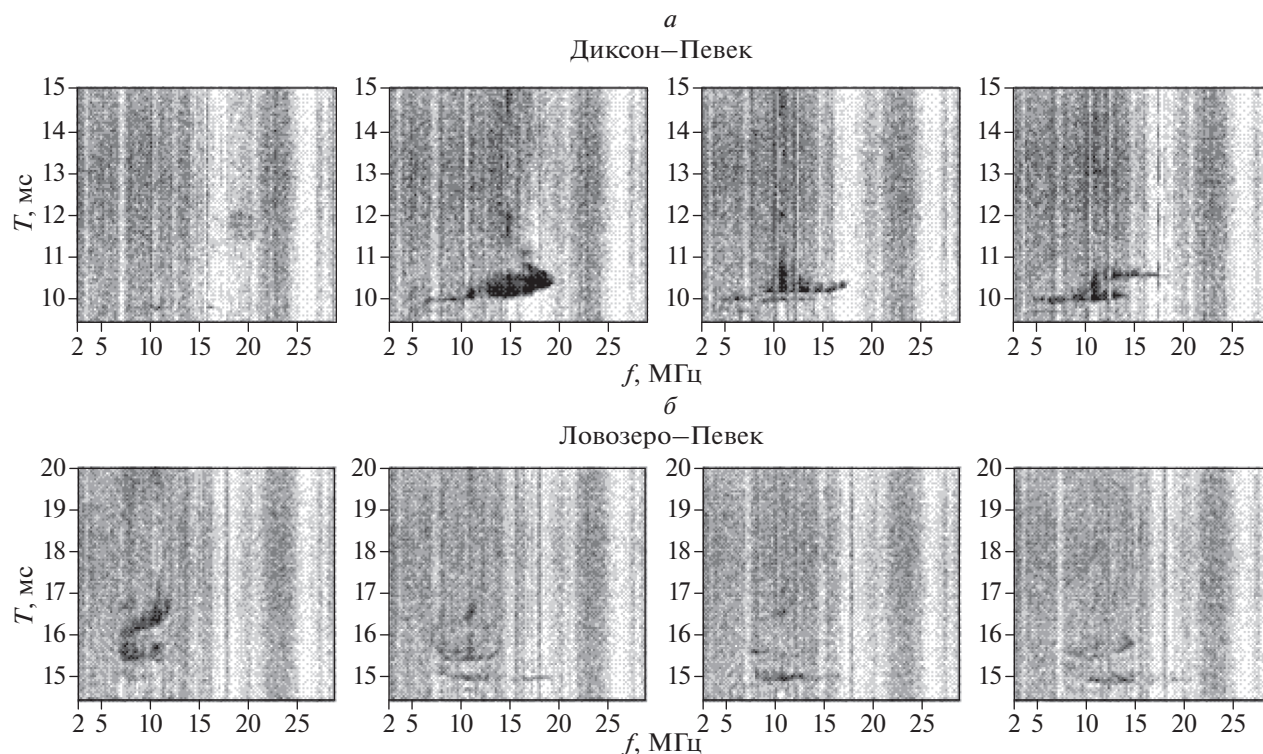


Рис. 3. Ионограммы НЗИ через каждые 15 мин: (а) — на интервале 18:04–18:49 UTC 08.02.2014 г. на трассе Диксон-Певек; (б) — на интервале 07:02–07:47 UTC 07.02.2014 г. на трассе Ловозеро-Певек.

