

УДК 550.338.2

## АНОМАЛЬНЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ ОТРАЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ ИРКУТСКОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА ЗА 2012–2016 гг.

© 2019 г. О. А. Ларюнин<sup>1</sup>, \*, В. И. Куркин<sup>1</sup>, О. И. Бернгардт<sup>1</sup>,  
Б. Г. Салимов<sup>1</sup>, А. В. Подлесный<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

\*e-mail: laroleg@inbox.ru

Поступила в редакцию 06.10.2017 г.

После доработки 04.06.2018 г.

Принята к публикации 27.09.2018 г.

Ионограммы вертикального зондирования зачастую содержат следы отражений, которые не могут быть отнесены ни к какому из типов спорадического слоя  $E_s$  и классифицируются как аномальное отражение. На основе данных вертикального зондирования на средних широтах (г. Иркутск) за 2012–2016 гг. исследованы морфологические особенности аномальных ионосферных отражений, которые отображаются на ионограммах на действующих высотах 130–200 км. Выявлены характерные суточные и сезонные вариации, а также вариации от года к году.

DOI: 10.1134/S0016794019010103

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Спорадический слой  $E_s$  активно изучается на протяжении последних десятилетий с помощью ионозондов, радаров некогерентного рассеяния и других радиофизических инструментов. Между тем, на ионограммах вертикального зондирования отмечается наличие отражений, которые не могут быть отнесены ни к какому из типов слоя  $E_s$  [Медведев и др., 2009]. В работах [Гивишвили и Лещенко, 2013, 2017] указанное явление было названо “аномальным отражением”, что на данном этапе представляется вполне релевантным.

Принимая во внимание некоторое сходство аномального отражения (АО) со спорадическим слоем  $E_s$ , следует указать на свойства, не позволяющие классифицировать АО как  $E_s$  слой. Так например, толщина “стандартного”  $E_s$  обычно не превышает единиц километров [Kirkwood and Nilsson, 2000]. При этом слой, отвечающий АО, может быть как таким же тонким (рис. 1а), так и более размытым (рис. 1б), охватывая высотный диапазон в десятки километров. С другой стороны, положение слоя  $E_s$  на ионограмме не превышает по высоте 120–130 км, а действующие высоты АО зачастую превышают 130 км [Гивишвили и Лещенко, 2013], достигая иногда 200 км, таким образом, что при одновременном появлении АО и  $E_s$  различие в их морфологии становится визуально различимым (рис. 1).

В предшествующих работах [Гивишвили и Лещенко, 2013, 2017] были рассмотрены морфологические особенности признаков аномальных отра-

жений на основе данных вертикального зондирования на сети отечественных станций. Было выявлено, в частности, совпадение статистических характеристик АО на различных среднеширотных станциях, что говорит об идентичности механизмов их происхождения (например, на станциях Москва и Подкаменная Тунгуска в Красноярском крае). С другой стороны, совпадение данных Москвы, усредненных за 3 г. и за 8 лет (2007–2014 гг.) говорит о чрезвычайной устойчивости явления АО [Гивишвили и Лещенко, 2017].

Вместе с тем, представляется целесообразным продолжить изучение статистических закономерностей явления АО на основе большого массива данных вертикального зондирования, полученных с минутным разрешением.

### 2. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Нами было проведено статистическое исследование проявлений АО на ионограммах вертикального зондирования в пос. Торы (52°53' N, 103°16' E). В рамках настоящей работы рассматриваются данные за пятилетний период 2012–2016 гг.

Для обработки ионограмм, полученных с минутным разрешением (количество ионограмм за сутки составляет 1440), нами был реализован алгоритм автоматической идентификации признаков АО, состоящий в следующем. На первом этапе для каждой ионограммы определяется критическая частота  $f_x F_2$  и при дальнейшем анализе

