

**СУТОЧНО-СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ
ПО ДАННЫМ ИРКУТСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

С.С. Алсаткин, А.В. Медведев, К.Г. Ратовский

**DAILY-SEASONAL VARIATIONS OF ELECTRONIC CONCENTRATION
IN THE EXTERNAL IONOSPHERE FROM
IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR DATA**

S.S. Alsatkin, A.V. Medvedev, K.G. Ratovsky

В статье приводятся результаты исследования суточно-сезонных вариаций электронной концентрации для внешней ионосферы, на основе данных Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР), для четырех сезонов и двух уровней солнечной активности (низкая и умеренная).

We present the research results for daily-seasonal variations of electronic concentration in the external ionosphere on the base of Irkutsk Incoherent Scatter Radar (IIRS) data, for four seasons and two levels of solar activity (low and moderate).

Введение

Ионосфера является областью ионизированной атмосферы, расположенной выше 60 км, где концентрация электронов такова, что начинает влиять на распространение радиоволн. Ионизация атмосферы, происходит вследствие солнечного ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Ионизированные частицы ионосферной плазмы подвергаются многочисленным процессам, включая химические реакции и различным переносам из-за нейтрального ветра, электрических и магнитных полей, и т. д. Тесная связь ионосферы, как с магнитосферой, так и с термосферой, приводит к значительным изменениям ее параметров в суточном, сезонном и солнечном цикле.

Исследование ионосферы является актуальной задачей, так как позволяет решать фундаментальные и прикладные задачи, такие как совершенствование и уточнение существующих моделей ионосферы и апробация вновь создаваемых моделей, расчет ионосферных поправок при расчете радиолокационной дальности до космических объектов, и т. д.

Наиболее исследованной является часть ионосферы до высоты максимума электронной концентрации, за счет обширной сети ионозондов. В отличие от ионозонда радары некогерентного рассеяния (НР) способны измерять электронную концентрацию вплоть до высоты ~1000 км. Метод НР до сих пор остается наиболее совершенным наземным средством диагностики верхней атмосферы. В настоящее время в мире действуют 10 радаров НР, каждый из которых уникален по своей конструкции и методикам диагностики. В их число входит единственный в России Иркутский радар некогерентного рассеяния.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию особенностей поведения параметров (электронная концентрация, ионная и электронная температуры) ионосферной плазмы в зависимости от сезона и солнечной активности на основе длительных непрерывных наблюдений на основе радаров НР. Исследования позволяют совершенствовать как региональные модели поведения ионосферной плазмы, так и глобальные, что позволит в будущем с большой точностью предсказывать состоя-

ние ионосферы в зависимости от сезона, солнечной активности и географического местоположения.

В данной статье, представлены результаты морфологического исследования особенностей поведения электронной концентрации (N_e) для различных сезонов (лето, осень, зима и весна) и двух уровней солнечной активности (низкая умеренная) по данным ИРНР.

Методика восстановления профиля электронной концентрации

ИРНР имеет одну линейную поляризацию, как на излучении, так и на приеме, что отличает его от других специализированных радаров, излучающих и принимающих волну с круговой поляризацией. При распространении высокочастотной электромагнитной, линейно поляризованной волны в магнитоактивной плазме, вследствие эффекта Фарадея [Дэвис, 1973], происходит вращение ее вектора поляризации. Вследствие чего, на радиолокационной развертке наблюдаются замирания сигнала, когда вектор поляризации принимаемого электромагнитного поля ортогонален поляризации антенны. Данный эффект необходимо учитывать при восстановлении высотного профиля N_e . В институте солнечно-земной физики был разработан оригинальный метод [Shrynev, 2004] восстановления высотного профиля N_e , по наблюдаемому профилю Фарадеевских замираний. Разработанный метод, учитывающий особенность радара имеет ряд недостатков и основным из них является необходимость при восстановлении электронной концентрации осуществлять операцию дифференцирования фазы замираний. Эта операция неустойчива в условиях низкого отношения сигнал-шум и вызывает серьезные погрешности при обработке данных. Наибольшая погрешность проявляется в период низкой солнечной активности, особенно на высотах выше максимума ионизации, когда наблюдается минимальное значение N_e , и как следствие низкое соотношение сигнал/шум. Следствием недостатков описанного метода стала невозможность полной автоматизации процесса построения профилей N_e .

