

## Морфологические особенности признаков перемещающихся ионосферных неоднородностей по данным слабонаклонного зондирования ионосферы

В.И. Куркин, О.А. Ларюнин, А.В. Подлесный,  
М.Д. Пежемская, Л.В. Чистякова\*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а*

Поступила в редакцию 8.11.2013 г.

Выполнен морфологический анализ ионограмм слабонаклонного зондирования. На ряде ионограмм помимо основного трека появляется дополнительный трек, называемый «серпом», который обычно свидетельствует о наличии перемещающегося ионосферного возмущения. Для зимнего и летнего времени 2011–2012 гг. исследованы: частотность появления серпов на ионограммах в зависимости от времени суток, среднее время жизни, их морфологические особенности. Учащенный режим получения ионограмм в точке приема (интервал – 1 мин) позволил проследить динамику и эволюцию серпов. Использование обширного статистического материала при обработке дало возможность выявить высокую частотность и сезонные особенности появления перемещающихся ионосферных возмущений.

*Ключевые слова:* ионограмма, перемещающиеся ионосферные возмущения, серп; ionogram, travelling ionospheric disturbances, cusp.

### Введение

Динамика атмосферы во многом определяется внутренними гравитационными волнами (ВГВ), которые могут быть важным фактором воздействия на ионосферу Земли со стороны нижележащей нейтральной атмосферы. Однако проблема передачи энергии на высоты верхней атмосферы за счет просачивания или трансформации ВГВ до сих пор не решена. Перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) могут быть откликом ионосферы на ВГВ, и хотя они исследуются уже на протяжении нескольких десятилетий, изучение их поведения является актуальным в свете вышеуказанной проблемы.

Существование перемещающихся ионосферных возмущений в ионосфере было установлено в ряде работ австралийских ученых по данным наблюдений со скважностью 1 мин [1–4]. Усредненные данные за несколько лет на фиксированной частоте в Южном полушарии показали, что в сезонном ходе наблюдаются максимумы появления ПИВ летом и зимой, а минимумы в равноденствие [1]. По данным наблюдений на переменной частоте (1–15 МГц) было установлено, что ПИВ появляются не только в области F2, но и в F1, а иногда начинаются в F2, а потом спускаются в F1. Однако возможности аппаратуры

в то время не позволяли получать ионограммы в учащенном режиме и проводить обработку большого объема данных при аналоговой регистрации ионограмм.

В ряде работ [4–7] дана интерпретация серпов с привлечением численного моделирования. Так, в работе [4] авторы показали, что серповидная часть ионограммы обусловлена «боковыми» (т.е. не вертикальными) траекториями. Авторы [8] подтвердили данный вывод, рассмотрев параболическую фоновую модель ионосферы, содержащую при наличии возмущения горизонтальные градиенты электронной концентрации. В работе [9] выполнен статистический анализ ионограмм, полученных на ионозонде вертикального зондирования «Циклон» за 30 зимних дней 2011 г. Авторы рассмотрели «классические» серпы (далее – серпы 1 типа) – «Nose» («Нос») и «U-shaped» (U-образные) согласно [8].

### Статистическая обработка данных радиозондирования

На рис. 1 показано расположение слабонаклонной радиотрассы Усолье-Сибирское – Торы протяженностью 120 км. Географические координаты точек излучения и приема равны соответственно 52°53' с.ш., 103°16' в.д. и 51°48' с.ш., 103°5' в.д.

К анализу привлекались данные за два периода времени: зимний (декабрь 2011 – март 2012 гг.), для которого количество сеансов, регистрируемых через 1 мин, составляет около 94000, и летний (май 2011 – август 2011 гг.) – 122000 сеансов. Для летнего периода имеет место характерное расслоение с наличием F1-слоя, тогда как зимой данное явление отсутствует.

\* Владимир Иванович Куркин (kurkin@iszf.irk.ru); Олег Альбертович Ларюнин (laroleg@inbox.ru); Алексей Витальевич Подлесный (rav1986@rambler.ru); Маргарита Дмитриевна Пежемская (chist@iszf.irk.ru); Лидия Васильевна Чистякова (chist@iszf.irk.ru).



Рис. 1. Схема эксперимента

Перемещающиеся ионосферные возмущения наблюдались в зимний период на более чем 8000 ионограммах, а в летний период на 16740.

Условно все серпы были поделены на пять наиболее часто встречающихся типов.