мод, образованных с участием слоя E_s . Из первой ионограммы верхней панели рис. 3а видно два трека — один спорадический с параметрами ($T = 9$ мс, E_s МНЧ = 17 МГц) и второй боковой с параметрами ($T = 12$ мс, $f = 20$ МГц). На второй ионограмме возник диффузный трек с $1F2$ МНЧ = 19.5 МГц и уже два спорадических трека, боковой сместился на частоту $f = 15$ МГц. На третьей ионограмме существуют два спорадических трека и один за счет отражения от слоя $F2$, боковой сместился на частоту $f = 10$ МГц. На четвертой ионограмме можно видеть два спорадических трека, причем верхний стал диффузным, и трек за счет отражения от слоя $F2$, боковой трек исчез. На нижней панели б, первая ионограмма, здесь наблюдаются только диффузные треки, на второй ионограмме уже присутствует выраженный спорадический трек, на третьей ионограмме — несколько спорадических треков и, наконец, на четвертой ионограмме появился четкий трек за счет отражения от слоя $F2$ с $1F2$ МНЧ = 14.5 МГц. Таким образом, из рассмотренных ионограмм можно видеть существенные вариации в характере треков при переходе от одной ионограммы к другой, то есть через каждые 15 минут условия распространения радиоволн изменяются.

На рисунках 4–7 представлены вариации параметров распространения по данным НЗИ на

обеих исследуемых трассах. К параметрам, как указывалось выше, относятся: максимально наблюдаемые частоты при отражении сигналов от слоя $F2$ ($F2$ МНЧ) и от слоя E_s (E_s МНЧ). Максимальная частота диффузных образований за счет отражения от слоя F (F Spread). Частота, на которой имеют место боковые сигналы, $f_{бок}$. Необходимо отметить, что графики на рис. 4–7 построены по ежечасным, а не по 15-мин значениям параметра (для оптимизации восприятия).

4.2. Сравнение параметров распространения на трассе Диксон–Певек для разных уровней магнитной активности

Рисунки 4 и 5 получены, как указано выше, для разной магнитной возмущенности: $\sum Kp$ для 07 февраля 2014 г. составляет 13–, а для 08 февраля 2014 г. — 28–. Исходя из этих цифр, день 07 февраля 2014 г. является слабо возмущенным, а 08 февраля 2014 г. — сильно возмущенным. Поскольку трасса Диксон–Певек расположена в районе овала сияний, то во время возмущенных условий, когда происходят высыпания частиц, следует ожидать возрастание электронной концентрации в области пролегания трассы.

Ход $1F2$ МНЧ. Из рисунков можно видеть следующее. Для исследуемой трассы в интервале

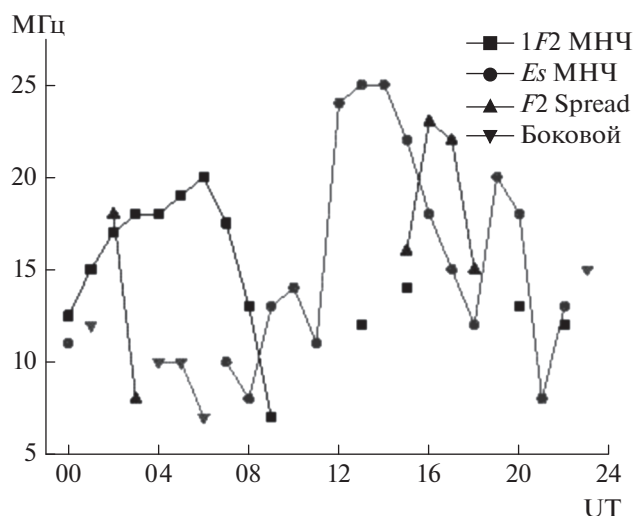


Рис. 4. Вариации параметров распространения по данным НЗИ на трассе Диксон-Певек для слабо возмущенного дня 07.02.2014 г.

