УДК 550.388.2
DOI: 10.12737/szf-63202010

Поступила в редакцию 12.03.2020
Принята к публикации 03.05.2020

АМПЛИТУДНЫЕ ВАРИАЦИИ ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

AMPLITUDE VARIATIONS OF THE REFLECTED SIGNAL DURING VERTICAL SOUNDING OF THE IONOSPHERE AT MIDDLE LATITUDES

К.М. Юсупов
Казанский федеральный университет,
Казань, Россия, ukm84@mail.ru, kamil.usupov@kpfu.ru

Д.Д. Мэтьюз
Университет штата Пенсильвания,
Юниверсити-Парк, США, jdm9@psu.edu

Т. Маруяма
Казанский федеральный университет,
Казань, Россия, tmaru@nict.go.jp
Национальный институт информационных
и коммуникационных технологий,
Токио, Япония, tmaru@nict.go.jp

А.Д. Акчурин
Казанский федеральный университет,
Казань, Россия, adel.akchurin@kpfu.ru

М.В. Толстиков
Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, maxim@iszf.irk.ru

О.Н. Шерстюков
Казанский федеральный университет,
Казань, Россия, oleg.sherstyukov@kpfu.ru

Е.А. Филиппова
Казанский федеральный университет,
Казань, Россия, elena.filippova@kpfu.ru

А.С. Сафиуллин
Казанский федеральный университет,
Казань, Россия, metskeysutemy@mail.ru

K.M. Yusupov
Kazan Federal University,
Kazan, Russia, ukm84@mail.ru, kamil.usupov@kpfu.ru

J.D. Mathews
The Pennsylvania State University,
University Park, USA, jdm9@psu.edu

T. Maruyama
Kazan Federal University,
Kazan, Russia, tmaru@nict.go.jp
National Institute of Information and Communications Technology,
Tokyo, Japan, tmaru@nict.go.jp

A.D. Akchurin
Kazan Federal University,
Kazan, Russia, adel.akchurn@kpfu.ru

M.V. Tolstikov
Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, maxim@iszf.irk.ru

O.N. Sherstyukov
Kazan Federal University,
Kazan, Russia, oleg.sherstyukov@kpfu.ru

E.A. Filippova
Kazan Federal University,
Kazan, Russia, elena.filippova@kpfu.ru

A.S. Safiullin
Kazan Federal University,
Kazan, Russia, metskeysutemy@mail.ru

Аннотация. В данной работе обсуждаются основные типы квазипериодических вариаций амплитуд отраженного сигнала при вертикальном зондировании ионосферы на средних широтах. Исходными экспериментальными данными являются ионограммы вертикального зондирования, полученные ионозондом «Циклон». Ионозонд расположен в Казани (55° N, 49° E) и в стандартном режиме позволяет получать одну ионограмму в минуту. При анализе используются методы визуализации большого потока ионограмм в виде итоговых сводных карт состояния ионосферы (A-, H-, A_s-карты). В работе приводятся характерные примеры квазипериодических вариаций амплитуд отраженного сигнала на ионограммах и на A-картах при различных типах многолучевых биений (поляризационных и вследствие рассеяния сигнала на ионосферных неоднородностях). Частотные свойства таких биений используются для оценки разницы действующих высот отражения между модами различной поляризации с высокой точностью, что позволяет уточнять форму профиля электронной концентрации нижней части ионосферы. Обнаружено редкое для среднеширотного E_s-слоя явление — биения двух O-мод с разными действующими высотами

Abstract. In this paper, we discuss the main types of quasiperiodic variations in amplitudes of a reflected signal during vertical sounding of the ionosphere at middle latitudes. The initial experimental data is vertical sounding ionograms obtained by the Cyclone ionosonde. The ionosonde is located in Kazan (59°, 49°) and in standard mode allows us to receive one ionogram per minute. In the analysis, methods are used to visualize a large flow of ionograms in the form of final summary maps of the state of the ionosphere (A-, H-, A_s-maps). We give typical examples of quasiperiodic variations in amplitudes of a reflected signal in ionograms and on A-maps for various types of multipath beatings (polarization and due to signal scattering by ionospheric irregularities). Frequency properties of such beatings are used to estimate the difference in virtual reflection heights between modes of different polarizations with high accuracy, which makes it possible to refine the form of the electron density profile of the lower ionosphere. We have detected a phenomenon rare for the mid-latitude E_s layer — beatings of two O modes with different virtual reflection heights. We also present features of quasiperiodic variations in amplitudes of a reflected signal on traces of the transient E_s layer.

отражений. Приведены также особенности квазипериодических вариаций амплитуд отраженного сигнала на следах транзиентного E_s-слоя. Рассмотрены возможные причины появления таких биений.

Ключевые слова: ионозонд «Циклон», ионограмма, ионосфера, интерференция отраженных сигналов.

We study possible causes of the appearance of such beatings.

Keywords: ionosonde Cyclone, ionogram, ionosphere, interference of reflected signals.

ВВЕДЕНИЕ

Работы по исследованию спорадического слоя E ведутся многие десятилетия [Mathews, Bekeny, 1979; Mathews, 1998; Budden, 1961; Whitehead, 1989; Haldoupis et al., 2003, 2011; Bakhmet'eva et al., 1999, 2005; Чхетиани, Шалимов, 2013; Шалимов, 2014]. Спорадический слой E отличает, с одной стороны, высокая интенсивность (электронная концентрация в E_s-слое может в несколько раз превышать концентрацию окружающего регулярного слоя E), с другой стороны — очень малая толщина (несколько километров). В связи с этими особенностями, данный слой имеет отличную от других слоев ионосферы зависимость высоты и амплитуды отражений от частоты. Поэтому в 70–80 гг. 20 в. были популярны исследования амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) отражений от E_s-слоя при вертикальном зондировании (ВЗ) ионосферы. Особенный интерес был вызван картинами квазипериодических биений на АЧХ из-за интерференции или взаимодействия нескольких магнитоионных мод. Такие биения называют поляризационным федингом. Основные исследования поляризационного фединга на АЧХ слоя E_s выполнялись в работах [Chessel, 1971a, b; Turunen et al., 1980; Jalonen, 1981], а при отражениях от слоя F — в работе [Дробжев и др., 1975]. В [Chessel, 1971a, b] рассматриваются диапазоны полупрозрачности спорадического слоя E_s на основе механизмов взаимодействия магнитоионных мод, а также приведены модельные расчеты коэффициентов отражения, передачи, преломления и полутолщины слоя E_s в различных геофизических условиях. В [Jalonen, 1981] проведен анализ ионограмм ВЗ высокоширотных станций и найдены экспериментальные свидетельства биений на АЧХ слоев E и E_s. Отмечается также уменьшение шага между последовательными интерференционными минимумами и приводится интерпретация биений в рамках интерференции и взаимодействия двух магнитоионных мод с обыкновенной поляризацией. Для средних широт на следах E_s характерно увеличение шага между последовательными интерференционными минимумами и фединг обычно объясняется интерференцией O- и X-мод [Юсупов, 2011; Акчурин, Юсупов, 2011]. Из-за очень малой толщины (несколько километров) E_s-слоя отличить интерференцию O- и X-мод от интерференции двух O-мод чрезвычайно трудно. Задача упрощается, если провести аналогию с биениями на следах слоя F, которые детально были исследованы в [Дробжев и др., 1975]. Данная работа посвящена исследованию уже описанных и не описанных ранее биений при отражениях от ионосферы на средних широтах с целью обобщения всех типов поляризационных биений. Подобное исследование стало возможным благодаря особенностям системы управления ионозонда «Циклон».

1. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Исходными экспериментальными данными являются ионограммы ВЗ, полученные ионозондом «Циклон» (Казань, ~59° E, 49° N). Для изучения быстрых процессов, происходящих в ионосфере, в феврале 2010 г. была модернизирована система управления ионозондом «Циклон» [Акчурин, Юсупов, 2010]. После модернизации ионозонд имеет следующие характеристики: пиковая мощность зондирующего сигнала 10 кВт; длительность зондирующего импульса 70 мкс; частотный диапазон зондирования 1–9 МГц; время зондирования 20 с. В стандартном режиме он дает одну ионограмму в минуту и имеет скрещенную дельта-антенну высотой ~10 м (одно плечо антенны работает на излучение, другое — на прием). Ионозонд не имеет системы разделения поляризационных мод при приеме, что, с одной стороны, позволяет проводить анализ поляризационных вариаций амплитуд отраженных сигналов, описываемых в данной работе, с другой стороны, затрудняет автоматическое выделение следов отражений на ионограмме, необходимое для задач восстановления профилей электронной концентрации.

В настоящее время не существует надежных полностью автоматических (без участия оператора) методов получения высотных профилей электронной концентрации по ионограммам ВЗ. Поэтому, хотя высокое временное разрешение ионозонда «Циклон» (1 ионограмма в минуту) позволяет получить новые данные о динамике ионосферы, крайне сложно обеспечить ручную обработку такого большого объема данных. Для решения этой проблемы в Казанском федеральном университете были разработаны алгоритмы наглядной визуализации большого потока ионограмм в виде итоговых сводных карт состояния ионосферы (A-, H-, A_s-карты) [Юсупов, 2011; Akchurin, Yusupov, 2011].

A-карта (амплитудная карта) — это временной ход АЧХ отраженного сигнала, H-карта (высотная карта) — временной ход высотно-частотной характеристики (ВЧХ) отраженного сигнала, A_s-карта — временной ход суммарной амплитуды (по всем частотам)

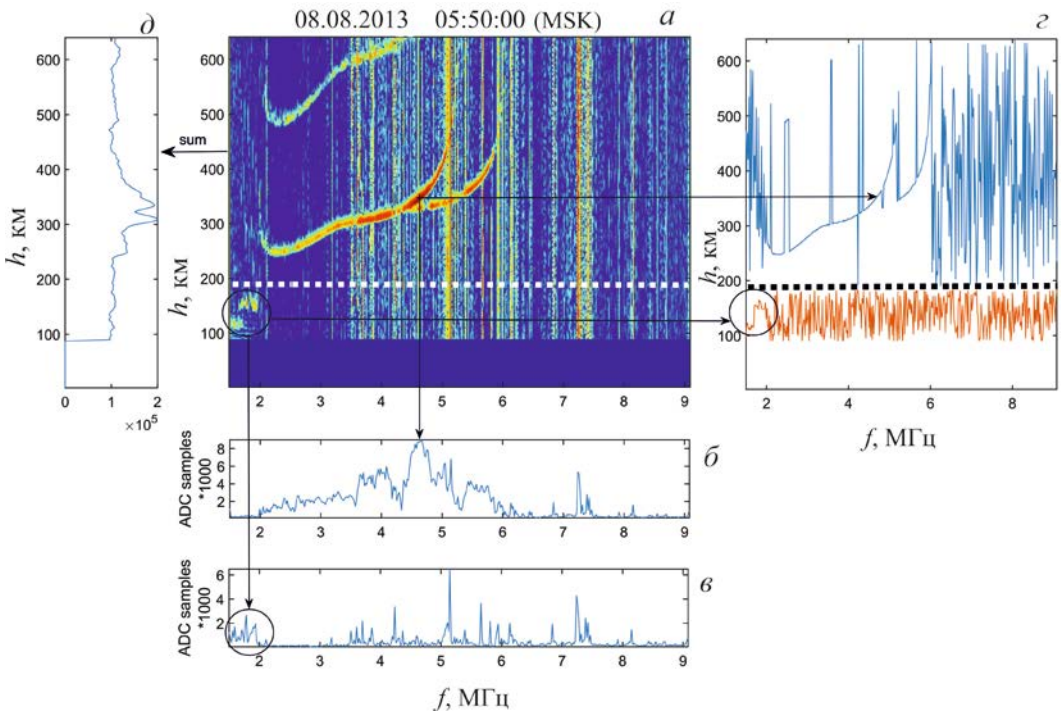

Рис. 1. Алгоритм получения сводных карт состояния ионосферы: ионограмма (*а*); АЧХ слоя F (*б*); АЧХ слоя E (*в*); ВЧХ слоев F и E (*г*); высотная гистограмма, полученная суммированием всех амплитуд ионограммы вдоль оси частот (*д*)

отраженного сигнала. A_s-карта схожа с известными представлениями результатов ВЗ в виде RTI-имиджей по радарным наблюдениям за ионосферой [Haldoupis et al., 2006; Lynn et al., 2011; Harris et al., 2016; Kozlovsky et al., 2018], а А-карта схожа с FTI-имиджами [Kozlovsky et al., 2018]. На рис. 1 показан процесс получения сводных карт состояния ионосферы с примером ионограммы (*а*). Для получения А-карт определяются максимумы амплитуды для каждой частоты (*б*). Для Н-карт определяются высоты, соответствующие максимумам амплитуды (*г*), для A_s-карт для каждой высоты находится суммарная по всем частотам амплитуда (*д*).

Затем описанная выше процедура повторяется для каждого момента времени ионограммы. При построении А- и Н-карт отдельно для E- и F-областей ионограмма разделяется на два высотных интервала 1–200 и 200–600 км соответственно. На рис. 2 показаны сводные карты состояния ионосферы за 22 августа 2013 г. Они наглядно иллюстрируют вариации амплитуды отраженного сигнала, высоты отраженного сигнала и действующих высот слоев ионосферы. По сводным картам можно легко проанализировать вариации критических частот слоев ионосферы. В данной работе сводные карты состояния ионосферы используются для изучения биений на ионосферных следах при ВЗ.

2.1. Вариации амплитуд сигналов, отраженных от слоя F

В работе [Дробжев и др., 1975] детально исследовались биения (поляризационный фединг) при отражении сигнала от слоя F. Было показано, что они могут служить дополнительным источником информации о фоновой концентрации нижней части

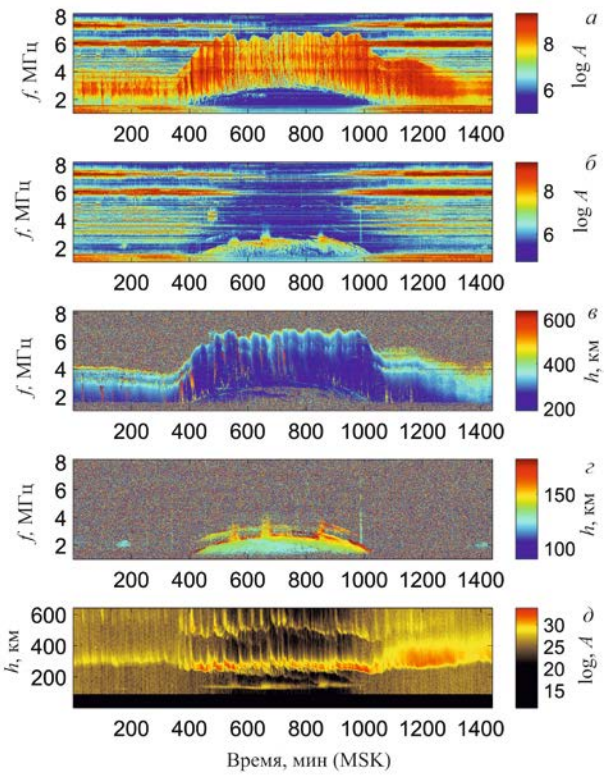

Рис. 2. А-карта F-области (*а*); А-карта E-области (*б*); Н-карта F-области (*в*); Н-карта E-области (*г*); A_s-карта (*д*)

ионосферы. Исследовались также вариации точки нулевых биений (частоты зондирования, где разность действующих высот О- и Х-мод стремится к нулю). К сожалению, эти работы проводились с использованием аналоговой техники. Данные не сохранялись на цифровой носитель, а анализировались по фотографиям осциллограмм.

