Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 213–216.

УДК 537.86
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-213

ВАРИАЦИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ВЕТРА ВБЛИЗИ ОБРАЗОВАНИЯ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ Es

Е.А. Воронова, К.Г. Ратовский

Институт солнечно земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, vreaj@mail.ru

VARIATIONS IN NEUTRAL WIND NEAR THE FORMATION OF THE SPORADIC Es LAYER

E.A. Voronova, C.G. Ratovsky

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, vreaj@mail.ru

Аннотация. В работе исследовалась применимость значений скорости горизонтального нейтрального ветра модели HWM14 вблизи высоты образования спорадического слоя Es. Используя эти модельные значения скорости, оценивались высоты узлов конвергенции Es на основе теории ветрового сдвига и сопоставлялись с высотами спорадического слоя (hEs), полученными на основе данных Иркутского ионозонда DPS-4 (52.3 N ,104.3 E) за 2023 г. Наилучшее согласование высоты узлов конвергенции и hEs наблюдалось для летних и весенних месяцев.

Ключевые слова: ионосфера, спорадический слой Es, модель HWM14, ионозонд DPS-4

Abstract. The applicability of the HWM14 horizontal neutral wind velocity values near the formation of the sporadic Es layer was investigated. Using these model velocity values, the heights of the convergence nodes Es were estimated based on wind shear theory and were compared with the layer heights (hEs) based on data obtained from the Irkutsk DPS-4 ionosonde (52.3 N, 104.3 E) in 2023. The best agreement between these heights was observed in summer and spring.

Keywords: ionosphere, sporadic Es layer, HWM14 model, DPS-4 ionosonde

ВВЕДЕНИЕ

Спорадический слой Es представляет собой тонкий слой плазмы металлических ионов, формируемый на высотах E-слоя от 90 до 130 км. Общепринятой концепцией формирования слоя Es является механизм ветрового сдвига [Haldoupis, 2011]. Механизм ветрового сдвига требует такого распределения нейтрального ветра, который обеспечивает вертикальную конвергенцию ионов. Для зонального ветра (V) ветер сверху должен быть направлен на запад, а ветер снизу – на восток, такое сочетание благодаря силе Лоренца обеспечивают накапливание ионов и образование Es на высоте, где V=0. В случае меридионального ветра (U) для северного полушария ветер сверху должен быть направлен на юг, а ветер снизу – на север, такое сочетание в результате движения ионов вдоль силовых линий магнитного поля обеспечивают накапливание ионов и образование Es на высоте, где U =0.

Таким образом, высота нулевой скорости нейтрального ветра при необходимом сочетании ветров снизу и сверху (высота узла конвергенции) является высотой образования спорадического слоя Es. Данная работа посвящена проверке применимости эмпирической модели горизонтального нейтрального ветра HWM14 [Drob et al., 2015] для расчета высот узлов конвергенции путем сравнения этих высот и hEs.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные иркутского ионозонда вертикального зондирования DPS-4 (52.3° N, 104.3° E) с временным разрешением 15 мин за 2003-2023 годы. В качестве характеристик спорадического слоя были выбраны высота (hEs) и вероятность наблюдения (PEs). Для каждого момента местного времени рассчитывались среднемесячные значения hEs. Значения PEs рассчитывались как отношения количества наблюдений Es в заданной ячейке высоты в 1 км к полному количеству измерений за 2003-2023 гг. для данного месяца и местного времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью модели HWM14 для 15-го числа каждого месяца были рассчитаны высотно-временные профили зонального и меридионального ветра. По этим данным для каждого месяца были рассчитаны суточные хода высот узлов конвергенции, которые сопоставлялись с соответствующими суточными ходами высоты спорадического слоя. На рис. 1 представлены эти данные.

Из рис. 1 видно, что наилучшее согласование высот узлов конвергенции и спорадического слоя наблюдается для летних и весенних месяцев. Причем меридиональный ветер хорошо согласуется только с первой областью опускания высоты, а зональный ветер – и с первой, и со второй. Хорошее согласование ночью от 00 до 04 LT наблюдается для февраля, апреля-июня, сентября и октября. Зона роста усредненной высоты Es плохо согласуется для всех месяцев.