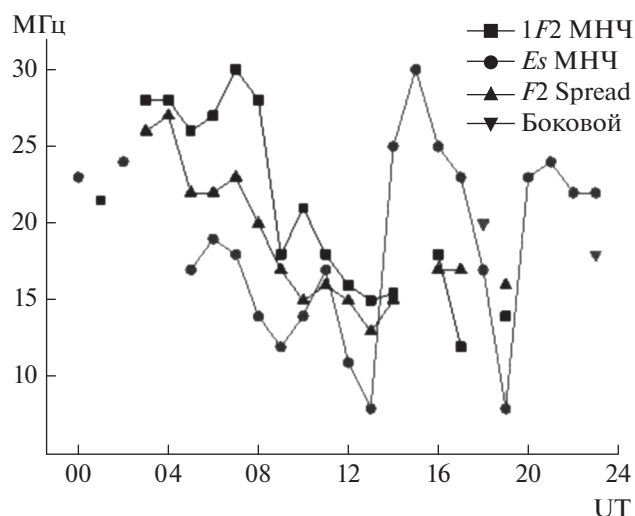


Рис. 5. Вариации параметров распространения по данным НЗИ на трассе Диксон-Певек для сильно возмущенного дня 08.02.2014 г.

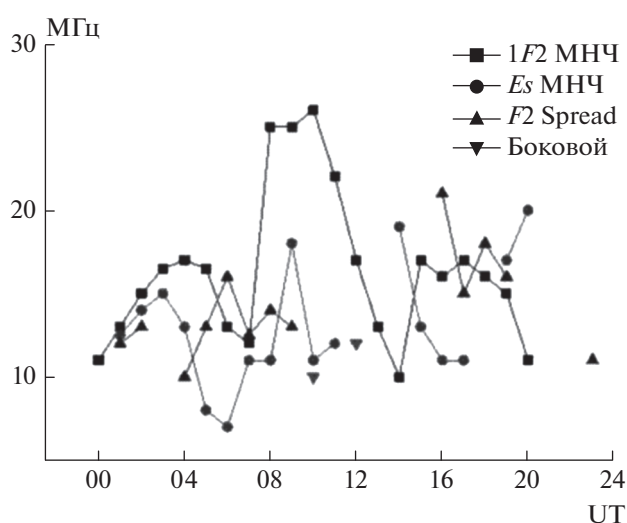


Рис. 6. Вариации параметров распространения по данным НЗИ на трассе Ловозеро-Певек для слабо возмущенного дня 07.02.2014 г.

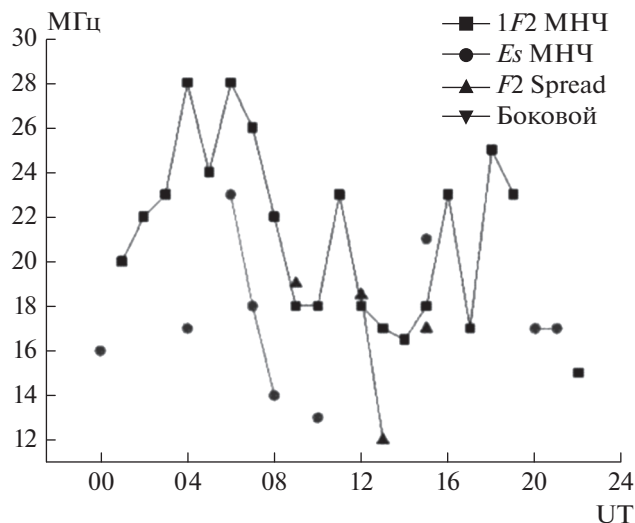


Рис. 7. Вариации параметров распространения по данным НЗИ на трассе Ловозеро-Певек для сильно возмущенного дня 08.02.2014 г.

00:00–09:00UT, включающем местный полдень для точки отражения, сначала происходит рост данного параметра до максимума и далее имеет место его спад. Характерным является то, что максимум $1F2$ МНЧ для 07 февраля 2014 г. равен 20 МГц, а для 08 февраля 2014 г. он равен 30 МГц. В интервале 09:00–24:00 UT значение $1F2$ МНЧ для 07 февраля 2014 г. в среднем равно 13 МГц, а для 08 февраля 2014 г. оно выше и составляет 16 МГц. То есть выполняется отмеченная выше ситуация, что электронная концентрация в слое $F2$ во время возмущения выше. За периоды суббурь в начале и конце дня по UT 08 февраля 2014 г.