На рис. 3 показаны пример ионограммы ионозонда «Циклон» (*а*) с биениями при отражении сигнала от слоя F (по типу O- и X-мод), высотно-частотные характеристики для O- и X-мод и АЧХ F-слоя. Отмечена точка нулевых биений *f**. Характерной особенностью вариаций АЧХ при отражении от слоя *F* является наличие двух интервалов с разными свойствами. На первом интервале (до точки нулевых биений) наблюдается последовательное увеличение разности частот между минимумами, а на втором (после точки нулевых биений) — последовательное уменьшение разности частот между минимумами.

Сама точка нулевых биений является либо минимумом, либо максимумом, при этом на A-карте формируется узор в виде кольца (рис. 4, *а*). При расщеплении слоя F на F1 и F2 возможно наблюдение биений при отражении сигнала как от слоя F1, так и от слоя F2 (рис. 4, *б*). При отражении сигнала от слоя F можно наблюдать также биения O- и Z-мод (когда след необыкновенной Z-моды расположен в нижней частотной области по отношению к O-моде), но для средних широт это чрезвычайно редкое явление, более характерное для полярных широт. Частотное расстояние между минимумами, с которых начинаются квазипериодические вариации, равно ~38 кГц. Применение формулы $\Delta h = c/(2\Delta f)$ дает разницу действующих высот отражения ~3.9 км между обыкновенной и необыкновенной модами. Таким образом, биения начинаются/заканчиваются при сближении/удалении следов разной поляризации на величину ~3.9 км при длительности зондирующего импульса ионозонда 70 мкс. Кроме высокочастотных вариаций амплитуд отраженного сигнала, связанных с взаимодействием O- и X-мод, на A-картах слоя F ясно видны низкочастотные вариации АЧХ при прохождении перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Данные вариации АЧХ связаны с увеличением амплитуды сигнала, отраженного от максимумов электронной концентрации, образовавшихся при прохождении ПИВ. На рис. 4 связанные с ПИВ низкочастотные вариации АЧХ отмечены серыми стрелками. На A_s-картах можно видеть также следы прохождения ПИВ в виде наклонных полос (например, рис. 2, *д*).

2.2. Вариации амплитуд сигналов при отражении от E_s-слоя (O- и X-моды)

Вариации амплитуд при биении O- и X-мод можно наблюдать также при отражении сигнала от спорадического слоя E при условии, что плазменная частота слоя превышает частоту отражения обыкновенной волны на половину гирочастоты электронов [Юсупов, 2011]. Ионограммные следы E_s на средних широтах почти строго горизонтальны. Дисперсионный наклон, или касп, наблюдается только в дневные часы на низкочастотном конце следа слоя E_s как для O-, так и для X-моды. Касп необыкновенного следа E_s на высокочастотном конце следа в большинстве случаев не виден на ионограммах ВЗ вследствие экранирования следом обыкновенной компоненты.

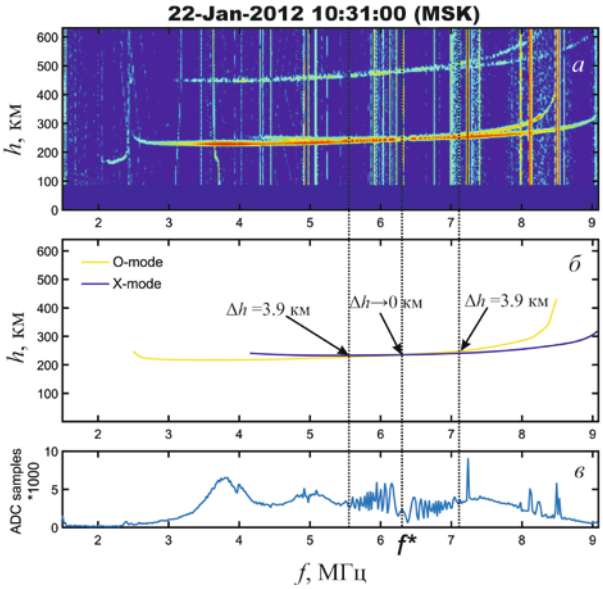

Рис. 3. Пример ионограммы с биениями по типу O- и X-мод на следах слоя F (*а*); высотно-частотные характеристики O- и X-мод следов слоя F (*б*); АЧХ F-слоя для данной ионограммы, показывающая картину поляризационного фединга (*в*). *f** — частота нулевых биений

Следовательно, при отражениях сигнала от E_s-слоя биения, как правило, будут наблюдаться только до частоты зондирования, где разность действующих высот O- и X-мод стремится к нулю (точки нулевых биений). Таким образом, в большинстве случаев будет наблюдаться последовательное увеличение разности частот между минимумами в отличие от отражений от F-слоя. Пример таких биений при отражении от E_s приведен на рис. 5. Видно, что биения начинаются на ~4.5 МГц, что соответствует разности действующих высот между следами ~5 км и заканчиваются на ~6.2 МГц (разность ~0.6 км). На рис. 6, *а* дана A-карта, соответствующая биениям, показанным на рис. 5.

На рис. 6, *б* показан очень редкий случай, когда при отражении от E_s-слоя наблюдаются биения как до точки нулевых биений, так и после нее. Когда X-след приближается к O-следу, наблюдается увеличение разности частот между минимумами. В случае удаления X- от O-следа наблюдается уменьшение разности частот между минимумами. В области нулевых биений имеется характерный узор в виде последовательных колец. Для такого случая можно с высокой точностью определить точку нулевых биений, а следовательно, минимальное расстояние между O- и X-следами. Середина частотного интервала между последним минимумом диапазона увеличения шага и первым минимумом диапазона уменьшения шага является точкой нулевых биений. Как упоминалось выше, такая картина фединга при отражении от E_s-слоя чрезвычайно редко наблюдается на средних широтах и будет более характерна для экваториальных широт благодаря большей электронной концентрации в E_s-слое. К тому же на средних широтах наблюдение и анализ такой картины биений затруднен из-за технических ограничений. Из рис. 6, *б* видно, что картина поляризационного фединга изменяется очень

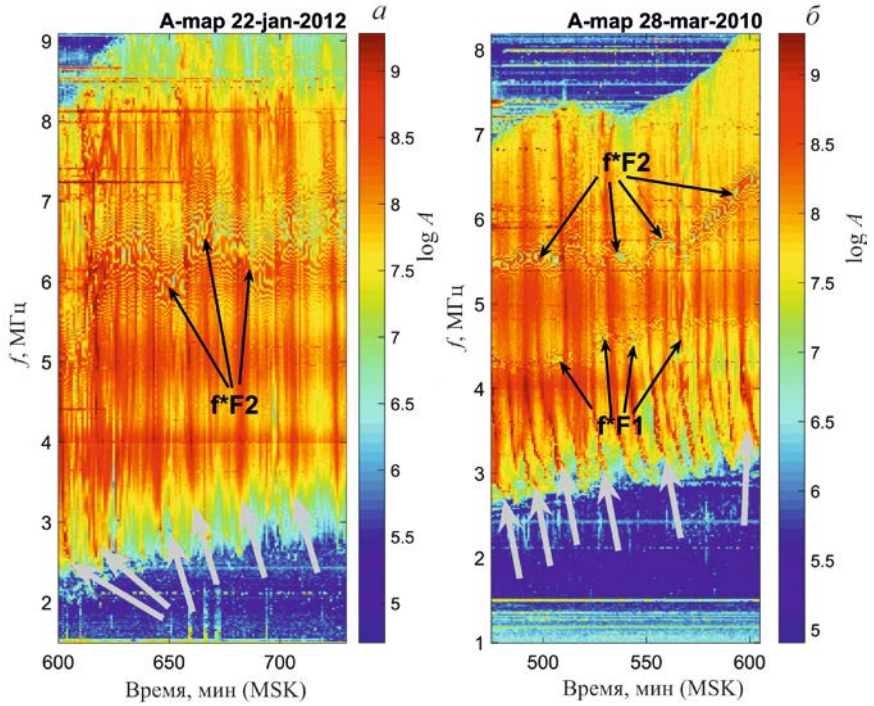

Рис. 4. Картины поляризационного фединга O- и X-мод на A-картах для слоя F2 (*а*) и одновременно для F1 и F2 (*б*). Для наглядности черными стрелками отмечены частотные вариации точки нулевых биений, а серыми стрелками отмечены увеличения амплитуды в следствии прохождения ПИВ