К первому типу относится большинство случаев, когда имеет место классический серп, который смещается в область меньших групповых задержек и меньших частот (вниз и влево по ионограмме) и исчезает в нижней части слоя. Пример такого случая приведен на ионограммах (рис. 2) за 7 ноября 2011 г. в период 04:08–04:18 UT (11:08–11:18 LT).

Второй тип, более редкий, – серп движется в противоположном направлении (вверх и вправо по ионограмме).

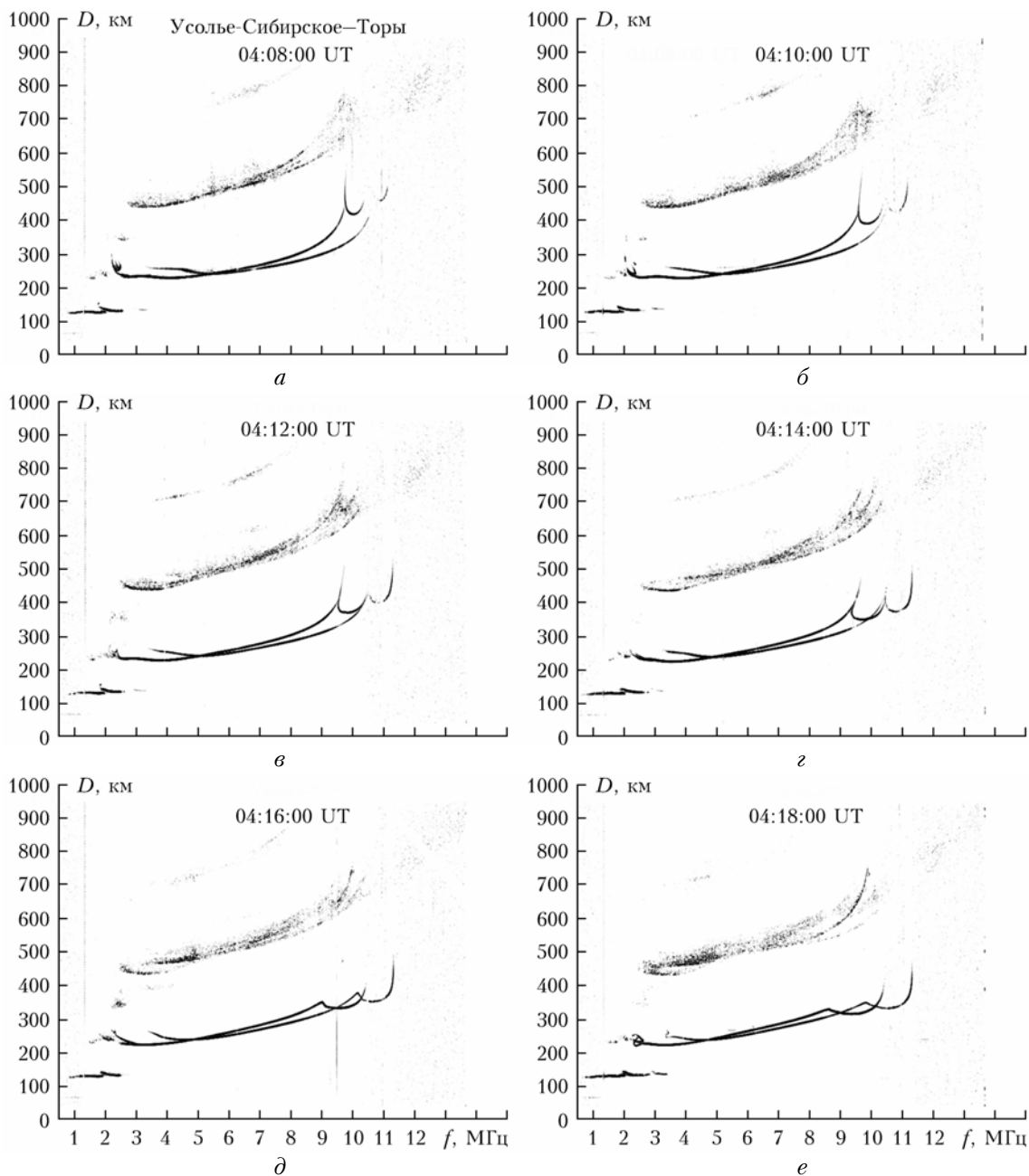


Рис. 2. Эволюция серпа первого типа на ионограммах

К третьему типу отнесены серпы, передвигающиеся сначала сверху вниз, а потом движущиеся вверх [10].

К четвертому типу отнесены сложные случаи, когда наблюдается наложение нескольких серпов, которые движутся как единое целое (рис. 3, а).

К пятому типу ПИВ также относятся случаи сложных ионограмм, когда наблюдается сначала комбинация петель, постепенно спускающихся в нижнюю часть слоя F и образующих дополнительный ярко выраженный трек, который отделяется, поднимается вверх, а затем исчезает (рис. 3, б).

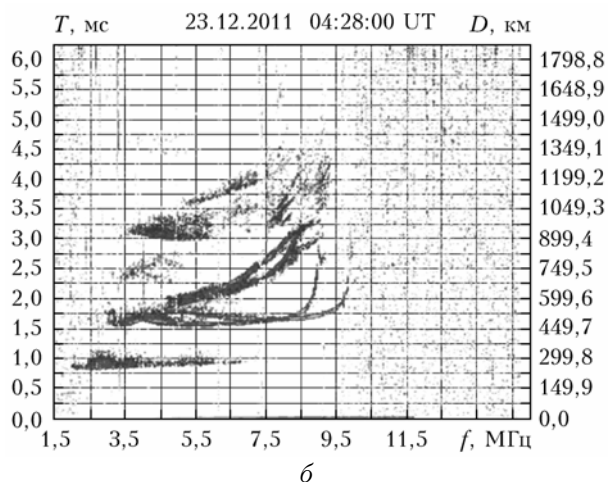
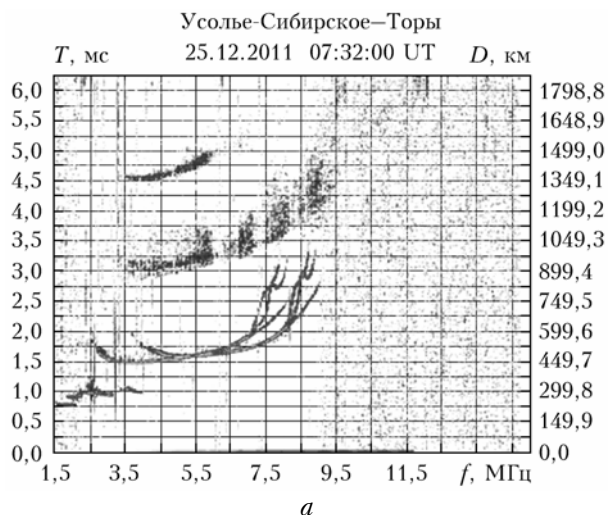


Рис. 3. Ионограммы со сложными серпами

Было выявлено, что серпы первого типа по частотности возникновения являются преобладающими. Так, например, для декабря 2011 г. число их ( $n = 234$ ) относительно общего числа появления ПИВ ( $M = 321$ ) составило 73% (рис. 4).

Рассмотрено число появлений серпов различных типов в зависимости от времени суток. В декабре 2011 г. было 20 дней наблюдения ( $N = 20$ ), в январе, в феврале и марте 2012 г. соответственно 18, 29 и 24. На рис. 5 представлены помесечные зависимости числа появлений  $n$  серпов внутри часовых интервалов, в расчете на 1 сут. Можно видеть, что наи-

большая частотность обнаружения серпа первого типа приходится на окрестность полудня по LT.

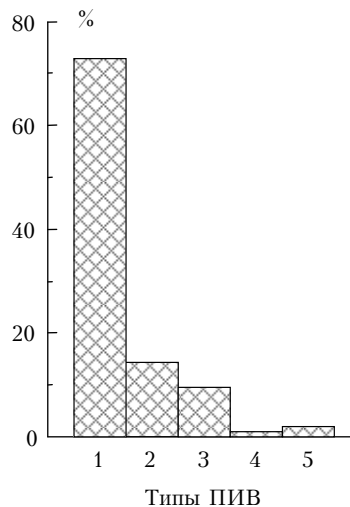


Рис. 4. Число появлений серпов различных типов, декабрь 2011 г.

Представляется целесообразным также рассмотреть время жизни указанных типов серпов (рис. 6 и 7). Выявлено, что для зимнего сезона среднее время жизни серпов первого и второго типов составило 8 мин, третьего – 14 мин, четвертого и пятого – 18 мин.

Для летнего периода первый тип серпов также является доминирующим, серпы сложных типов встречаются довольно редко. Для данного сезона характерно «расслоение» в области F на слои F1 и F2 в дневные часы, и серпы могут появляться в первой области (F2), во второй (F1), а также переходить из одной в другую (F2 + F1) (рис. 8).

На рис. 9 приведен суточный ход относительного числа появлений серпов, усредненный по летнему сезону.

Видно, что серпы появляются чаще в области F2 с максимумом в интервале 03:00–08:00 UT (10:00–15:00 LT), серпы в области F1 наблюдаются значительно реже, максимум их появления 08:00–10:00 UT (5:00–17:00 LT). Серпы, появляющиеся сначала в области F2, а потом спускающиеся в область F1, наблюдаются равномерно в течение всего интервала с 22:00–11:00 UT (05:00–18:00 LT).

На рис. 10 приведен суточный ход времени жизни серпов, усредненного по месяцам летнего сезона 2011 г. для рассмотренных типов. Видно, что время жизни серпов, наблюдаемых отдельно в слое F2 или в слое F1, составляет 10–15 мин. Когда же серпы наблюдаются сначала в слое F2, а потом спускаются в слой F1, то время жизни выше – приблизительно 20–30 мин.

На рис. 11 представлена сводная картина в зимний и летний сезоны для серпов первого типа. Видно, что диапазон времени, в котором наблюдаются серпы, существенно шире для летнего периода, чем для зимнего. Кроме того, относительное число появлений серпов и среднее время жизни для летнего времени примерно вдвое больше, чем для зимнего.

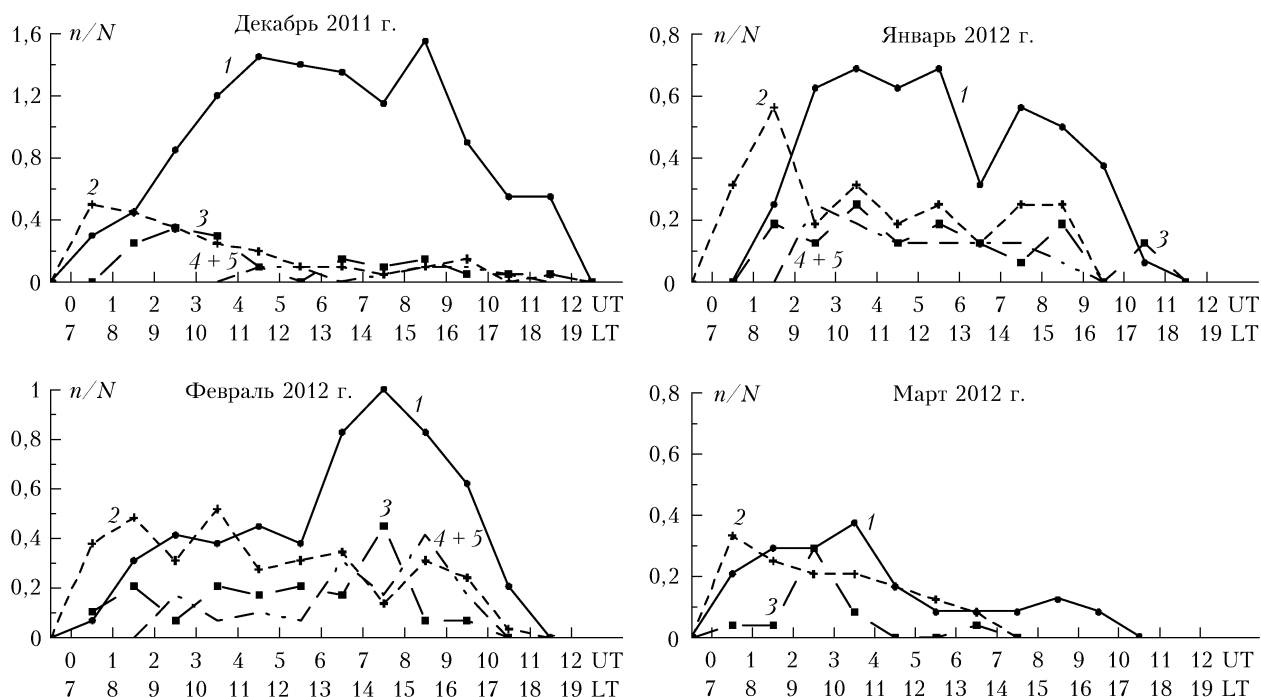


Рис. 5. Относительное число появлений серпов различных типов внутри часовых интервалов в расчете на 1 сут для месяцев зимнего сезона,  $N$  – число дней наблюдения. Кривая 1 – первый тип, 2 – второй, 3 – третий, 4 – сложные типы (четвертый и пятый)

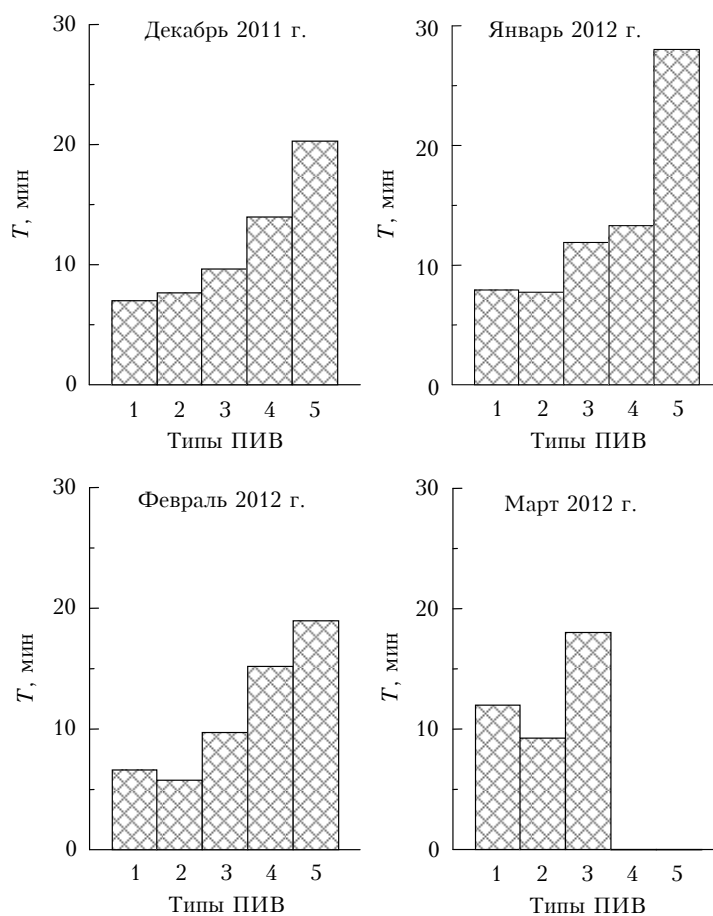


Рис. 6. Среднее время жизни серпов различных типов для месяцев зимнего сезона

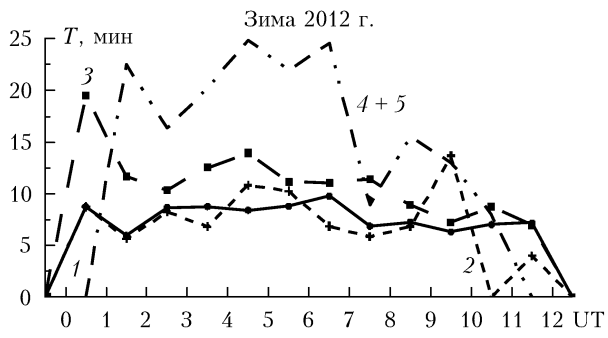


Рис. 7. Среднее время жизни серпов различных типов внутри часовых интервалов, усредненное по месяцам зимнего сезона. Обозначения те же, что и на рис. 5

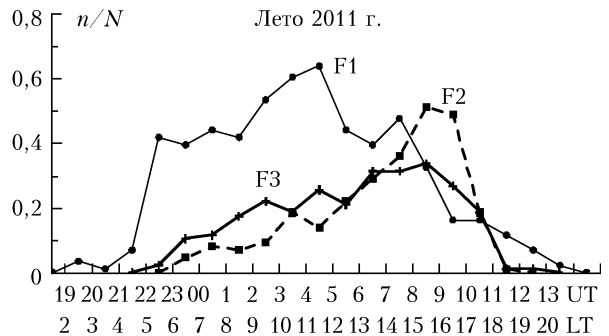


Рис. 9. Относительное число появлений серпов различных типов внутри часовых интервалов, усредненное по месяцам летнего сезона. Кривая 1 – серп в слое F2; 2 – серп в слое F1; 3 – серпы в слое F2 с переходом в слой F1 (F2 + F1)

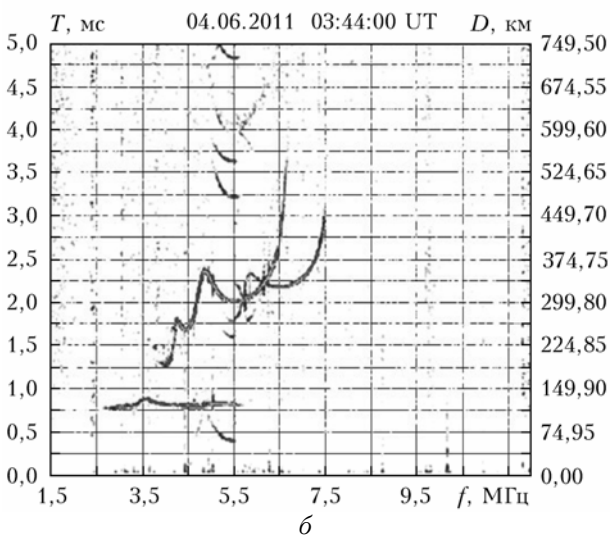
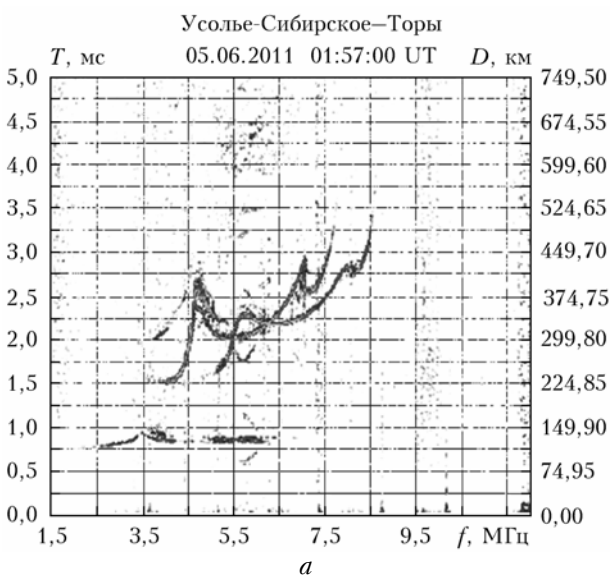


Рис. 8. Серпы на летних ионограммах

Из обработанного массива данных в летнее время 15% ионограмм содержали серпы, тогда как в зимний период серпы имели место в 8% ионограмм.

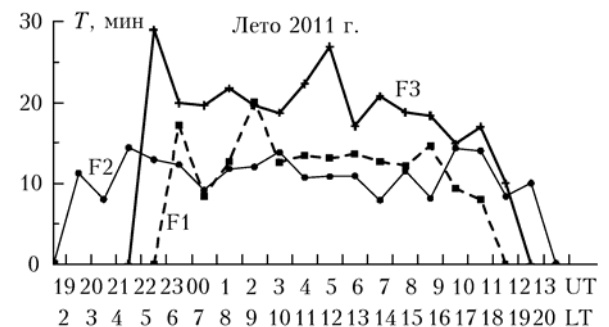


Рис. 10. Среднее время жизни серпов различных типов внутри часовых интервалов, усредненное по месяцам летнего сезона

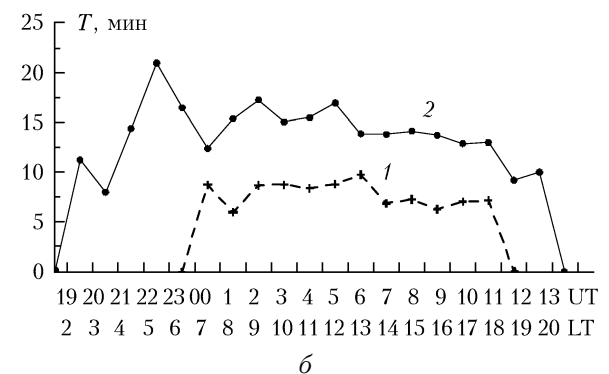
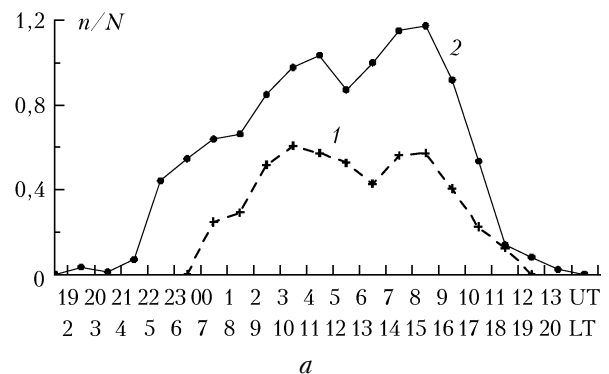


Рис. 11. Относительное число появлений (а) и среднее время жизни (б) серпов первого типа внутри часовых интервалов в расчете на 1 сут, усредненное по месяцам зимнего сезона (кривая 1) и месяцам летнего сезона (2)

Также следует отметить, что свойств периодичности при появлении серпов на ионограммах практически не наблюдалось.

### Заключение

По результатам проведенной обработки данных слабонаклонного зондирования на обширном статистическом материале исследована морфология серпообразных особенностей на ионограммах. Выявлено, что в большинстве случаев серпы на ионограммах смещаются из области высоких частот и больших групповых задержек в сторону уменьшения частоты и групповой задержки (сверху вниз и справа налево вдоль основного трека ионограммы). Наблюдались также случаи движения серпа в противоположном направлении, а также смены направления движения, однако такие случаи были довольно редки. Была исследована зависимость среднего числа появлений и времени жизни серпов от времени суток. Обнаружено, что во время летнего сезона ночной интервал времени, в течение которого серпы отсутствуют, меньше, чем соответствующий интервал в зимний сезон. Выявлено, что серповидные особенности на ионограммах — явление довольно частое: согласно статистике порядка 10% исследованных ионограмм содержали серпы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-05-00892-а.

1. *Munro G.H.* Travelling ionospheric disturbances in the F region // *Austral. J. Phys.* 1958. V. 11, N 1. P. 91–112.
2. *Munro G.H.* Travelling disturbances in the ionosphere // *Proc. Roy. Soc. Lond. A.* 1950. V. 202, N 2. P. 208–223.
3. *Heisler L.H.* Anomalies in ionozonde records due to travelling ionospheric disturbances // *Austral. J. Phys.* 1958. V. 11, N 1. P. 79–90.
4. *Munro G.H., Heisler L.H.* Cusp type anomalies in variable frequency ionospheric records // *Austral. J. Phys.* 1956. V. 9, N 3. P. 343–358.
5. *Cooper J., Cumtack C.H.* The analysis of travelling ionospheric disturbance with nonlinear ionospheric response // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1986. V. 48, N 1. P. 61–64.
6. *Крашенинников И.В., Лянной Б.Е.* Об интерпретации одного вида перемещающегося ионосферного возмущения по ионограммам вертикального радиозондирования // *Геоманет. и аэрном.* 1991. Т. 31, № 3. С. 427–433.
7. *Калихман А.Д.* Перемещающиеся ионосферные возмущения в среднеширотной ионосфере: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Иркутск: ИрГТУ, 2000. 253 с.
8. *Lobb R.J., Titheridge J.E.* The effects of travelling ionospheric disturbances on ionograms // *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1977. V. 39, N 2. P. 129–138.
9. *Akchurin A.D., Bochkarev V.V., Ildiryakov V.R., Usupov K.M.* TID selection and research of its characteristics on ionograms // 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium. Istanbul, 2011. GP1.23.
10. *Harris T., Cervera M.* Investigations into small-scale disturbances in the ionosphere using SPICE // *Proc. XXX General Assembly URSI. Istanbul*, 2011.

*V.I. Kurkin, O.A. Laryunin, A.V. Podlesnyi, M.D. Pezhemskaya, L.V. Chistyakova.* **The study of morphological characteristics of travelling ionospheric disturbances using quasi-vertical ionospheric sounding data.**

A morphological analysis of quasi-vertical sounding ionograms has been conducted in this paper. Some ionograms contain an additional trace (called “cusp”) apart from the main trace, which is an indicator of travelling ionospheric disturbances presence. The cusp occurrence rate, depending on the time of the day, their average duration and morphological characteristics have been studied for winter and summer time. The every minute ionosonde recording of ionograms allowed one to trace the dynamics and the evolution of cusps. The use of extensive data archive allowed the display of high cups occurrence rate and seasonal cusps occurrence characteristics.