значения $1F2$ МНЧ чаще отсутствуют, скорее всего, из-за повышенного поглощения. В эти периоды по данным риометра ст. Тикси уровень поглощения достигает значений $A4 = 3$ дБ (рис. 2).

Ход Es МНЧ. Согласно рис. 4 и 5, на трассе Диксон–Певек имеет место рост спорадической ионизации на уровне слоя E во время возмущенного периода. Причина, как и выше, рост характера высыпания частиц в авроральном овале. Так, для 07 февраля 2014 г. максимальное значение Es МНЧ местной ночью в точке отражения составляет 25 МГц, а для 08 февраля 2014 г. соответственно 30 МГц. Начало резкого роста значений

E_s МНЧ для 07 февраля 2014 г. происходит в 12:00 UT, а для 08 февраля 2014 г. в 14:00 UT. Данные моменты времени соответствуют началу магнитных возмущений по ст. Тикси (рис. 1 и 2). Это находится в соответствии с результатами работы [Blagoveshchensky et al., 2017], где показано, что рост магнитного возмущения приводит к росту значений предельных частот f_oE_s . Продолжительность периода появления спорадических слоев во время возмущенного дня 08 февраля 2014 г. также выше, чем для 07 февраля 2014 г. Во время суббурь в начале и конце дня 08 февраля 2014 г. значения E_s МНЧ тоже выше, чем для соответствующих часов 07 февраля 2014 г.

Ход F_2 Spread. Диффузность в слое F_2 наиболее характерна для возмущенного периода. Она наблюдается 08 февраля 2014 г. практически все время пока существуют отражения сигналов на трассе от слоя F_2 , тогда как 07 февраля 2014 г. диффузность отсутствует.

Боковые отражения фиксируются на ионограммах НЗИ достаточно редко — чаще 07 февраля 2014 г., чем 08 февраля 2014 г. Возможно, это связано со смещением структур, вызывающих боковые отражения, к югу во время сильных возмущений. По данным эксперимента на ионограммах НЗИ были зафиксированы случаи появления перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в основном в утренние часы.

4.3. Сравнение параметров распространения на трассе Ловозеро—Певек для разных уровней магнитной активности

Рассматриваемая трасса Ловозеро—Певек ($D = 4200$ км) является более длинной, чем трасса Диксон—Певек ($D = 2800$ км). Поэтому на ней возможно более заметное влияние различных геофизических воздействий, особенно во время магнитных возмущений. Как и для рис. 4 и 5, рис. 6 соответствует слабо возмущенным условиям, а рис. 7 — сильно возмущенным.

Ход $1F_2$ МНЧ. Кривая для данного параметра на рис. 6 имеет достаточно плавный характер с тремя условными максимумами в 04:00, 10:00 и 18:00 UT. Однако на рис. 7 значения F_2 МНЧ изменяются более резко, хотя также имеют приблизительно те же самые максимумы. Амплитуды $1F_2$ МНЧ за сутки на рис. 7 выше, чем на рис. 6. Это, скорее всего, вызвано ростом уровня ионизации в слое F_2 в возмущенный день. Но во время суббурь утром и вечером 08 февраля 2014 г. значения $1F_2$ МНЧ либо малы, либо отсутствуют за счет повышенного поглощения (рис. 2).

Ход E_s МНЧ. Вариации данного параметра на рис. 6 и 7 заметно отличаются. Если на первом рисунке в слабо возмущенных условиях за сутки зафиксировано 17 случаев E_s -отражений, то на

втором во время сильных возмущений этих случаев всего 9, т.е. почти в два раза меньше. Возможное объяснение этому факту следующее. Трасса Ловозеро—Певек расположена севернее, чем трасса Диксон—Певек. Согласно работе [Разуваев, 1991] зона с наибольшей вероятностью появления спорадических слоев представляет собой близкую к кольцу область. Северная граница данной области проходит приблизительно вдоль широты 75° . Но во время возмущений она несколько смещается к югу. И поэтому трасса может в возмущенных условиях выйти из кольцевой области со спорадическими слоями. Следовательно, вероятность появления E_s -отражений на трассе упадет.