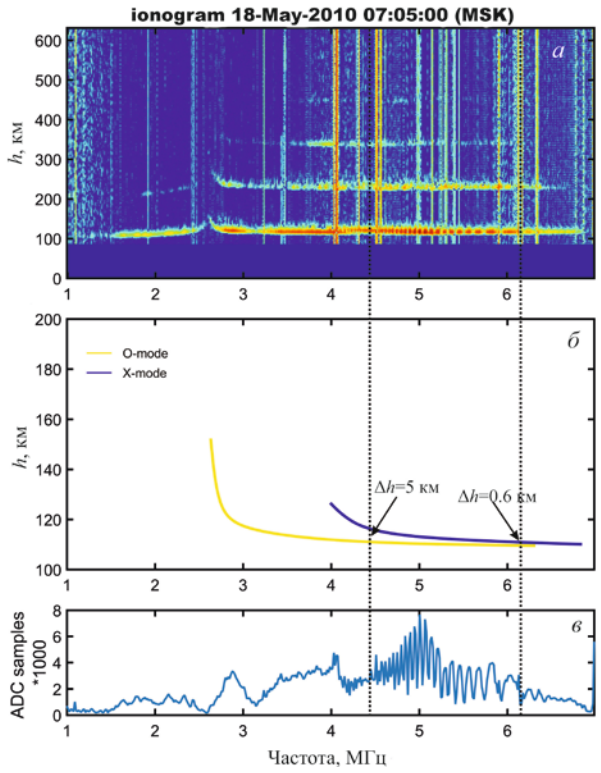

Рис. 5. Пример ионограммы с вариациями амплитуд при биениях по типу O- и X-мод на следах слоя E_s (*а*); высотно-частотные характеристики O- и X-мод следов слоя E_s (для наглядности ось высот растянута по отношению к ионограмме) (*б*); АЧХ E_s-слоя для данной ионограммы, показывающая картину поляризационного фединга (*в*). Пунктирные линии отмечают начальную и конечную частотные границы диапазона биений. Стрелками отмечены разность действующих высот между O- и X-модами на границах диапазона биений

быстро, следовательно, мы не можем уменьшить скорость регистрации ионограмм. С другой стороны, необходим малый шаг между зондирующими частотами и одновременно широкий диапазон зондирования (например ~1–30 МГц), что требует достаточно сложной системы управления ионозондом и приводит к уменьшению скорости регистрации ионограмм.

2.3. Вариации амплитуд сигналов, отраженных от E_s-слоя (две O-моды)

Квазипериодические вариации АЧХ E- и E_s-слоев по типу взаимодействия двух O-мод на полярных широтах исследовались в работе [Jalonen, 1981], попытки найти такие биения были сделаны также в [Шерстюков, 1989]. Эти работы основаны на описанной в [Chessel, 1971a, b] теории, по которой появление второй O-моды объясняется в рамках процесса межмодового взаимодействия, когда при наклонных силовых линиях магнитного поля и крутом градиенте электронной концентрации E и/или E_s-слоев при отражении часть энергии O-моды трансформируется в X-моду, которая отражается на чуть большей высоте и на обратном пути, проходя уровень отражения O-моды, снова превращается в O-моду. В работе [Jalonen, 1981] для полярных широт обнаружены свойства АЧХ с характерным уменьшением частотной разности между последовательными минимумами. На ионограммах ионозонда «Циклон» иногда наблюдаются два очень глубоких минимума, каждый из которых имеет небольшое частотное протяжение, или один глубокий минимум с большим частотным протяжением в диапазоне частот ниже области биений O- и X-мод. При-

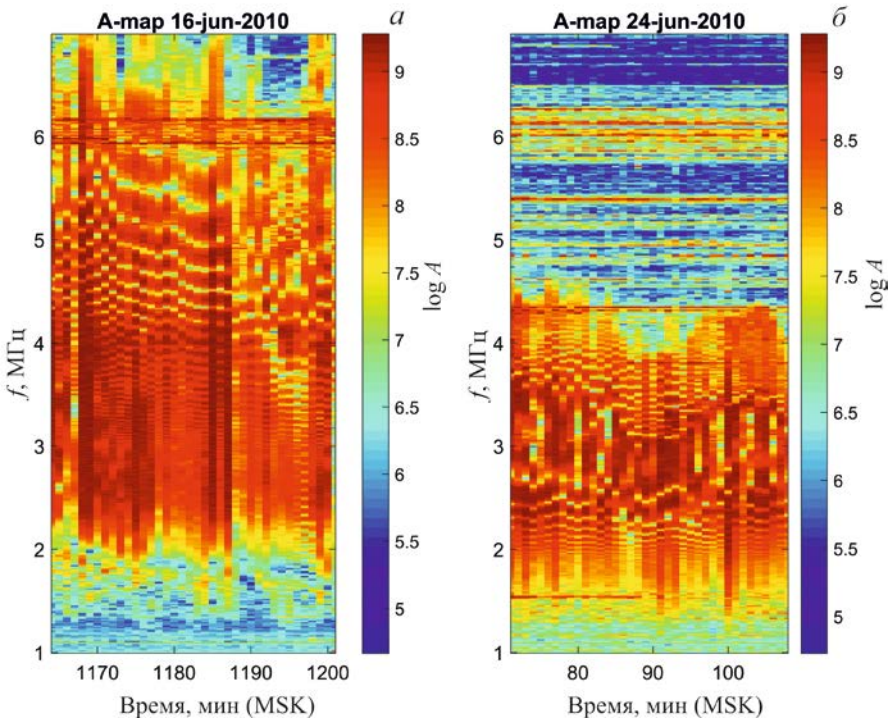

Рис. 6. Картины поляризационного фединга О- и Х-мод на А-картах для слоя E_s: увеличение шага между последовательными минимумами (*а*); наличие увеличения и уменьшения шага, частотный интервал между двумя типами биений соответствует точке нулевых биений и образует узор в виде «кольца», схожий с картиной на F-следах (*б*)

мер наблюдения таких биений показан на рис. 7 (стрелками отмечены два минимума АЧХ).

На А-карте E_s-слоя (рис. 8) приведены частотно-временные вариации минимумов, отмеченных на рис. 7. Видно, что вариации этих минимумов образуют узор в виде колец, который подобен вариациям точки нулевых биений, описанных в разделах 2.1 и 2.2. Если кольца на рис. 8 являются вариациями точки нулевых биений, то, вероятнее всего, причиной этих вариаций являются изменения описанных в [Chessel, 1971a, b; Jalonen, 1981] двух уровней отражения обыкновенной О-моды и трансформированной О-моды, как показано на рис. 7, *б*.