Периоды длительных непрерывных измерений на ИРНР.
Значения $F10.7$ и A_p соответствуют средним значениям индексов за период измерений

Низкая солнечная активность				Умеренная солнечная активность			
Сезон	Период	$F10.7$	A_p	Сезон	Период	$F10.7$	A_p
зима	16.01–05.02.2011	80	5.94	зима	01.01–12.01.2014	180	7.2
лето	05.06–04.06.2007	74	6.5	лето	22.06–01.07.2013 28.07–01.07.2014	132	12.5
весна	01.04–12.04.2009	70	5.2	весна	05.04–22.04.2012	110	8.1
осень	22.09–25.09 27.09–30.09.2008	68	7.5	осень	15.10–30.10.2014	180	11

Для устранения выше перечисленных недостатков, был разработан новый алгоритм, в основе которого лежит слой Чепмена [Дэвис, 1973].

Модельный профиль представляет собой профиль слоя Чепмена с различными толщинами выше и ниже высоты максимума:

$$N_e(z) = N_m F2 \exp(1 - x - \exp(-x)),$$

$$x = (z - h_m F2) / H_B,$$

при $z < h_m F2$, и

$$x = (z - h_m F2) / H_T,$$

при $z \geq h_m F2$, где z – высота, $N_m F2$ – максимум электронной концентрации, $h_m F2$ – высота максимума, H_B – толщина внутренней ионосферы (ниже $h_m F2$) и H_T – толщина внешней (выше $h_m F2$).

На рис. 1 изображен модельный профиль электронной концентрации с указанием его четырех параметров.

Для каждого высотного профиля $N_e(z)$ из созданного множества, определяется соответствующий ему профиль Фарадеевских замираний описываемый выражением:

$$P_0(z) = \frac{N_e(z)}{z^2} \cos^2 \left(\alpha \int_0^z N_e(z') dz' \right).$$

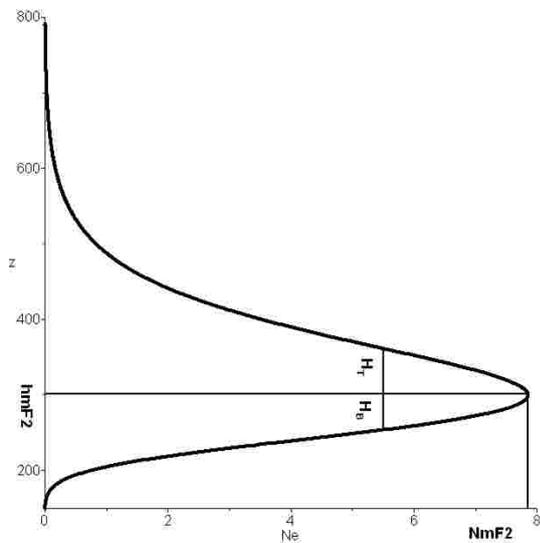


Рис. 1. Высотный профиль электронной концентрации, описываемый слоем Чепмена с различными толщинами выше и ниже высоты максимума.

Затем, каждый полученный профиль Фарадеевских замираний сравнивается с измеренным профилем, чтобы найти наиболее точно повторяющий его по форме. Определив подходящий профиль Фарадеевских замираний, мы автоматически определяем и все необходимые параметры соответствующего ему высотного профиля $N_e(z)$. Данным алгоритмом обработан большой массив данных полученных на ИРНР с 2007 г.

Анализ полученных данных

В таблице показаны периоды длительных непрерывных измерений, на основе которых рассчитаны усредненные суточные вариации для четырех сезонов и двух уровней солнечной активности (низкая и умеренная).

На рис. 2–5, представлены результаты для всех 4 сезонов. На каждом рисунке левая колонка соответствует низкой солнечной активности, правая – умеренной. Первая панель – представляет суточные-высотные вариации логарифма усредненного N_e , вторая панель – суточные вариации N_e на трех высотах (200, 300 и 400 км);

На рис. 2 представлены данные для зимнего сезона. Зимой, в низкую солнечную активность на высотах выше 350 км самая высокая электронная концентрация наблюдается ночью. На высотах 280–350 км наблюдаются два локальных максимума N_e : ночной и дневной, дневной пик в ~1.5 раза больше ночного. Для умеренной солнечной активности на высотах 280–350 км преобладает дневной максимум N_e , который в ~3.5 раза больше ночного. На высотах выше 380 км ночной и дневной максимумы ионизации становятся сопоставимыми. Необходимо отметить, что появление ночного максимума в зимнее время также наблюдается в суточных вариациях максимума электронной концентрации $N_m F2$ [Ratovsky, 2011].