Ход F_2 Spread. Во время сильно возмущенных условий (рис. 7), как показывают наблюдения, число случаев отраженных сигналов с диффузностью меньше, чем для слабо возмущенных условий (рис. 6). Это, скорее всего, можно объяснить выходом трассы из зоны с мелкомасштабными ионосферными неоднородностями за счет смещения этой зоны к югу во время сильного магнитного возмущения.

Боковые отражения. Здесь картина аналогична появлению диффузности. На рисунке 6 боковых крайне мало, а на рис. 7 они вообще отсутствуют. Здесь причина та же, что была отмечена для трассы Диксон—Певек. А именно, область ионосферы с неоднородными структурами, вызывающими появление боковых сигналов, смещается к югу во время сильных магнитных возмущений.

4.4. Необычные треки на ионограммах

В процессе анализа ионограмм НЗИ на двух исследуемых трассах были обнаружены случаи не совсем обычных условий распространения радиоволн. Это естественно ожидать, поскольку трассы проходят в авроральном овале. Под необычными подразумеваются случаи ионограмм НЗИ, резко отличающихся по структуре треков или возможности интерпретации параметров распространения от обычных ионограмм. Подобных случаев немного (несколько процентов), но они интересны своей необычностью. На рисунках 8а–8е показаны примеры таких ионограмм.

а) Из ионограммы можно видеть отражение сигнала от мощного спорадического слоя с E_s МНЧ > 30 МГц, что случается достаточно редко. Слой настолько интенсивный, что блокирует отражения от слоя F_2 . Например, согласно рис. 4 с 12:00 до 15:00 UT значения E_s МНЧ довольно высоки и в 12:00 UT отражение сигналов от слоя F_2 отсутствует, как и для ионограммы (а) рис. 8 в 12:34 UT. Возможно, что появление мощных слоев E_s связано с началом роста магнитного возмущения после 12:00 UT.