Как видно из рис. 8, узор в виде колец более ярко выражен для биений двух О-мод по сравнению с биениями О- и Х-мод (см. рис. 6), т. е. амплитуда колец часто падает до нуля. Частотная разность между границами кольца показывает вариации расстояния между двумя О-следами. Эти вариации происходят из-за изменений фоновой электронной концентрации Е-слоя, а также из-за изменений формы профиля E_s. В интервале времени 423–427 мин кольца расширялись и диаметр кольца изменился с ~500 кГц до 1.6 МГц, что соответствует изменению разности действующих высот с ~300 до ~90 м за 3 мин. Далее в интервале времени 427–432 мин кольцо сжималось из-за удаления второй О-моды следа от основного. Вариации диаметра кольца обычно коррелируют с вариациями критической частоты слоя E_s. Таким образом, анализ биений может дать дополнительную информацию о фоновой концентрации нижней части ионосферы. Вычислив действующие высоты отраже-

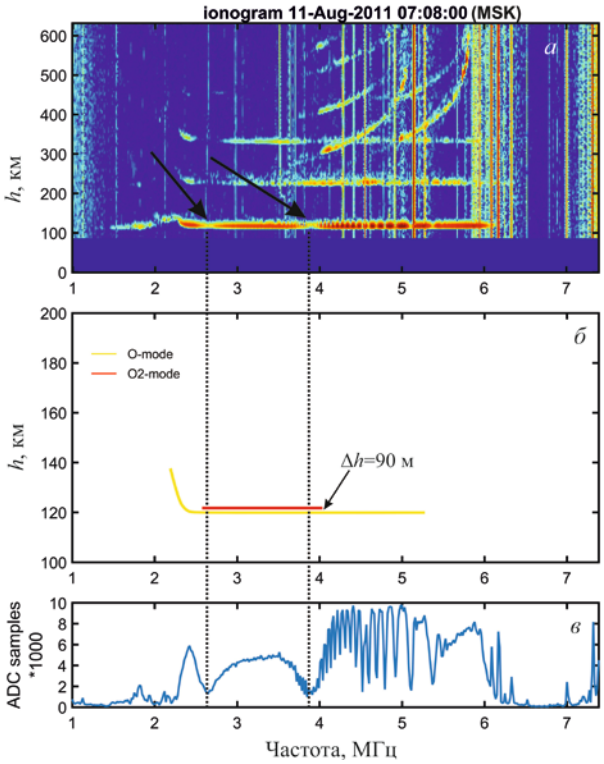

Рис. 7. Пример ионограммы с биениями по типу двух О-мод на следах слоя E_s (*а*); высотно-частотные характеристики двух следов О-мод слоя E_s (для наглядности ось высот растянута по отношении к ионограмме) (*б*); АЧХ E_s-слоя для данной ионограммы, показывающая картину поляризационного фединга (*в*). Стрелками отмечены минимумы биений по типу двух О-мод

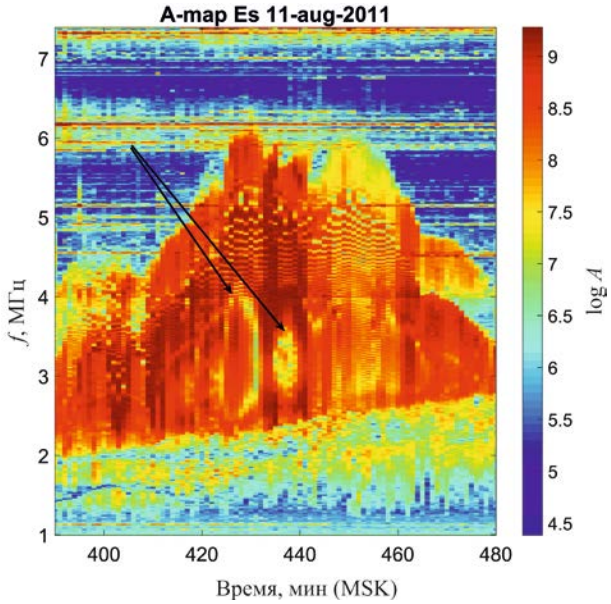

Рис. 8. А-карта E_s-слоя, показывающая узоры картины поляризационного фединга по типу двух О-мод в виде колец

ния О-моды E_s-слоя и найдя характерные точки поляризационного фединга, методом машинного обучения можно подобрать форму профиля электронной концентрации нижний части Е-слоя.

2.4. Биения при отражении сигнала от транзиентного слоя E_s

Возникновение транзиентного спорадического слоя изучено недостаточно. От обычного E_s-слоя его отличают мгновенное появление с высокой предельной частотой (иногда до 25 МГц и более); плоская форма следа, не имеющая каспа даже в дневные часы; низкая амплитуда отраженного сигнала, часто не намного превышающая уровень шумов ионограммы. Время жизни транзиентного слоя E_s варьирует от ~1 до ~30 мин, а интенсивность только снижается. Причины возникновения транзиентного слоя связывают с метеорами [Maruyama et al., 2006, 2008; Yusupov et al., 2017, Kozlovsky et al., 2018]. Пример ионограммы с транзиентным E_s показан на рис. 9, *а*.

На ионограмме отчетливо видны биения с примерно равными разностями частот между минимумами. На рис. 9, *б* показана АЧХ отраженного сигнала, пунктирными линиями отмечены частоты минимумов. Разница между соседними минимумами составляет Δf~162 кГц. Как и для других типов биений, можно получить разницу действующих высот Δh~925 м. Но что за сигналы отражаются на разных высотах? Для расщепления сигнала на магнитоионные компоненты необходима достаточная для возникновения анизотропии толщина слоя. В этом случае будут наблюдаться вариации АЧХ, подобные вариациям, описанным в разделе 2.2. Но как правило, толщина транзиентных E_s недостаточна для расщепления сигнала на магнитоионные компоненты и причиной таких биений, как на рис. 9, может быть разделение метеора на фрагменты [Mathews et al., 2010]. Каждый фрагмент метеора формирует транзиентный слой, и Δh ~ 925 м в данном случае показывает расстояние между фрагментами. Данные слои невозможно разделить на ионограмме и обнаружить их можно лишь по биениям.

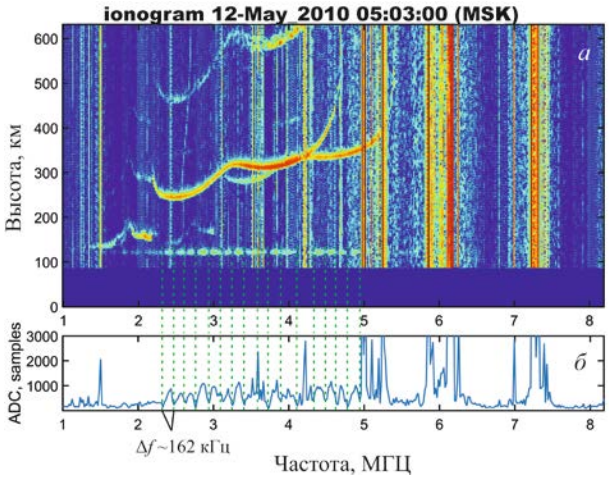

Рис. 9. Пример ионограммы с наличием транзиентного E_s-следа

2.5. Вариации амплитуд отраженных сигналов при рассеянии на слоях E, E_s и F

Нельзя не отметить вариации АЧХ, возникающие при рассеянии сигналов. При рассеянии отраженный сигнал становится диффузным, имеет продолжительность, большую, чем зондирующий импульс, а также может простираться в область частот выше критической. Рассеяние при ВЗ связывают с многолучевым отражением зондирующего сигнала от ионосферы случайными неоднородностями концентрации плазмы, когда в окрестность источника возвращается несколько сигналов, прошедших по разным траекториям и, следовательно, связанных с различными групповыми запаздываниями [Толстиков, 2004]. Первые исследования F-рассеяния описаны в [Booker, Wells, 1938], далее было выполнено много работ по этой теме, например [Антонов и др., 1987; Гершман и др., 1984; Выборнов и др., 1997; Мурадов, Мухаметназарова, 1982; Bowman, 1982; Renau, 1960; Booker et al., 1986]. Связь F- и E_s-рассеяния анализировалась в работах [Mathews et al., 2001, Haldoupis, 2011]. АЧХ при рассеянии выглядят хаотичными и имеют очень малые частотные расстояния между минимумами/максимумами, что связано с переотражениями зондирующих сигналов от различных типов неоднородностей. Пример ионограммы с такими вариациями АЧХ показан на рис. 10.

С помощью А-карт легко определять периоды появления рассеяния для E/E_s- (рис. 11, *а*) и F-следов (рис. 11, *б*). На рис. 11 диапазон времени наблюдения рассеяния отмечен вертикальными штриховыми линиями. Видно, что на ~970 мин появился E_s-слой со свойствами рассеяния, а на F-слое рассеяние появилось через ~15 мин. На ~1023 мин отражения от данного E_s-слоя начали исчезать и одновременно прекратилось рассеяние на F-следе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе детально описан алгоритм построения сводных карт состояния ионосферы, рассмотрены и

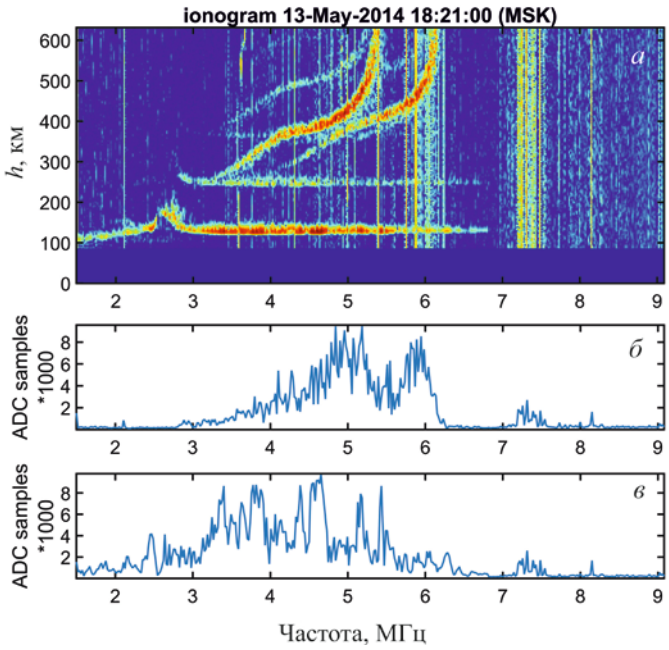

Рис. 10. Пример ионограммы, показывающей следы слоев F и E_s с тонкой случайной структурой (*а*); АЧХ F-слоя (*б*); АЧХ E_s-слоя (*в*). Эти АЧХ наглядно показывают хаотический характер вариаций амплитуд

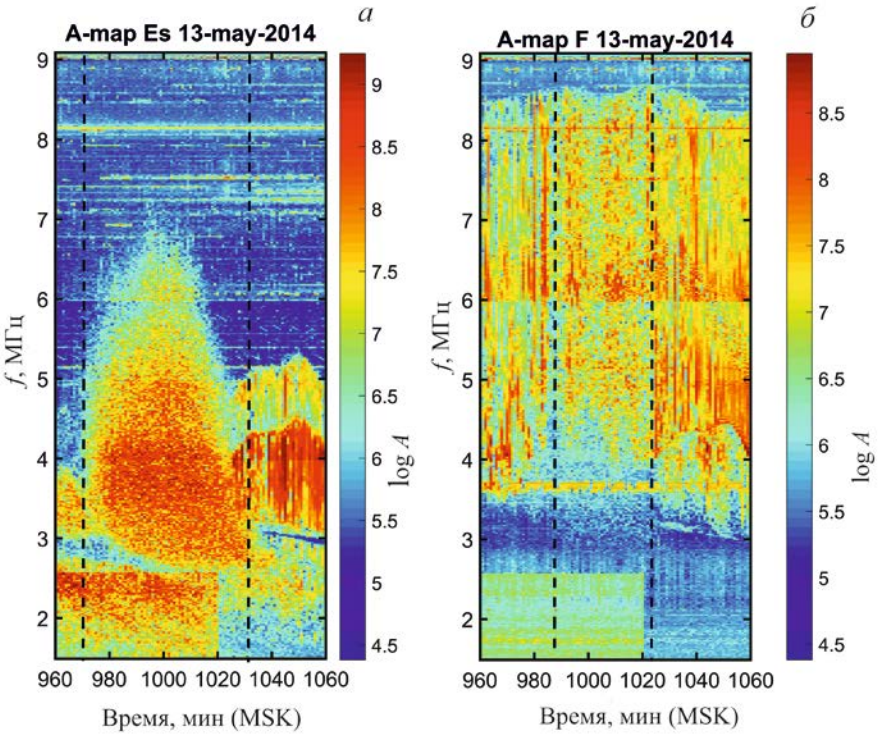

Рис. 11. Пример А-карт, показывающие вариации АЧХ при рассеянии для слоев E/E_s (*а*) и F (*б*). Вертикальными пунктирными линиями отмечен интервал времени, где наблюдается явление рассеяния

проиллюстрированы ионограммами ионозонда «Циклон» все ранее известные биения при ВЗ ионосферы на средних широтах, в том числе редкие для среднеширотного E_s-слоя интерференционные биения по типу двух О-мод. Приведены примеры биений при отражении сигнала от транзиентного E_s-слоя и предложена гипотеза, объясняющая причины их появления. Метеор разделяется на фрагменты, каждый из которых формирует транзиентный E_s-слой. Данные слои невозможно разделить на ионограмме и обнаружить их можно лишь по биениям. Показано следующее: на средних широтах биения О- и Х-мод при отражении от слоя F наблюдаются как до точки нулевых биений, так и после нее; биения О- и Х-мод при отражении от слоя E_s в большинстве случаев наблюдаются только до точки нулевых биений; биения двух О-мод при отражении от слоя E_s в большинстве случаев наблюдаются только вокруг точки

нулевых биений. Анализ картин такого поляризационного фединга позволяет с высокой точностью определять разность действующих высот между ионограммными следами различной поляризации. Эта информация может быть использована для повышения точности восстановления профиля электронной концентрации нижней части ионосферы. Приведены характерные примеры АЧХ при явлении E/E_s- и F-рассеяниях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-35-00442). В работе использованы методы анализа, полученные в рамках базового финансирования программы ФНИ II.12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акчурин А.Д., Юсупов К.М. Система управления ионозонда «ЦИКЛОН». Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2010. № 108. С. 49–56.

Акчурин А.Д., Юсупов К.М. Частотные свойства квазипериодических биений на АЧХ среднеширотного слоя E_s // Ученые записки Казанского университета. Сер. Физико-математические науки. 2011. Т. 153, № 1. С. 7–16.

Антонов А.М., Непомнящая Е.В., Фаткуллин М.Н. Явление F-рассеяния в дневной среднеширотной ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27, № 5. С. 831–833.

Выборнов Ф.И., Митякова Э.Е., Рахлин А.В. Особенности поведения индекса среднеширотного F-рассеяния // Изв. вузов. Радиофизика. 1997. Т. 40, № 3. С. 322–326.

Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984. 140 с.

Дробжев В.И., Куделин Г.М., Нургожин В.И. и др. Волновые возмущения в ионосфере. Алма-Ата: Наука, 1975. 178 с.

Мурадов А., Мухаметназарова А. Количественные характеристики F-рассеяния по данным вертикального зондирования // Иссл. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. М.: Наука, 1982. Вып. 59. С. 24–28.

Толстиков М.В. Динамика волновых неоднородностей плазмы внешней ионосферы. Дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.04.03. Иркутск, 2004. 106 с. РГБ ОД, 61:04-1/1182.

Чхетиани О.Г., Шалимов С.Л. О механизме образования фронтальных структур ионосферных спорадических слоев E // Геомагнетизм и аэрономия. 2013. Т. 53, № 2. С. 177–187. DOI: 10.7868/S0016794013020053.

Шалимов С.Л. Динамика и электродинамика неоднородностей среднеширотной нижней ионосферы (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54, № 2. С. 147–162. DOI: 10.7868/S0016794014020175.

Шерстюков О.Н. Отражающая способность среднеширотного спорадического слоя E. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Казань. 1989. 200 с.

Юсупов К.М. Тонкая структура отражений от спорадического слоя E. Дисс. канд. физ.-мат. наук.. 2011. 141 с.

Akchurin A.D., Yusupov K.M. The frequency properties of the quasiperiodic variations of midlatitude E_s layer traces amplitude. 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istabbul, 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6050993. https://ieeexplore.ieee.org/document/6050993?reload=true&arnumber=6050993.

Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V., Ignat'ev Y.A., Ponyatov A.A. Vertical motions in the lower ionosphere and a sporadic *E* layer // Radiophysics and Quantum Electronics. 1999. V. 42. P. 22–30. DOI: 10.1007/BF02677637.

Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V., Kagan L.M., Ponyatov A.A. Sunset-sunrise characteristics of sporadic layers of ionization in the lower ionosphere observed by the method of resonance scattering of radio waves from artificial periodic inhomogeneities of the ionospheric plasma // Radiophysics and Quantum Electronics. 2005. V. 48. P. 14–28. DOI: 10.1007/s11141-005-0044-3.

Booker, H.G., Wells, H.W. Scattering of radio waves by the F region of the ionosphere // Terr. Magn. Atmos. Electr. 1938. V. 43, N 3. P. 249– 256. DOI: 10.1029/TE043i003p00249.

Booker H.G., Pasmicha P.K., Powers W.J. Use of scintillation theory to explain frequency-spread on F-region ionograms // J. Atmos. Terr. Phys. 1986. V. 48, N 4. P. 327–354.

Bowman G.G. Spread-F occurrence in mid and low-latitude regions related to various levels of geomagnetic activity // J. Atmos. Terr. Phys. 1982. V. 44, N 7.1. P. 585–589.

Budden K.G. Radio Waves in the Ionosphere. Cambridge University Press, 1961. 542 p.

Chessel C.I. The numerical calculation of reflection and transmission coefficients for thin highly ionised layers including the effect of the Earth's magnetic field // J. Atmos. Terr. Phys. 1971a. V. 33. P. 1515. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90070-5.

Chessel C.I. Results of numerical calculation of reflection and transmission coefficients for thin highly ionized layers and their application to sporadic-E reflections // J. Atmos. Terr. Phys. 1971b. V. 33. P. 1803–1822. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90161-9.

Haldoupis C. A tutorial review on sporadic *E* layers // Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere. IAGA Special Sopron Book Ser. Springer, Dordrecht, 2011. V. 2. DOI: 10.1007/978-94-007-0326-1_29.

Haldoupis C., Kelley M.C., Hussey G.C., Shalimov S. Role of unstable sporadic-E layers in the generation of midlatitude spread F // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, iss. A12. P. 1446. DOI: 10.1029/2003JA009956.

Haldoupis C., Meek C., Christakis N., et al. Ionogram height-time-intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. V. 68. P. 539–557. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.03.020.

Harris T.J., Quinn A.D., Pederick L.H. The DST group ionospheric sounder replacement for JORN // Radio Sci. 2016. V. 51. P. 563–572. DOI: 10.1002/2015RS005881.

Jalonen L. Quasi-periodic frequency dependence of E_s- and E-layer echo amplitudes caused by mode coupling // J. Atmos. Terr. Phys. 1981. V. 43. P. 1285–1288. DOI: 10.1016/0021-9169(81)90153-7.

Kozlovsky A., Shalimov S., Kero J., et al. Multi-instrumental observations of nonunderdense meteor trails // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2018. V. 123, iss. 7. P. 5974–5989. DOI: 10.1029/2018JA025405.

Lynn K.J.W., Otsuka Y., Shiokawa K. Simultaneous observations at Darwin of equatorial bubbles by ionosonde-based range/time displays and airglow imaging // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. L23101. DOI: 10.1029/2011GL049856.

Maruyama T., Saito S., Yamamoto M., Fukao S. Simultaneous observation of sporadic *E* with a rapid-run ionosonde and VHF coherent backscatter radar // Ann. Geophys. 2006. V. 24. P. 153–162. DOI: 10.5194/angeo-24-153-2006.

Maruyama T., Kato H., Nakamura M. Meteor-induced transient sporadic *E* as inferred from rapid-run ionosonde observations at midlatitudes // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, A09308. DOI: 10.1029/2008JA013362.

Mathews J.D. Sporadic E: Current views and recent progress // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 413–435. DOI: 10.1016/S1364-6826(97)00043-6.

Mathews J.D., Bekeny F.S. Upper atmosphere tides and the vertical motion of ionospheric sporadic layers at Arecibo // J. Geophys. Res. 1979. V. 84. P. 2743–2750. DOI: JA084iA06p02743.

Mathews J.D., Machugaa D.W., Zhou Q. Evidence for electrodynamic linkages between spread-F, ion rain, the intermediate layer, and sporadic E: results from observations and simulations // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2001. V. 63, iss. 14. P. 1529–1543. DOI: 10.1016/S1364-6826(01)00034-7.

Mathews J.D., Briczinski S.J., Malhotra A., Cross J. Extensive meteoroid fragmentation in V/UHF radar meteor observations at Arecibo Observatory // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. P. L04103. DOI: 10.1029/2009GL041967.

Renau Y.A. A study of observed spread-F // J. Geophys. Res. 1960. V. 65, N 10. P. 3219.

Turunen T., Nygren T., Jalonen L. Observations of the reflection coefficient of the sporadic *E*-layer at high latitudes // J. Atmos. Terr. Phys. 1980. V. 42. P. 147–154. DOI: 10.1016/0021-9169(80)90074-4.

Whitehead J.D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E // J. Atmos. Terr. Phys. 1989. V. 51. P. 401–424. DOI: 10.1016/0021-9169(89)90122-0.

Yusupov K., Maruyama T., Akchurin A., Sherstyukov O. Transient E_s-layers 2013–2014 // 2017 32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, URSI GASS 2017. V. 2017-January. P. 1–3. DOI: 10.23919/URSIGASS.2017.8105077.

REFERENCES

Akchurin A.D., Yusupov K.M. Control system for ionosonde Cyclone. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal]. 2010, no. 108, pp. 49–56. (In Russian).

Akchurin A.D., Yusupov K.M. The frequency properties of the quasiperiodic variations of midlatitude E_s layer traces amplitude. 2011 XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istabbul, 2011. P. 1–4. DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6050993. https://ieeexplore.ieee.org/document/6050993?reload=true&arnumber=6050993.

Akchurin A.D., Yusupov K.M. Frequency properties of quasi-periodical beatings at AFC of mid-latitude E_s layer. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta* [Proc. of Kazan University]. Ser. Phys. and Math. Sciences. 2011, vol. 153, no. 1, pp. 7–16. (In Russian).

Antonov A.M., Nepomnyashchaya E.V., Fatkullin M.N. F-spread phenomenon in daytime mid-latitude ionosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1987, vol. 27, no. 5, pp. 831–833. (In Russian).

Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V., Ignat'ev Y.A., Ponyatov A.A. Vertical motions in the lower ionosphere and a sporadic E layer. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1999, vol. 42, pp. 22–30. DOI: 10.1007/BF02677637.

Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V., Kagan L.M., Ponyatov A.A. Sunset-sunrise characteristics of sporadic layers of ionization in the lower ionosphere observed by the method of resonance scattering of radio waves from artificial periodic inhomogeneities of the ionospheric plasma. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2005, vol. 48, pp. 14–28. DOI: 10.1007/s11141-005-0044-3.

Booker, H.G., Wells, H.W. Scattering of radio waves by the F region of the ionosphere. *Terr. Magn. Atmos. Electr*. 1938, vol. 43, no. 3, pp. 249– 256. DOI: 10.1029/TE043i003p00249.

Booker H.G., Pasmicha P.K., Powers W.J. Use of scintillation theory to explain frequency-spread on F-region ionograms. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1986, vol. 48, no. 4, pp. 327–354.

Bowman G.G. Spread-F occurrence in mid and low-latitude regions related tovarious levels of geomagnetic activity. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1982, vol. 44, no. 7.1, pp. 585–589.

Budden K.G. Radio Waves in the Ionosphere. Cambridge University Press, 1961. 542 p.

Chessel C.I. The numerical calculation of reflection and transmission coefficients for thin highly ionised layers including the effect of the Earth's magnetic field. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1971a, vol. 33, p. 1515. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90070-5.

Chessel C.I. Results of numerical calculation of reflection and transmission coefficients for thin highly ionised layers and their application to sporadic-E reflections. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1971b, vol. 33, pp. 1803–1822. DOI: 10.1016/0021-9169(71)90161-9.

Chkhetiani O.G., Shalimov S.L. Mechanism by which frontal structures in the ionospheric sporadic E layers are formed. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013, vol. 53, no. 2, pp. 177–187. DOI: 10.1134/S0016793213020059.

Drobzhev V.I., Kudelin G.M., Nurgozhin V.I., Penelitsyn G.M., Rudina M.P., Troitsky B.V., Yakovets A.F. *Volnovye vozmushcheniya v ionosphere* [Wave disturbances in the ionosphere]. Alma-Alta, Nauka, 1975. 178 p. (In Russian).

Gershman B.N., Kazimirovsky E.S., Kokourov V.D., Chernobrovkina N.A. *F-rasseyanie v ionosphere* [F-spread in the ionosphere]. Moscow, Nauka, 1984. 141 p. (In Russian).

Haldoupis C. Haldoupis C. A tutorial review on sporadic *E* layers. *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere. IAGA Special Sopron Book Ser*. Springer, Dordrecht, 2011, vol. 2. DOI: 10.1007/978-94-007-0326-1_29.

Haldoupis C., Kelley M.C., Hussey G.C., Shalimov S. Role of unstable sporadic-*E* layers in the generation of mid-latitude spread F. *J. Geophys. Res*. 2003, vol. 108, iss. A12, pp. 1446. DOI: 10.1029/2003JA009956.

Haldoupis C., Meek C., Christakis N., Pancheva D., Bourdillon A. Ionogram height-time-intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2006, vol. 68, pp. 539–557. DOI: 10.1016/j.jastp.2005.03.020.

Harris T.J., Quinn A.D., Pederick L.H. The DST group ionospheric sounder replacement for JORN. *Radio Sci*. 2016, vol. 51, pp. 563–572. DOI: 10.1002/2015RS005881.

Jalonen L. Quasi-periodic frequency dependence of E_s- and *E*-layer echo amplitudes caused by mode coupling // J. Atmos. Terr. Phys. 1981, vol. 43, pp. 1285–1288. DOI: 10.1016/0021-9169(81)90153-7.

Kozlovsky A., Shalimov S., Kero J., Raita T., Lester M. Multi-instrumental observations of nonunderdense meteor trails. *J. Geophys. Res.: Space Phys*. 2018, vol. 123, iss. 7, pp. 5974–5989. DOI: 10.1029/2018JA025405.

Lynn K.J.W., Otsuka Y., Shiokawa K. Simultaneous observations at Darwin of equatorial bubbles by ionosonde-based range/time displays and airglow imaging. *Geophys. Res. Lett*. 2011, vol. 38, pp. L23101. DOI: 10.1029/2011GL049856.

Maruyama T., Saito S., Yamamoto M., Fukao S. Simultaneous observation of sporadic *E* with a rapid-run ionosonde and VHF coherent backscatter radar. *Ann. Geophys*. 2006, vol. 24, pp. 153–162. DOI: 10.5194/angeo-24-153-2006.

Maruyama T., Kato H., Nakamura M. Meteor-induced transient sporadic E as inferred from rapid-run ionosonde observations at midlatitudes. *J. Geophys. Res*. 2008, vol. 113, A09308. DOI: 10.1029/2008JA013362.

Mathews J.D. Sporadic E: Current views and recent progress. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 1998, vol. 60, pp. 413-435. DOI: 10.1016/S1364-6826(97)00043-6.

Mathews J.D., Bekeny F.S. Upper atmosphere tides and the vertical motion of ionospheric sporadic layers at Arecibo. *J. Geophys. Res*. 1979, vol. 84, pp. 2743–2750. DOI: JA084iA06p02743.

Mathews J.D., Machugaa D.W., Zhou Q. Evidence for electrodynamic linkages between spread-F, ion rain, the intermediate layer, and sporadic E: results from observations and simulations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys*. 2001, vol. 63, iss. 14, pp. 1529–1543. DOI: 10.1016/S1364-6826(01)00034-7.

Mathews J.D., Briczinski S.J., Malhotra A., Cross J. Extensive meteoroid fragmentation in V/UHF radar meteor observations at Arecibo Observatory. *Geophys. Res. Lett*. 2010, vol. 37, pp. L04103. DOI: 10.1029/2009GL041967.

Muradov A., Mukhametnazarova A. Quantitative characteristics of F-spread. *Issledovaniya po geomagnetimu, aeronomii I fizike Solntsa* [Res. on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. 1982, iss. 59, pp. 24–28. (In Russian).

Renau Y.A. A study of observed spread-F. *J. Geophys. Res*. 1960, vol. 65, no. 10, p. 3219.

Shalimov S.L. Dynamics and electrodynamics of ionospheric inhomogeneities of the midlatitude E region (Review). *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014, vol. 54, no. 2, pp.137–151. DOI: 10.1134/S0016793214020170.

Sherstyukov O.N. *Otrazhayushchaya sposobnost' sredneshirotnogo sloya E* [Reflection power of mid-latitude sporadic E layer]. PhD Thesis (Phys.&Math.). Kazan, 1989, 200 p. (In Russian).

Tolstikov M.V. Dinamika volnovykh neodnorodnostei plazmy vneshnei ionosfery [Dynamics of Wave Plasma Inhomogeneities in the Outer Ionosphere]. PhD Thesis 01.04.03. Irkutsk, 2004, 106 p. RGB OD 61:04-1/1182. (In Russian).

Turunen T., Nygren T., Jalonen L. Observations of the reflection coefficient of the sporadic E-layer at high latitudes. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1980, vol. 42, pp. 147–154. DOI: 10.1016/0021-9169(80)90074-4.

Vybornov F.I., Mityakova E.E., Rakhlin A.V. Behavior characteristics of the index of middle-latitude F-spread. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1997, vol. 40, pp. 206–209.

Whitehead J.D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E. *J. Atmos. Terr. Phys*. 1989, vol. 51, pp. 401–424. DOI: 10.1016/0021-9169(89)90122-0.

Yusupov K.M. Fine structure of reflections from the sporadic E layer. PhD Thesis (Phys.&Math.). 2011, 141 p. (In Russian).

Yusupov K., Maruyama T., Akchurin A., Sherstyukov O. Transient E_s-layers 2013–2014. *2017 32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, URSI GASS 2017*. 2017, vol. 2017-January, pp. 1–3. DOI: 10.23919/URSIGASS.2017.8105077.

Как цитировать эту статью:

Юсупов К.М., Мэтьюз Д.Д., Маруяма Т., Акчурин А.Д., Толстиков М.В., Шерстюков О.Н., Филиппова Е.А., Сафиуллин А.С. Амплитудные вариации отраженного сигнала при вертикальном зондировании ионосферы на средних широтах. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 3. С. 88–98. DOI: 10.12737/szf-63202010.