На рис. 3 представлены данные для летнего сезона.

Как при низкой, так и при умеренной солнечной активности в суточных вариациях N_e начиная с высоты ~280 км наблюдается вечерний максимум. В ночное время с 0 LT до 4 LT происходит падение N_e , после 4 LT идет рост N_e . Наибольшие отличия между вечерними и полуденными значениями N_e наблюдаются на высоте 300 км, отношение вечерних и полуденных значений составляет 1.6 при низкой солнечной активности и 1.4 при умеренной. При умеренной солнечной активности имеет место интересная особенность во времени появления вечернего максимума N_e : сначала максимум появляется

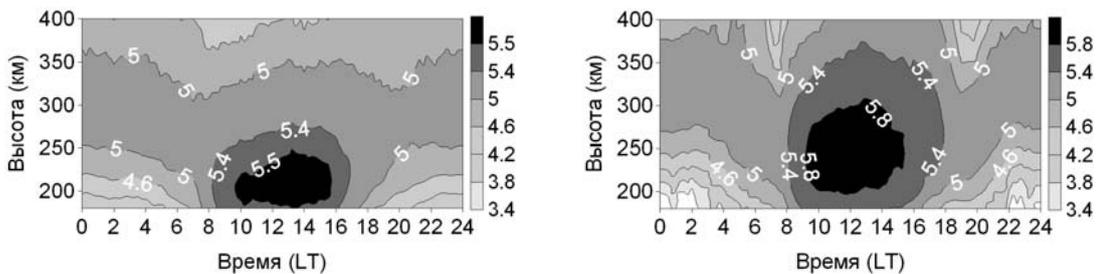


Рис. 2. Суточные вариации для зимнего сезона. Левая колонка соответствует низкой солнечной активности, правая – умеренной. Первая панель – представляет суточно-высотные вариации логарифма усредненного N_e , вторая панель – суточные вариации N_e на трех высотах (200, 300 и 400 км).

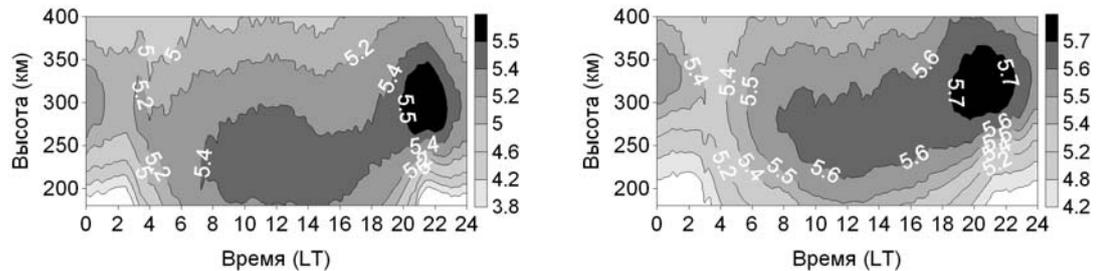


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но для летнего сезона.

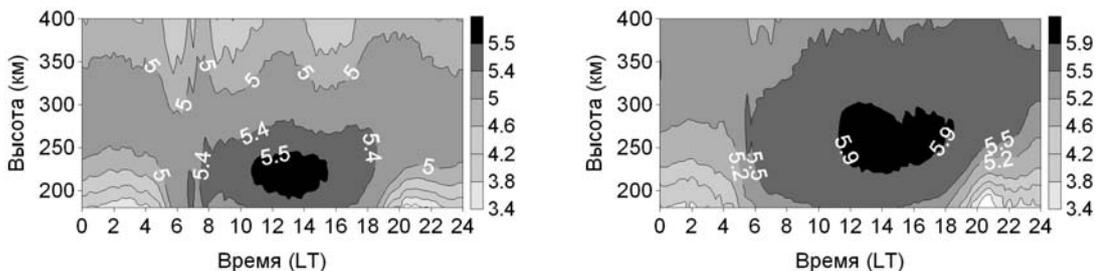


Рис. 4. То же, что и на рис. 2, но для весеннего сезона.