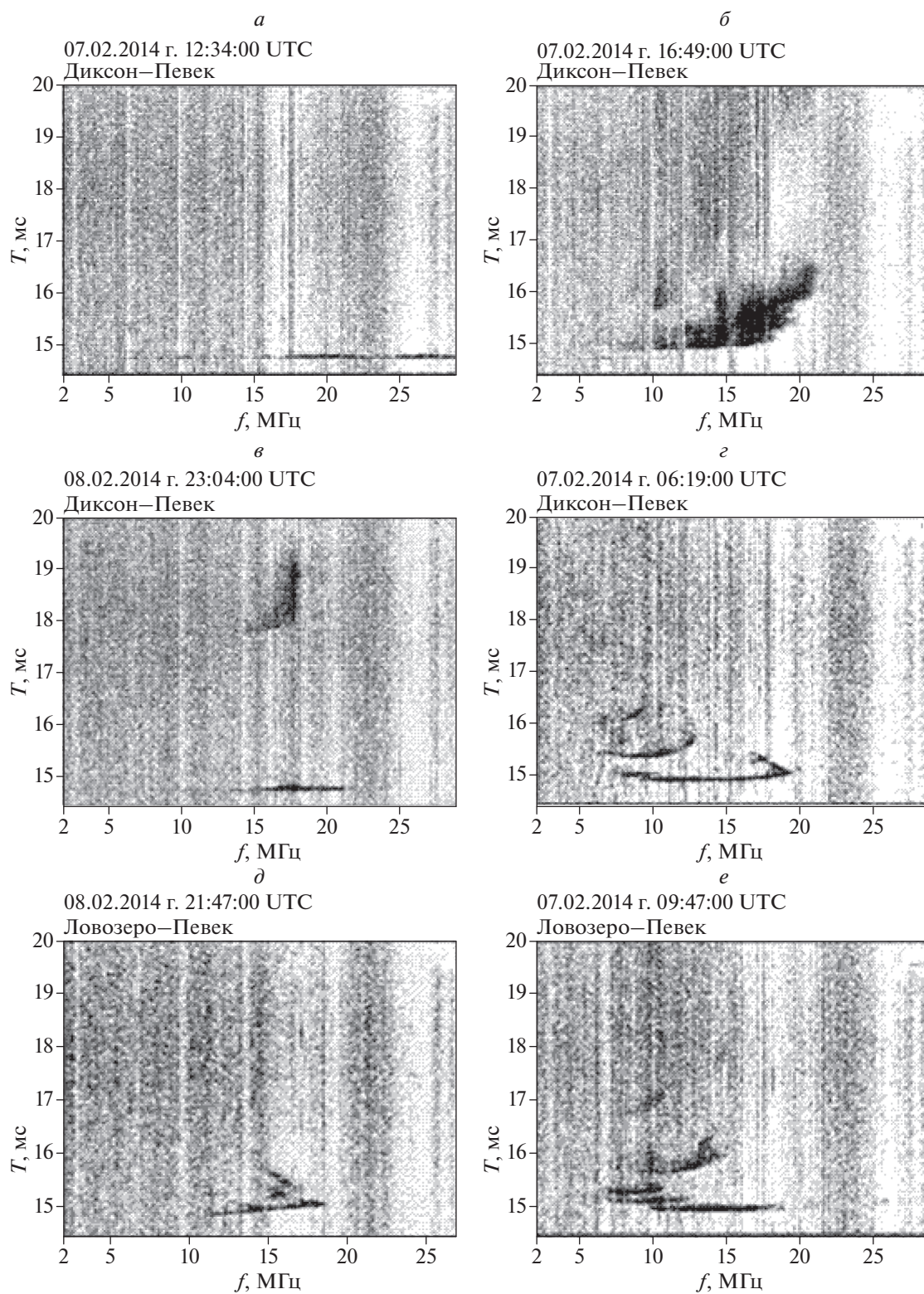


Рис. 8. Примеры ионограмм с необычными треками сигналов на трассах: (а–е).

б) Здесь на ионограмме можно видеть первый, нормальный, трек за счет отражения от слоя E_s и второй, очень диффузный, от слоя $F2$. Диффуз-

ность настолько высока, что невозможно точно определить параметры трека, в частности, $1F2$ МНЧ. Характерно, что подобная сильная диф-

фузность зарегистрирована на трассе Диксон–Певек для слабо возмущенного дня 07 февраля 2014 г. в 16:49 UT, когда в данное время, согласно рис. 1, магнитная активность очень слаба, но момент 16:49 UT расположен за ~1 ч до развития суббури с интенсивностью порядка 200 нТл. Последнее обстоятельство и может быть причиной возникновения диффузности.

в) Иonoграмма демонстрирует интенсивное боковое отражение от ионосферной неоднородности на частоте $f = 17$ МГц. Время появления этого сигнала соответствует сильно возмущенному периоду 08 февраля 2014 г. (рис. 2) – развитию мощной суббури по AE -индексу в 23:00 UT с $AE_{\text{макс}} = 900$ нТл. Данный боковой сигнал достаточно диффузен, что говорит о высокой степени магнитной возмущенности в это время.

г) На иonoграмме показан пример перемещающегося ионосферного возмущения (ПИВ). На луче Педерсена виден зигзаг на частоте $f = 17.5$ МГц. Зигзаг соответствует ПИВ. Он, вообще говоря, может появиться в любом месте верхней части основного трека и даже на треке двухскачкового отражения. За рассматриваемый период 07–08 февраля 2014 г. наблюдалось несколько случаев ПИВ, в основном, на трассе Диксон–Певек в утренние часы.

д) Иonoграмма иллюстрирует очень необычный трек при отражении сигнала от спорадического слоя E_s . Его необычность заключается в следующем. На следе с задержкой $T = 14.8$ мс присутствуют две области с лучом Педерсена. Первая область расположена на частоте $f = 15$ МГц и вторая на частоте $f = 19.5$ МГц. Наличие луча Педерсена свидетельствует о том, что слой E_s толстый и вызывает групповую задержку. Но в обычных условиях групповая задержка возникает на конце следа и один раз. Здесь мы имеем на одном треке две групповые задержки. Следовательно, имеет место необычность в строении самого слоя, которая и является причиной двух групповых задержек. Скорее всего, слой E_s состоит из двух достаточно толстых слоев, расположенных друг над другом. Каждый из двух слоев вызывает групповую задержку.

е) На последней иonoграмме представлен пример с многолучевостью на трассе. Первые два трека с задержками $T = 14.9$ мс и $T = 15.1$ мс по своей форме являются отражениями от спорадического слоя E_s . Трек с $T = 15.3$ мс имеет групповую задержку на конце. Чему этот трек обязан – не совсем понятно. Возможно, это M или N мода. Четвертый трек с $T = 15.8$ мс скорее всего есть одно отражение от слоя F_2 , но имеет странную форму. Пятое отражение с $T = 17$ мс – двойное отражение от слоя F_2 . И шестое слабое отражение с $T = 17.8$ мс есть боковой сигнал.

Таким образом, на радиотрассах, особенно во время магнитных возмущений, фиксируются ионограммы с необычной формой треков, которые интерпретировать сложно или не всегда удается.

4.5. Сравнение расчетных и экспериментальных ионограмм

Представляет определенный интерес сравнить данные НЗИ на двух рассматриваемых радиотрассах с расчетами по модели IRI + GDMF2 (Global Dynamic Model of the F_2 layer) [Шубин и Деминов, 2019] с полярной областью. Расчеты выполнены согласно [Кища и др., 1993] в спокойных условиях 07 февраля 2014 г для $F_{10.7} \sim 170$ и $Kp = 2$. Рассмотрим два примера. Первый относится к трассе Диксон–Певек. Для этой трассы имеем иonoграмму на рис. 8г в 06:19 UT. Здесь $1F_2$ МНЧэ = 19 МГц и $2F_2$ МНЧэ = 12.5 МГц. Расчет для 06:00 UT дает $1F_2$ МНЧр = 18.28 МГц и $2F_2$ МНЧр = 12.12 МГц. Второй пример для трассы Ловозеро–Певек. Для нее иonoграмма приведена на рис. 3б в 07:17 UT, и выполнен расчет для 07:00 UT. Здесь $1F_2$ МНЧэ = 20 МГц и $2F_2$ МНЧэ = 13 МГц и $1F_2$ МНЧр = 19.53 МГц и $2F_2$ МНЧр = 14.78 МГц.

Общий вывод: экспериментальные и расчетные параметры близки, поэтому рассматриваемая модель в основном приемлема.

5. ВЫВОДЫ

В результате анализа иonoграмм наклонного зондирования на двух авроральных радиотрассах для разной степени магнитной возмущенности (первый день слабое возмущение, второй – сильное) получены следующие закономерности в поведении главных параметров распространения:

– **$1F_2$ МНЧ.** Для обеих трасс: общий уровень значений $1F_2$ МНЧ за сильно возмущенный день выше, чем за слабо возмущенный день. Это, скорее всего, вызвано ростом уровня ионизации в слое F_2 в возмущенный день. Но во время суббури значения $1F_2$ МНЧ либо малы, либо отсутствуют за счет повышенного поглощения.

– **E_s МНЧ.** На трассе Диксон–Певек имеет место рост спорадической ионизации на уровне слоя E во время возмущенного периода. Причина – рост интенсивности высыпания частиц в авроральном овале. Во время суббури в начале и конце возмущенного дня значения E_s МНЧ тоже выше, чем для соответствующих часов слабо возмущенного дня. На трассе Ловозеро–Певек в слабо возмущенных условиях за сутки зафиксировано 17 случаев E_s -отражений, а во время сильных возмущений этих случаев всего 9. Причина – трасса может в возмущенных условиях выйти из кольцевой области сосредоточения спорадических сло-

ев. Следовательно, вероятность появления E_s -отражений на трассе упадет.

– ***F2Spread***. Для трассы Диксон–Певек диффузность в слое $F2$ наиболее характерна для возмущенного периода, чем для спокойного. Для трассы Ловозеро–Певек наоборот. Это, скорее всего, можно объяснить выходом трассы из зоны с мелкомасштабными ионосферными неоднородностями за счет смещения этой зоны к югу во время сильного магнитного возмущения.

– ***Боковые отражения***. На трассе Диксон–Певек фиксируются на ионограммах НЗИ достаточно редко – чаще в слабо возмущенных условиях. Возможно, это связано со смещением структур, вызывающих боковые отражения, к югу во время сильных возмущений. На трассе Ловозеро–Певек в слабо возмущенный день боковых крайне мало, а в возмущенный день они вообще отсутствуют. Здесь причина та же, что была отмечена для трассы Диксон–Певек.

– На рассмотренных ионограммах можно видеть существенные вариации в характере треков при переходе от одной ионограммы к другой, т.е. через каждые 15 мин условия распространения радиоволн изменяются.

– На радиотрассах, особенно во время магнитных возмущений, иногда фиксируются ионограммы с необычной формой треков, которые интерпретировать сложно или не всегда удается.

– Выборочный контроль показывает, что в спокойное время модель IRI + GDMF2 на трассах дает удовлетворительное совпадение расчетов и эксперимента.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность за предоставление данных НЗИ, принадлежащих ААНИИ, г. Санкт-Петербург, сотруднику этого института Д.Д. Рогову. Также выражается благодарность за возможность использования данных по вариациям H -компоненты магнитного поля и поглощения по ст. Тикси на сайте Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидромета (ААНИИ) (geophys.aari.ru). Автор благодарит сотрудников ИЗМИРАНа В.Н. Шубина и М.Г. Деминова за возможность использования их модели IRI + GDMF2.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 18-05-00343.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F -рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 174 с. 1984.
- Кица П.В., Крашенинников И.В., Лукашкин В.М. Моделирование многочастотного распространения КВ-сигналов в высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 33. № 1. С. 158–162. 1993.
- Разуваев О.И. Спорадическая ионизация в высокоширотных геофизических исследованиях // Исслед. по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. Вып. 93. С. 3–16. 1991.
- Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты $F2$ -слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 4. С. 461–473. 2019.
- Blagoveshchensky D.V., Sergeeva M.A., Kozlovsky A.V. Ionospheric parameters as the precursors of disturbed geomagnetic conditions // Adv. Space Res. V. 60. P. 2437–2451. 2017.
- Davis K. Ionospheric radio. London: Peter Peregrinus Ltd. 376 p. 1990.
- Goodman J.M., Ballard J.W. An examination of elevated frequency propagation over a transpolar path // Radio Sci. V. 39. № 2. P. 204–212. 2004.
- Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The high-latitude ionosphere and its effects on radio propagation. Cambridge University Press. 617 p. 2003.
- Milan S.E., Lester M., Jones T.B., Warrington E.M. Observation of the reduction in the available HF band on four high latitude paths during periods of geomagnetic disturbance // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 60. № 4. P. 617–629. 1998.
- Stocker A.J., Warrington E.M., Jones T.B. A comparison of observed and modeled deviations from the great circle direction for a 4490 km HF propagation path along the mid-latitude ionospheric trough // Radio Sci. V. 38. № 3. 2003. <https://doi.org/10.1029/2002RS002RS002781>
- Vilella C., Miralles D., Altadill D., Acosta F., Solé J.G., Torta J.M., Pijoan J.L. Vertical and oblique ionospheric soundings over a very long multihop HF radio link from polar to midlatitudes: Results and relationships // Radio Sci. 44. RS2014. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008RS004001>