В таблице 1 представлены результаты количественного сравнения высот узлов конвергенции и спорадического слоя в терминах среднего смещения (μ) и корня из среднеквадратичной ошибки (σ) путем усреднения за суточный интервал, имеющих следующий вид:

$$\mu(v) = \sum \frac{hEs - h(v=0)}{n},$$

$$\sigma(v) = \sqrt{\sum \frac{(hEs - h(v=0))^2}{n}}$$

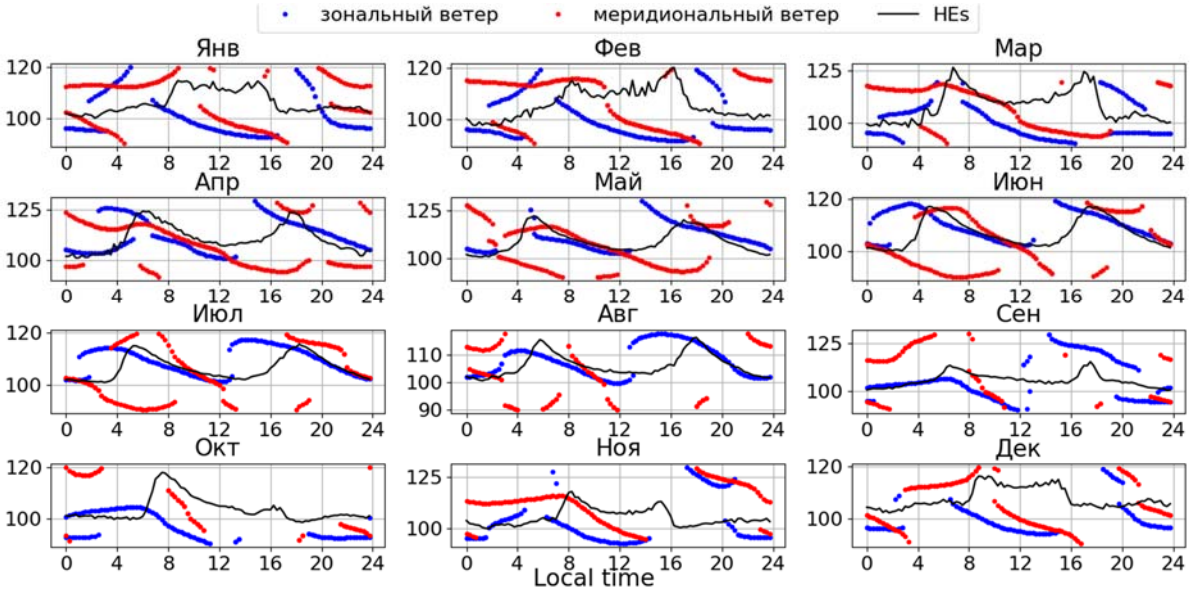

Рис 1. Суточные вариации высоты спорадического слоя hEs (черным цветом) за 2003-2023 гг., высот узлов конвергенции для зонального ветра (синий цвет) и высот узлов конвергенции для меридионального ветра (красный цвет) для всех месяцев 2023 г.

Таблица 1. Среднесуточные значения μ(V), σ(V), μ(U) и, σ(U) для зонального и меридионального ветра, соответственно.

месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
μ(V)	6.4	7.7	5.8	0.2	-1.7	-2.1	-2.4	-1.7	-0.7	6.2	3.2	8.8
σ(V)	11.9	12.8	11.9	6.3	6.8	6.2	6.5	5.6	10.2	10.1	13.0	12.5
μ(U)	1.8	-0.4	2.0	2.3	-0.4	-0.8	0.8	3.9	-1.7	0.3	-6.0	2.7
σ(U)	9.3	12.1	14.2	8.7	11.2	4.3	7.9	11.8	13.8	10.7	13.0	10.1

Из таблицы 1 видно, что наименьшие значения σ(V), μ(V) наблюдаются летом и весной, когда наблюдается наилучшее соответствию hEs и высот узлов конвергенции для зонального ветра. Для μ(U) и σ(U) нельзя выделить какую-то тенденцию, кроме того, что наименьшее значение σ(U) наблюдается в июне и соответствует хорошему соответствию hEs и высот узлов конвергенции для меридионального ветра.

Наилучшее согласие для весны и лета наблюдается примерно в 04-12 LT и 16-24 LT для зонального ветра и в 04-12 LT для меридионального ветра. В таблице 2 и 4 представлены значения μ и σ с апреля по август для интервалов времени 6-12 LT и 18-24 LT, соответственно. Сравнивая σ(V), μ(V) и σ(U), μ(U) на интервалах 06-12 LT, видно, что hEs лучше согласуется с высотой узлов конвергенции для меридионального ветра в апреле и мае и для зонального ветра в июне-августе. Сравнивая σ(V), μ(V) и σ(U), μ(U) на интервалах 18-24 LT, видно, что hEs лучше согласуется с высотой узлов конвергенции для зонального ветра лучше, чем для меридионального ветра.