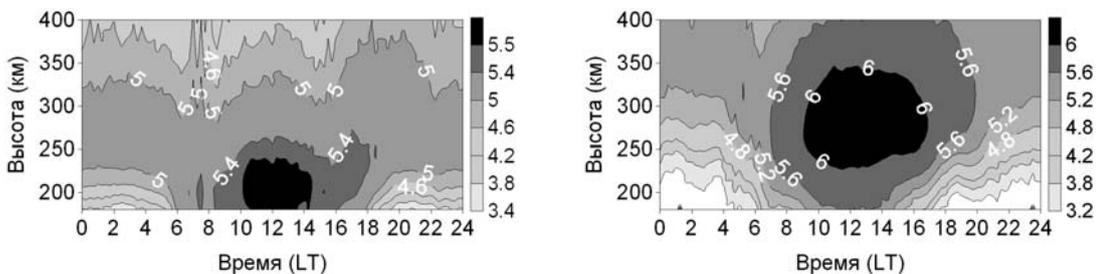


Рис. 5. То же, что и на рис. 2, но для осеннего сезона.

на больших высотах, а затем на меньших. Время, за которое максимум перемещается с высоты 400 км до 300 км, составляет ~30 мин. При низкой солнечной активности данная особенность выражена не так ярко. Необходимо отметить, что явление летнего вечернего максимума также наблюдается в суточных вариациях максимума электронной концентрации N_mF2 [Ratovsky, 2011].

На рис. 4 представлены данные для весеннего сезона. Наиболее интересные суточные вариации N_e наблюдаются при низкой солнечной активности на высотах выше 280 км, в суточном ходе видны четыре максимума: ночной, утренний, дневной и вечерний. При умеренной солнечной активности такой многопиковой структуры суточного хода не наблюдается, на высоте 300 км доминирует дневной максимум, а на высоте 400 км – вечерний.

На рис. 5 представлены данные для осеннего сезона. Суточные вариации N_e в осенний период во многом схожи с ранее описанными суточными вариациями в весенний период. Основные отличия заключаются в том, что осенью при низкой солнечной активности на высотах выше 280 км наблюдается не четыре, а три максимума (ночной, дневной и вечерний); а при умеренной солнечной активности на всех высотах доминирует дневной максимум.

Выводы

На основе длительных непрерывных измерений на ИРНР выявлены основные особенности суточного поведения электронной концентрации для диапазона высот 200–400 км для четырех сезонов и двух уровней солнечной активности (низкая и умеренная).

На высотах ниже 250 км суточный ход электронной концентрации имеет простую форму с максимумом в дневное время и минимумом в ночное, такой суточный согласуется с вариациями косинуса зенитного угла Солнца.

Наиболее интересные особенности были обнаружены на высотах выше 280 км.

В зимний период при низкой солнечной активности в ночное время наблюдается ночной максимум, при этом на высотах выше 350 км ночной максимум превалирует над дневным. При умеренной солнечной активности ночной максимум тоже наблюдается, но ночные значения N_e намного меньше дневных.

В летний период как при низкой так и при умеренной солнечной активности в суточном ходе превалирует вечерний максимум, при этом наибольшие отличия между вечерними и полуденными значениями N_e наблюдаются на высоте 300 км, отношение вечерних и полуденных значений составляет 1.6 при низкой солнечной активности и 1.4 при умеренной.

В весенний период при низкой солнечной активности в суточном ходе видны четыре максимума: ночной, утренний, дневной и вечерний. При умеренной солнечной активности такой многопиковой

структуры суточного хода не наблюдается, на высоте 300 км доминирует дневной максимум, а на высоте 400 км – вечерний.

Суточные вариации N_e в осенний период во многом схожи с суточными вариациями в весенний период. Основные отличия заключаются в том, что осенью при низкой солнечной активности наблюдается не четыре, а три максимума (ночной, дневной и вечерний); а при умеренной солнечной активности на всех высотах доминирует дневной максимум.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 14-05-31177.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973.

Ratovsky K.G., Oinats A.V. Local empirical model of ionospheric plasma density derived from Digisonde measurements at Irkutsk // *Earth Planets Space*. 2011. V. 63, N. 4. P. 351–357.

Shpynev, B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization // *Radio Sci.* 2004. V. 39. RS3001, doi: 10.1029/2001RS002523.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия