

УДК: 550.338.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.221-224

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ ES В ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Е.А. Воронова, К.Г. Ратовский

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Лермонтова, 126а

E-mail: voronova_ea@iszf.irk.ru; ratovsky@iszf.irk.ru.

Аннотация. Данная работа направлена на изучение межгодовых вариаций параметров спорадического слоя Es на основе данных иркутского ионозонда DPS-4 (52.3 N, 104.3 E) за 2003–2023 гг. Исследование реализовано на основе расчетов коэффициентов корреляции между уровнем солнечной активности (F10.7) и параметрами Es. В результате исследования обнаружено, что при интегральной оценке параметров Es по критической частоте foEs коэффициенты корреляции либо близки к нулю, либо отрицательные. Однако при дифференциальной оценке параметров Es получены достаточно большие коэффициенты (как положительные, так и отрицательные) для определенных интервалов foEs. Результаты дифференциальной оценки проинтерпретированы на основе трех факторов влияния солнечной активности: (1) возрастание photoионизации; (2) ослабление зональной составляющей преобладающего ветра (3) увеличение поглощения радиоволн в нижележащих слоях ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера; спорадический слой ионосферы; солнечная активность; коэффициенты корреляции.

Variations of the parameters of the sporadic Es layer in solar activity cycles

E.A. Voronova, K.G. Ratovsky

Abstract. This work is aimed at studying year-to-year variations of the sporadic Es layer parameters based on the data of the Irkutsk ionosonde DPS-4 (52.3 N, 104.3 E) for 2003–2023. The study is implemented on the basis of calculations of the correlation coefficients between the solar activity level (F10.7) and the Es parameters. As a result of the study, we found that the correlation coefficients are either close to zero or negative for the integral estimate of the Es parameters by the critical frequency foEs. However, for the differential estimate of the Es parameters, quite large coefficients (both positive and negative) were obtained for certain foEs intervals. The results of the differential estimate are interpreted on the basis of three influencing factors of solar activity: (1) increase in photoionization; (2) weakening of the zonal component of the prevailing wind; (3) increase in the absorption of radio waves in the underlying layers of the ionosphere.

Keywords: ionosphere; sporadic ionosphere; solar activity; correlation coefficients.

Введение

Спорадический слой Es представляет собой тонкий слой плазмы из металлических и молекулярных ионов, формируемый на высотах Е слоя от 90 до 130 км. Иногда Es становится более плотным, чем обычный Е слой или даже более плотным чем основной слой F2. В таких случаях слой Es значительно влияет на распространение радиосигналов и на ионограммы ионозондов в F области.

Молекулярные ионы (O_2^+ и NO^+) и долгоживущие металлические ионы (Fe^+ и Mg^+) являются двумя основными элементами спорадического слоя. Молекулярные ионы ионизируются излучением солнца, поэтому зависят от уровня его активности. Что касается металлических ионов, то они в основном производятся метеорной активностью, но также они могут генерироваться косвенно путем photoионизации и, следовательно, зависеть от солнечной активности [1]. Роль photoионизации подтверждается высокими дневными коэффициентами корреляции между уровнем солнечной активности и параметрами Es в следующих работах [1–3]. Однако эти результаты отличаются от данных работы [4], где были получены низкие коэффициенты корреляции и от данных работы [5], где было показано, что корреляция зависит от интервала анализа данных.

Согласно выводам работ [2–3] корреляция параметров спорадического слоя Es с уровнем солнечной активности зависит от ионного состава слоя Es. Для интенсивных слоев, состоящих из металлических ионов, наблюдается отрицательная корреляция вероятности появления с солнечной активностью, тогда как для слабых слоев, состоящих из молекулярных ионов, наблюдается положительная корреляция. Причем отрицательная корреляция обосновывается отрицательной корреляцией зональной составляющей преобладающего ветра [2–3]. Отрицательная корреляция также может объясняться увеличением величины поглощения

радиоволн в нижележащих слоях ионосферы с увеличением солнечной активности, что приводит к не наблюдаемости слабых слоев Es [6].

Цель данной работы заключается в проверке сложившихся представлений о спорадическом слое, связанных с зависимостью от уровня солнечной активности. В работе представлен метод исследования связи параметров спорадического слоя Es с уровнем солнечной активности. Метод реализован с использованием интегральной и дифференциальной оценки коэффициентов корреляции между среднегодовым значением индекса солнечной активности F10.7 и среднегодовой вероятностью наблюдения спорадического слоя Es.

Результаты корреляционного анализа

Повторяя методику обработки данных [2-3], обозначаемую как интегральная оценка, мы рассчитали коэффициенты корреляции R между среднегодовым значением индекса солнечной активности F10.7 и среднегодовой вероятностью наблюдения спорадического слоя Es, критическая частота которого $foEs$ превышала уровень f_i ($P(foEs \geq f_i)$). Значения f_i варьировались от 1 до 7 МГц с шагом 1 МГц. Аналогичные расчеты были осуществлены для $P(fbEs \geq f_i)$, где $fbEs$ – наибольшая частота, до которой слой Es экранирует лежащий над ним регулярный F-слой. На рис. 1 представлены полученные коэффициенты корреляции как функции f_i . Рис. 1 демонстрирует низкие положительные значения коэффициентов корреляции, в частности R для $P(foEs \geq 3$ МГц) составляет 0.11 а для $P(fbEs \geq 3$ МГц) – 0.17. Данный результат существенно отличается от данных [2-3], где были получены $R \div 0.57\text{--}0.83$ для $P(foEs \geq 3$ МГц).

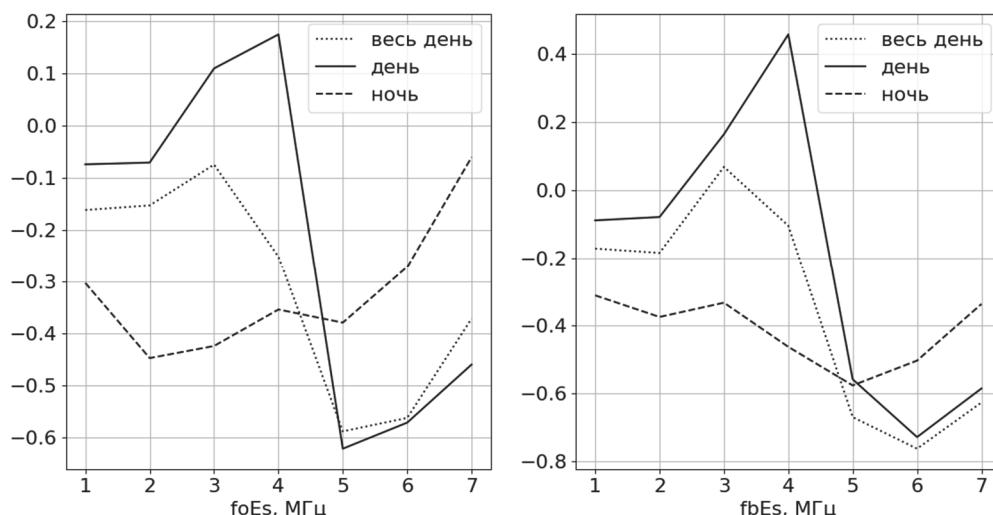


Рис. 1. Коэффициенты корреляции между среднегодовым значением индекса солнечной активности F10.7 и $P(foEs \geq f_i)$ (слева) и между F10.7 и $P(fbEs \geq f_i)$ (справа)

Альтернативой интегральной оценки является дифференциальная оценка, представляющая собой расчет коэффициентов корреляции R между среднегодовым значением индекса солнечной активности F10.7 и среднегодовой вероятностью наблюдения спорадического слоя Es, критическая частота которого $foEs$ лежит в диапазоне $f_i \div f_{i+1}$ ($P(f_{i+1} > foEs \geq f_i)$). Аналогичные расчеты были осуществлены для $P(f_{i+1} > fbEs \geq f_i)$. Полученные в результате дифференциальной оценки коэффициенты корреляции как функции f_i показаны на рис. 2. Из рис. 2 видно, что наибольшие положительные коэффициенты корреляции получены для дневных $foEs$ и $fbEs$ в диапазоне 4÷5 МГц (0.78 и 0.71, соответственно). Наибольшие отрицательные коэффициенты корреляции получены для $foEs$ и $fbEs$ в диапазоне 6÷7 МГц без разделения на день и ночь (-0.65 и -0.78, соответственно).

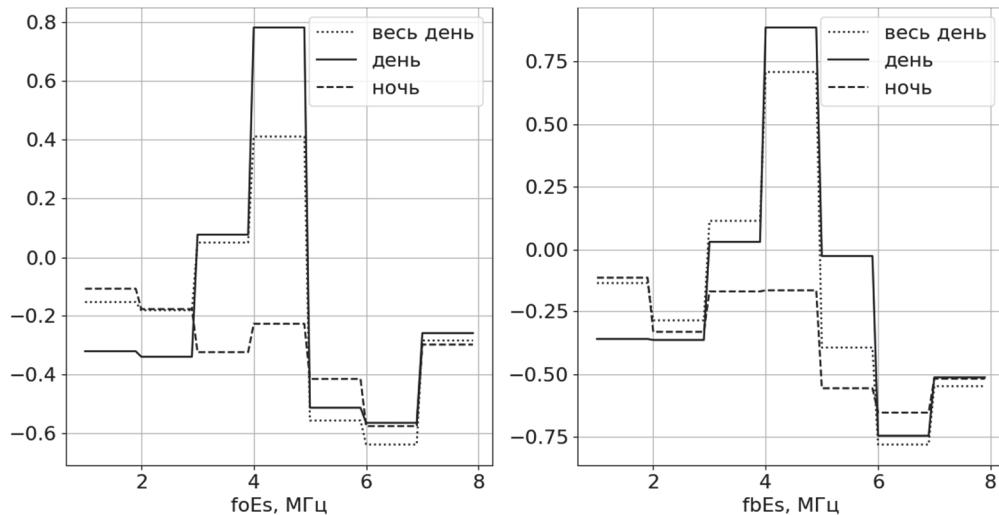


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между среднегодовым значением индекса солнечной активности F10.7 и $P(f_{i+1} > foEs \geq f_i)$ (слева) и между F10.7 и $P(f_{i+1} > fbEs \geq f_i)$ (справа)

Рассмотрим поведение коэффициента корреляции R как функции f_i , полученное в результате дифференциальной оценки (рис. 2), с точки зрения факторов влияния солнечной активности, представленных в работах [2,3,6]. Первый фактор заключается в увеличении вероятности появления Es с ростом солнечной активности из-за возрастания photoионизации. Второй фактор заключается в уменьшении вероятности появления Es с ростом солнечной активности из-за ослабления зональной составляющей преобладающего ветра. В соответствии с выводами работ [2-3] первый фактор является доминирующим для слабых слоев (низкие $foEs$), состоящих из молекулярных ионов, тогда как второй фактор является доминирующим для интенсивных слоев (высокие $foEs$), состоящих из металлических ионов. Третий фактор заключается в уменьшении вероятности появления Es с ростом солнечной активности из-за увеличения поглощения радиоволн в нижележащих слоях ионосферы [6]. Очевидно, что данный фактор в первую очередь сказывается на вероятности появления слабых слоев. Тот факт, что наибольшие положительные коэффициенты корреляции получены для дневных $foEs$ и $fbEs$ в диапазоне 4÷5 МГц, может объясняться тем, что именно для этого диапазона $foEs$ и $fbEs$ реализуется наибольшее доминирование первого фактора над вторым и третьим фактором. Наибольшее доминирование второго фактора ожидается для наиболее высокого диапазона $foEs$ и $fbEs$, т.е. для 7÷8 МГц, однако наибольшие отрицательные коэффициенты корреляции получены для диапазона 6÷7 МГц. Этот факт может быть связан с тем, что вероятности появления Es в диапазоне $foEs$ 7÷8 МГц настолько низкие, что амплитуда антокорреляции уменьшается из-за случайных факторов.

Представляет интерес корреляция высоты спорадического слоя и уровня солнечной активности. С этой целью были рассчитаны коэффициенты корреляции R между среднегодовым значением индекса солнечной активности F10.7 и среднегодовой высотой спорадического слоя Es, критическая частота которого $foEs$ лежит в диапазоне $f_i \div f_{i+1}$ ($foEs > f_i \geq f_{i+1}$). Аналогичные расчеты были осуществлены для hEs ($f_{i+1} > fbEs \geq f_i$). Полученные коэффициенты корреляции как функции f_i показаны на рис. 3. Из рис. 3 видно, что hEs ($f_{i+1} > foEs \geq f_i$) корреляция в основном положительная, а наибольшие значения $R \sim 0.75$ наблюдаются для дневных $foEs$ в диапазонах 3÷4 и 4÷5 МГц. Несколько иная картина имеет место для hEs ($f_{i+1} > fbEs \geq f_i$): наибольшие значения $R \sim 0.8$ наблюдаются для дневных $fbEs$ в диапазоне 3÷4 МГц и для ночных $fbEs$ в диапазоне 5÷6 МГц.

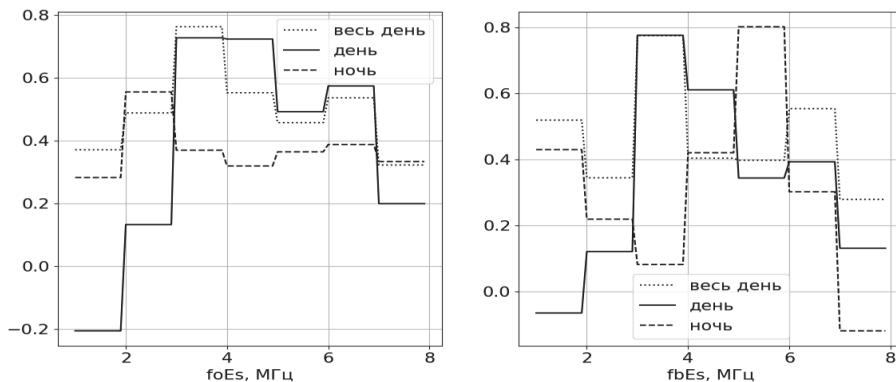


Рис. 3. Коэффициенты корреляции между среднегодовым значением индекса солнечной активности F10.7 и hEs ($f_{i+1} > foEs \geq f_i$) (слева) и между F10.7 и hEs ($f_{i+1} > fbEs \geq f_i$) (справа)

Заключение

В работе представлен метод исследования связи параметров спорадического слоя Es с уровнем солнечной активности. Метод реализован с использованием интегральной и дифференциальной оценки коэффициентов корреляции между среднегодовым значением индекса солнечной активности F10.7 и среднегодовой вероятностью наблюдения спорадического слоя Es.

Интегральная оценка дает низкие положительные значения коэффициентов корреляции, что существенно отличается от результатов предыдущих исследований. Объяснение этого расхождение требует дальнейшего изучения.

Дифференциальная оценка дает достаточно большие коэффициенты корреляции (как положительные, так и отрицательные) для определенных интервалов критической частоты $foEs$. Результаты дифференциальной оценки проинтерпретированы на основе трех факторов влияния солнечной активности: (1) возрастание фотоионизации; (2) ослабление зональной составляющей преобладающего ветра (3) увеличение поглощения радиоволн в нижележащих слоях ионосферы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-17-00187). Для анализа использовались экспериментальные данные Центра коллективного пользования «Ангара» <http://ckr-rf.ru/ckr/3056/>, полученные при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Список литературы

- 1 Pezzopane M., Pignalberi A., Pietrella M. On the influence of solar activity on the mid-latitude sporadic E layer // J. Space Weather Space Clim. – 2015. – Vol. 5. DOI: 10.1051/swsc/2015031.
- 2 Zhang Y., Wu J., Guo L., Hub Y., Zhao H., Xu T. Influence of solar and geomagnetic activity on sporadic-E layer over low, mid and high latitude stations // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 55. – P. 1366–1371. DOI:10.1016/J.ASR.2014.12.010.
- 3 Maksyutin S.V., Sherstyukov O.N. Dependence of E-sporadic layer response on solar and geomagnetic activity variations from its ion composition // Advances in Space Research. – 2005. – Vol. 35. – No. 8. – P. 1496–1499. DOI:10.1016/j.asr.2005.05.062.
- 4 Niu J., Weng L.B., Meng X., Fang H.X. Morphology of ionospheric sporadic e layer intensity based on COSMIC occultation data in the midlatitude and low-latitude regions // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2019. – Vol. 124. – No. 6. – P. 4796–4808. DOI: 10.1029/2019JA026828.
- 5 Sivakandan M., Mielich J., Renkwick T., Chau J. L., Jaen J., Laštovička J. Long-term variations and residual trends in the E, F, and sporadic E (Es) layer over Juliusruh, Europe // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2023. – Vol. 128. – No. 4. DOI:10.1029/2022JA031097.
- 6 Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева С.П., Шефтель В.М. Среднеширотный спорадический слой Е ионосферы. – М.: Наука, 1975. – 80 с.