Среднеквадратичная ошибка для зонального ветра для лета ниже при рассмотрении интервалов времени 6-12 LT и 18-24 LT, чем при рассмотрении всего дня (таб. 3 и таб. 5). Среднеквадратичная ошибка падает как минимум в 1.7 раз и как максимум в 5.91 раз. Среднеквадратичная ошибка для меридионального ветра ниже для апреля-июня в 06-12 LT и для июля в 18-24 LT, чем при рассмотрении всего дня. Среднеквадратичная ошибка падает как минимум в 1.48 раз и как максимум в 7 раз.

Таблица 2. Значения μ(V), σ(V), μ(U) и, σ(U) на интервалах 06-12 LT для зонального ветра и меридионального ветра, соответственно.

месяцы	4	5	6	7	8
μ(V)	6.8	2.9	1.7	2.0	3.1
σ(V)	6.9	3.3	2.1	2.2	3.2
μ(U)	3.9	-0.8	-1.9	3.1	7.9
σ(U)	4.1	1.6	2.9	10.6	11.8

Таблица 3. Отношение значений μ(V), σ(V), μ(U) и, σ(U) за весь день и значений μ(V), σ(V), μ(U) и, σ(U) на интервалах 06-12 LT.

месяцы	4	5	6	7	8
μ(V)/ μ(V)	0.03	-0.59	-1.24	-1.2	-0.55
σ(V)/ σ(V)	0.91	2.06	2.95	2.95	1.75
μ(U)/ μ(U)	0.59	0.5	0.42	0.26	0.49
σ(U)/ σ(U)	2.12	7.0	1.48	0.75	1.0

Таблица 4. Значения μ(V), σ(V), μ(U) и, σ(U) на интервалах 18-24 LT для зонального ветра и меридионального ветра, соответственно.

месяцы	4	5	6	7	8
μ(V)	-2.4	-2.4	-0.5	0.8	0.1
σ(V)	3.7	3.4	1.7	1.1	1.0
μ(U)	3.8	-7.6	-3.9	-3.4	-1.1
σ(U)	8.1	11.7	5.1	4.3	16.2

Таблица 5. Отношение значений μ(V), σ(V), μ(U) и, σ(U) за весь день и значений μ(V), σ(V), μ(U) и, σ(U) на интервалах 18-24 LT.

месяцы	4	5	6	7	8
μ(V)/ μ(V)	-0.08	0.71	4.2	-3.0	-17.0
σ(V)/ σ(V)	1.7	2.0	3.65	5.91	5.6
μ(U)/ μ(U)	0.61	0.05	0.21	-0.24	-3.55
σ(U)/ σ(U)	1.07	0.96	0.84	1.84	0.73

На рис. 2 показана вероятность наблюдения Es, как функции высоты и локального времени для конкретного месяца за 2003-2023 гг. Только зональный ветер хорошо прописывает опускание второго спорадического слоя Es. По максимуму вероятности Es проходят зональный и меридиональный ветры с мая по август, только меридиональный ветер для ноября. Рядом с максимумом вероятности Es проходят зональный и меридиональный ветры для марта и апреля, только меридиональный ветер для сентября и октября.

Механизм зонального сдвига ветра наиболее эффективен для низких высот. Поэтому для летних месяцев вполне ожидаемо видеть то, что высоты узлов конвергенции зонального ветра проходят по максимуму вероятности наблюдения PEs и что максимум вероятности заканчивается там, где прекращает опускаться высоты узлов конвергенции зонального ветра. Ниже Es наблюдается с меньшей вероятностью вместе с опусканием высот узлов конвергенции меридионального ветра, что также можно связать с низкой эффективностью меридионального ветра для низких высот. Однако вразрез этим рассуждениям в октябре и ноябре именно высоты узлов конвергенции меридионального ветра хорошо прописывают опускание высоты Es, а не высоты узлов конвергенции зонального ветра. Для более точного представления об эффективности меридионального и зонального ветров, необходимо исследовать отношение частоты столкновения между ионами и нейтралами к гирочастоте.

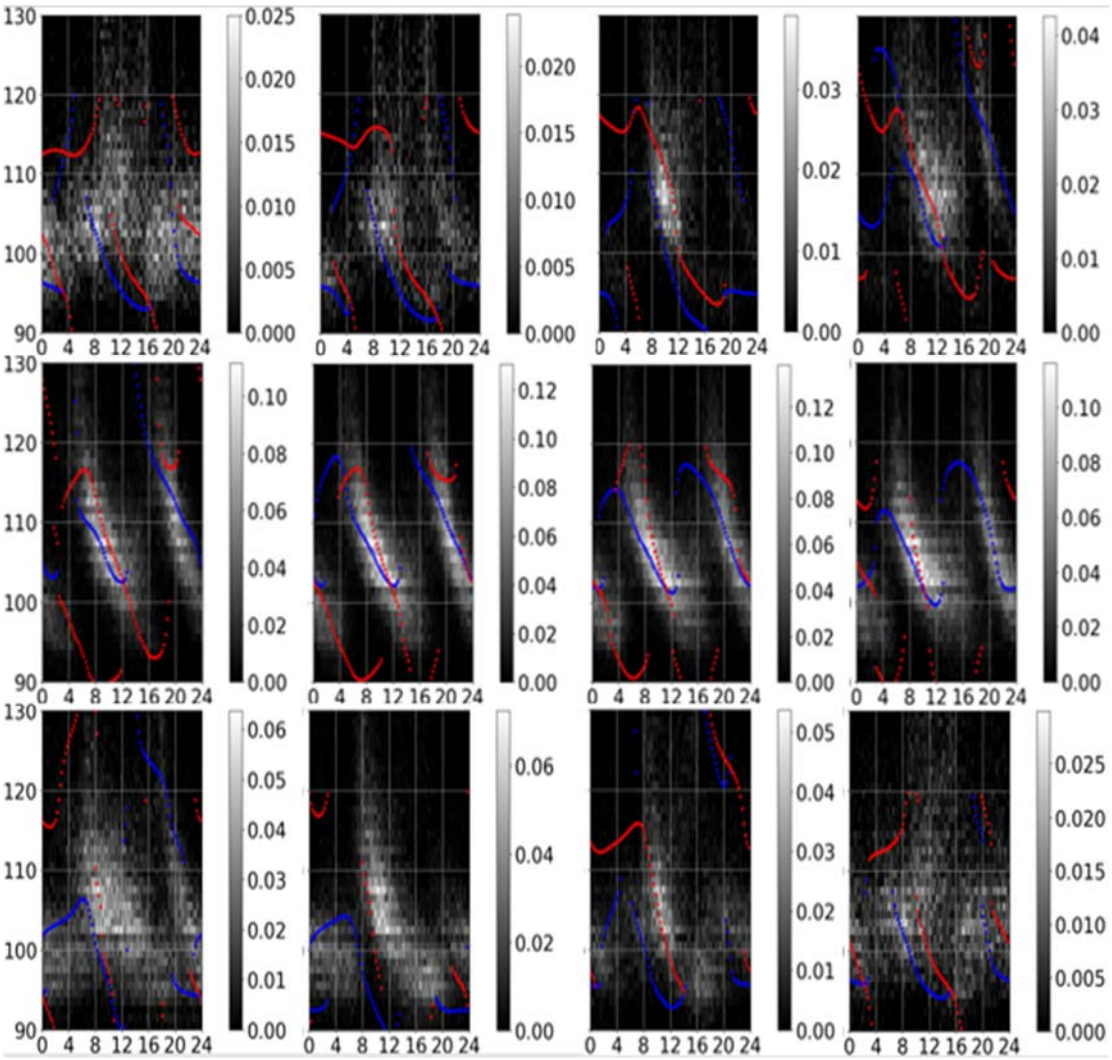

Рис 2. Цветом колорбара показана вероятность наблюдения PEs для заданной ячейки высоты в 1 км, местного времени LT=UT+7 для конкретного месяца за 2003-2023 гг. Суточные вариации высот узлов конвергенции для зонального ветра (синий цвет) и высот узлов конвергенции для меридионального ветра (красный цвет), соответствующие 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Значения высот узлов конвергенции горизонтального нейтрального ветра по модели HWM14 лучше согласуются с высотами образования спорадического слоя Es для летних и весенних месяцев. Для меридионального ветра согласие наблюдается для первой области опускания высоты Es, а для зонального ветра – и для первой, и для второй области опускания высоты Es.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 25-17-00187 (https://rscf.ru/project/25-17-00187/). Работы по проведению наблюдений и первичной обработке данных выполнены при поддержке Минобрнауки России (проект FWZZ-2026-0051). Результаты получены частично с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара" (ИСЗФ СО РАН) (http://ckp-rf.ru/ckp/3056/).

Авторы выражают благодарность Информационно-аналитической системе ИСЗФ СО РАН и Центру скоординированного моделирования (Community Coordinated Modeling Center) за возможность использования модели HWM14 для расчетов нейтрального ветра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Drob D.P., Emmert J.T., Meriwether J.W., et al. An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere // Earth and Space Sci. 2015. V. 2. P. 301–319. DOI: 10.1002/2014EA000089.

Haldoupis C.A Tutorial Review on Sporadic E Layers. Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere // New York: Springer. 2011. P. 381-389.