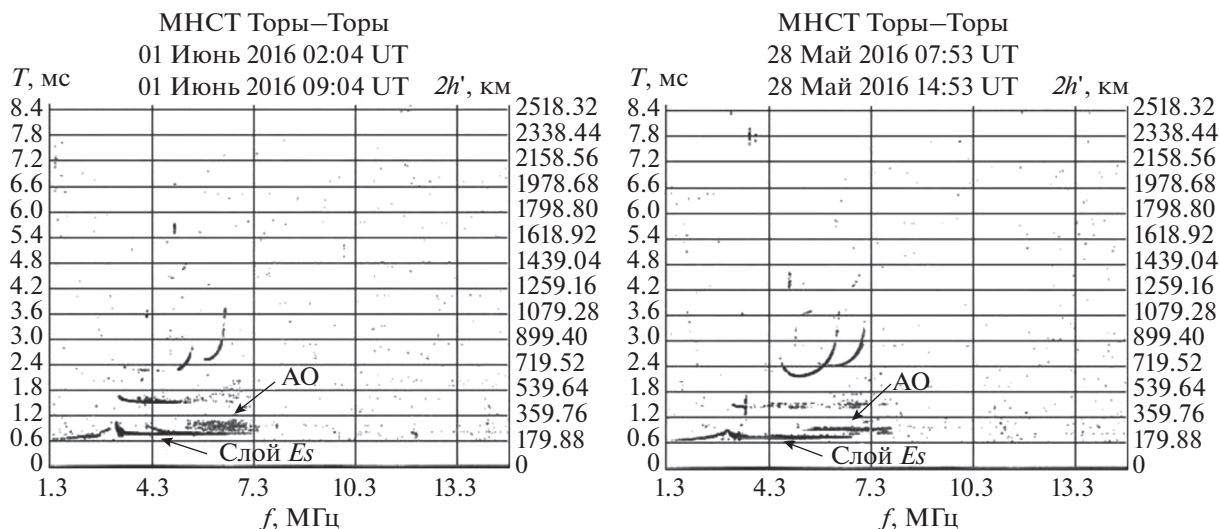


Рис. 1. Одновременное появление слоя Es и аномального отражения.

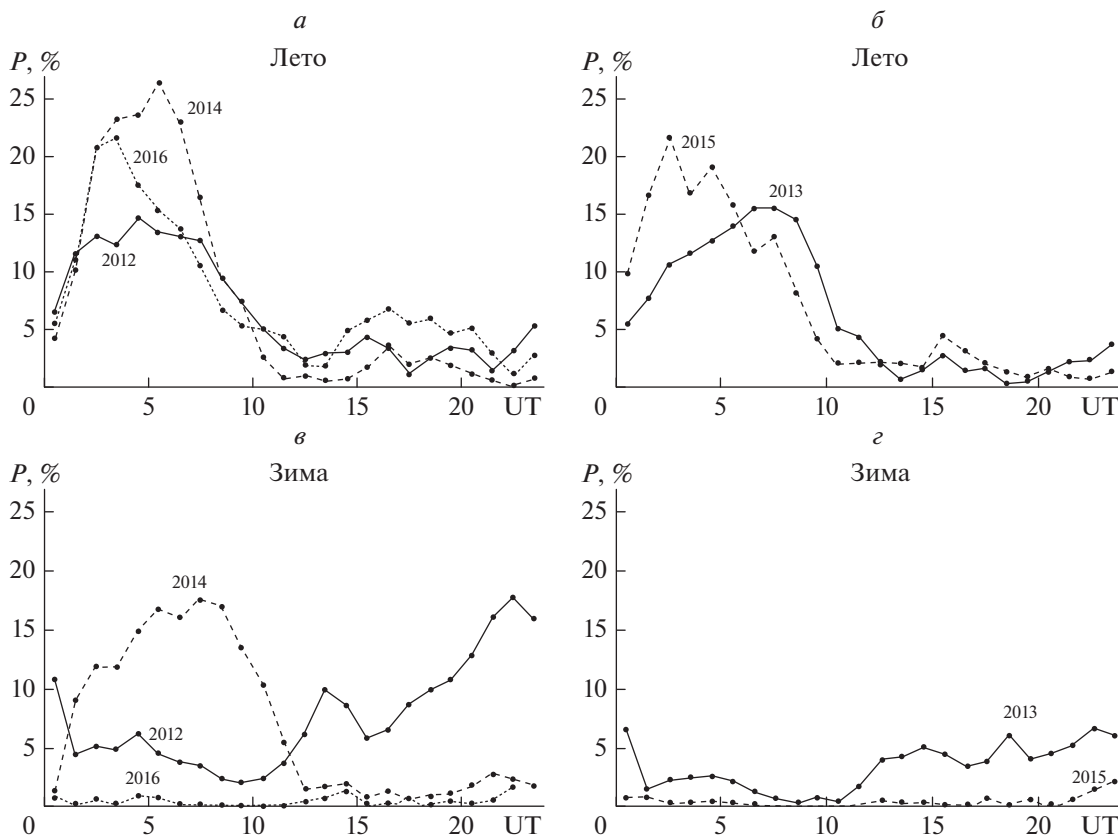


Рис. 2. Суточные вариации появления АО, усредненные по летним (а, б) и зимним (в, г) периодам.

рассматривается частотная область выше критической частоты в диапазоне действующих высот 130–200 км. Такой выбор диапазона связан с необходимостью исключения из рассмотрения отражения от слоя Es, расположенного на высотах ниже 130 км. С другой стороны, это позволяет ис-

ключить из рассмотрения эффекты неоднородностей различных масштабов, наиболее существенных в F-слое, на высотах выше 200 км. Далее программа считает количество точек значимой амплитуды (т.е. амплитуда которых превышает определенное пороговое значение), попавших в

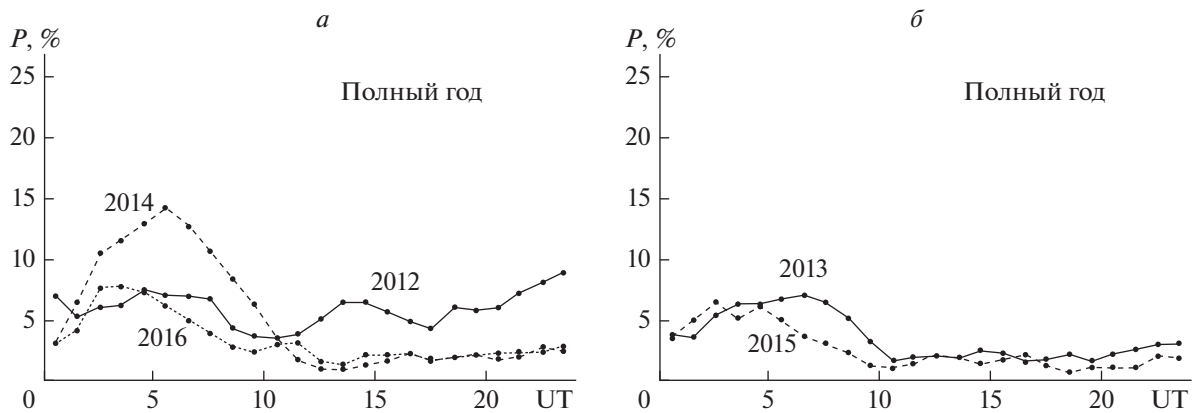


Рис. 3. Суточные вариации появления АО, усредненные по полному году.

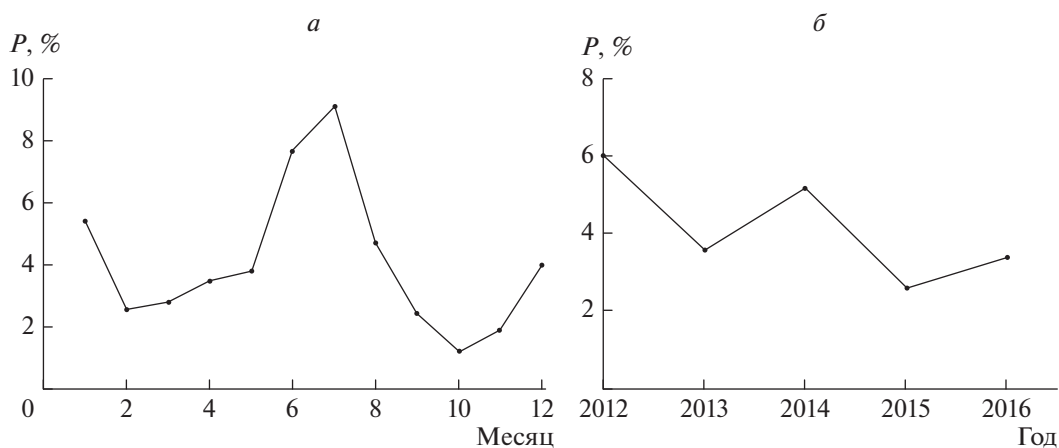


Рис. 4. (а) Помесячные вероятности появления АО, усредненные по пятилетнему периоду 2012–2016 гг. (б) Общее число проявления АО в зависимости от года.

указанную область на ионограмме. Если число точек в данном прямоугольнике превышает выбранный порог (что говорит о наличии существенного числа отражений в данном частотно-высотном диапазоне), программа идентифицирует ионограмму, как имеющую признаки аномального отражения.

Для анализа суточных вариаций проявлений АО рассчитывалось число ионограмм с АО, наблюдаемых в течение часа. Для расчета вероятности появления число ионограмм с АО внутри каждого часового интервала делилось на полное количество сеансов зондирования в течение часа (60). Так, на рис. 2 представлены вероятности появления аномального отражения внутри часовых интервалов для каждого года с 2012 по 2016. Оказалось, что максимальная вероятность появлений АО соответствует из года в год летним и зимним периодам. При этом для лета и для зимы закономерности различны, поэтому целесообразно рассмотреть данные два периода по отдельности.

На рисунке 2а, б приведены суточные зависимости вероятности обнаружения АО в летние периоды каждого из рассматриваемых годов. Например, на графике 2а точка (04:50 UT, 14.8%) на сплошной кривой означает, что летом 2012 г. в интервале времени от 04:00 до 04:59 UT на каждые 100 ионограмм приходилось 14.8, содержащих признаки аномального отражения. Можно видеть, что для каждого года летом сохраняется одна и та же закономерность: главный максимум суточного хода находится в интервале от 3 до 7 UT, тогда как выше 10 UT число аномальных отражений существенно падает.

Иная ситуация имеет место для зимних периодов (рассматривались январь, февраль и март). На рисунке 2в, г можно видеть, что какие-либо общие статистические закономерности здесь отсутствуют, при этом зимой 2015 и 2016 гг. количество АО относительно мало.

Рисунок 3 демонстрирует зависимости, построенные для полного года. Здесь характерные

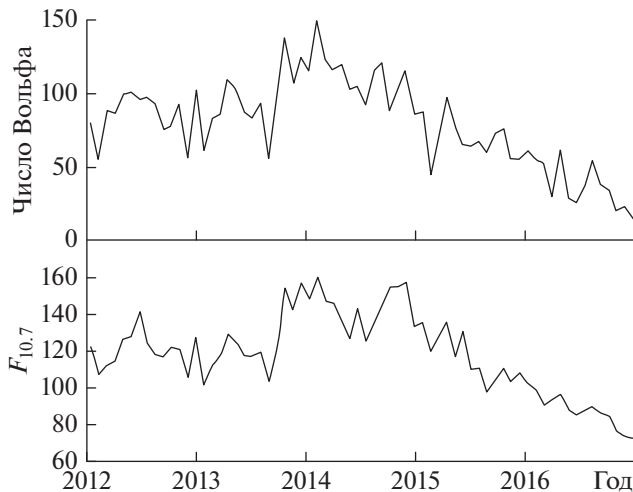


Рис. 5. Временной ход чисел Вольфа и индекса  $F_{10.7}$ , усредненных за 27 дней.

для летнего периода максимумы нивелируются (за исключением 2014 г.).

Следует отметить, что наибольшее число проявлений АО приходится на летние месяцы (рис. 4а). Вероятность появления АО в осенний и весенний периоды относительно мала [Гивишвили и Лещенко, 2017].

Кроме того, показателем “интегральный эффект”, представленный на рис. 4б, где отображено сведенное к вероятности общее число проявлений АО за каждый год. Данная зависимость актуальна, в частности, в контексте вопроса о влиянии солнечной активности на частотность появления АО. На рисунке 5 приведен временной ход чисел Вольфа и индекса  $F_{10.7}$  по данным интернет-ресурса <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>. Так, по данным 2012–2016 гг. можно заключить, что между частотностью появления АО и параметрами солнечной активности корреляция не наблюдается.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании на основе анализа большого массива данных подтверждено суще-

ствование аномальных ионосферных отражений. Несмотря на их сходство со спорадическим слоем  $E_s$ , данное явление не может быть отнесено к какому-либо типу  $E_s$  согласно современной классификации. Не вызывает сомнения, что соответствующие треки не связаны со сбоем измерительной аппаратуры, не являются помехами или кратными отражениями.

Разработан и реализован метод автоматического детектирования сигналов АО, позволивший автоматически обработать большой объем минутных данных за 5 лет, полученных на скоростном ЛЧМ-ионозонде ИСЗФ СО РАН.

В результате проведенной статистической обработки можно сделать вывод о ярко выраженной суточной, а также сезонной зависимости частотности появления АО.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.12.

Авторы выражают искреннюю благодарность Г.В. Гивишвили и Л.Н. Лещенко за полезное и плодотворное обсуждение работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н. Аномальные отражения ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 53. № 5. С. 677–683. 2013.
- Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н. Пространственно-временные характеристики аномальных отражений от ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 4. С. 472–480. 2017.
- Медведев А.В., Грозов В.П., Ратовский К.Г., Штынев Б.Г., Бернгардт О.И., Ким А.Г., Золотухина Н.А., Заворин А.В., Куркин В.И., Потехин А.П. Особенности спорадических образований в  $E$ -области ионосферы во время сильных геомагнитных возмущений 29–31 октября 2003 г. по данным радиофизического комплекса инструментов ИСЗФ СО РАН // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 5. С. 652–657. 2005.
- Kirkwood S., Nilsson H. High-latitude sporadic- $E$  and other thin layers – the role of magnetospheric electric fields // Space Sci. Rev. V. 91. № 3. P. 579–613. 2000.