Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 343–345.

УДК 551.510.535:517.518.8
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-343
ORCID 0009-0007-6075-8648

АППРОКСИМАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ ГАУССА

Е.Д. Сенягин[1,2], А.В. Тимченко[2], Ф.С. Бессараб[2], М.В. Клименко[2]

[1]Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия, senaginegor@mail.ru
[2]Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, Россия

APPROXIMATION OF THE PROBABILITY OF APPEARANCE OF A SPORADIC LAYER USING A GAUSSIAN FUNCTION

E.D. Senyagin[1, 2], A.V. Timchenko[2], F.S. Bessarab[2], M.V. Klimenko[2]
[1]Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia, senaginegor@mail.ru
[2]West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia

Аннотация. Представлен метод аппроксимации вероятности появления спорадического слоя E_s в ионосфере с использованием функции Гаусса. Анализ выполнен на основе данных вертикального зондирования с декабря 2014 по декабрь 2025 г. над Калининградским регионом. Показано, что предложенная аппроксимация позволяет с высокой точностью описывать суточный ход вероятности появления E_s-слоя и может быть использована для эмпирического моделирования ионосферных параметров.

Ключевые слова: ионосфера, спорадический слой E_s, вероятность появления, функция Гаусса.

Abstract. The paper presents a method for approximating the probability of sporadic E layer occurrence in the ionosphere using a sum of Gaussian functions. The analysis is based on vertical sounding data obtained at the Kaliningrad magnetic-ionospheric observatory from December 2014 to December 2025. Monthly average diurnal distributions of the E_s layer occurrence probability were calculated. It is shown that the use of two Gaussian components provides a high-accuracy description of the seasonal features of the diurnal variation of E_s layer occurrence probability. The proposed approximation can be used for empirical modeling and forecasting of ionospheric parameters.

Keywords: ionosphere, sporadic E layer, occurrence probability, Gaussian approximation.

ВВЕДЕНИЕ

Спорадический слой Е-области ионосферы представляет собой тонкое, но плотное плазменное образование на высотах 90–140 км, оказывающее значительное влияние на распространение радиоволн. Наличие E_s-слоя может способствовать прохождению сигнала за счет отражения от него, а также приводить к экранировке вышележащих ионосферных слоев и нарушению работы систем связи и радиолокации. В силу этого прогнозирование появления спорадического слоя является важной практической задачей.

Образование E_s-слоя описывается с помощью теории ветрового сдвига, которая впервые была предложена в [Whitehead, 1961]. Согласно этой теории, на определенных высотах в области нижней термосферы под действием нейтральных ветров и геомагнитного поля возникают области конвергенции ионов металлов, где и формируются спорадические слои. Подробный обзор современных представлений о механизмах формирования E_s-слоя приведен в [Haldoupis, 2011].

Изучение статистических закономерностей появления E_s-слоя, в частности суточного хода вероятности его обнаружения, является актуальной задачей прогнозирования радиосвязи и работы спутниковых систем. В предыдущей работе были рассмотрены частотные интервалы критической частоты E_s-слоя и построен суточный ход вероятности появления E_s-слоя в различные сезоны [Сенягин и др., 2026]. Суточный ход вероятности появления E_s-слоя, как правило, характеризуется наличием одного или двух максимумов, что предполагает применение аналитической функции с локализованным экстремумом. Одним из наиболее удобных вариантов является функция Гаусса, позволяющая описывать положение максимума, амплитуду и ширину с помощью небольшого количества параметров.

Целью данной работы является исследование сезонных особенностей суточного хода вероятности E_s-слоя над Калининградским регионом и его аппроксимация с помощью суммы функций Гаусса.

ДАННЫЕ И МЕТОД

Используются данные критической частоты E_s-слоя, полученные с помощью ионозонда вертикального зондирования «Парус-А» Калининградской магнитно-ионосферной обсерватории с декабря 2014 по декабрь 2025 г. Ионозонд проводит зондирование каждые 15 мин. Каждый час производится ручная обработка ионограмм, что позволяет минимизировать ошибки автоматического распознавания.

Для анализа рассчитывалась вероятность наблюдения E_s-слоя, рассчитанная как отношение количества зафиксированных слоев к количеству измерений для данного месяца и часа местного времени (LT):

$$P(t) = \frac{N_{Es}}{N_{tot}},$$

где N_{Es} — число измерений с зарегистрированным E_s-слоем в час t, N_{tot} — общее число измерений в этот же час в рассматриваемый месяц.

Расчеты проводились для каждого месяца отдельно, что позволило проследить сезонную динамику суточного хода вероятности.

Рассчитанная таким образом вероятность для каждого месяца может быть описана суммой функций Гаусса

$$P(t)_G = C + \sum_{i=1}^{2} A_i exp(-\frac{(t-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}),$$

где C — фоновый уровень вероятности появления E_s-слоя, A_i, μ_i, σ_i — амплитуда, центр и полуширина i-й гауссовой компоненты соответственно, t — LT, ч.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 1 показаны среднемесячный суточный ход вероятности появления E_s-слоя над Калининградским регионом, а также результаты его аппроксимации суммой гауссовых функций.

Стоит отметить, что целью аппроксимации являлось описание общей формы суточного хода вероятности появления E_s-слоя, а не точное воспроизведение всех локальных особенностей экспериментальных данных. В частности, в летний период в утренние часы наблюдается заметное расхождение между моделью и экспериментом, связанное с резким ростом вероятности.

Анализ показал выраженную сезонную зависимость вероятности появления E_s-слоя. В зимние месяцы она относительно мала и, как правило, не превышает 0.6–0.7. Для этого периода характерен один основной максимум, наблюдаемый в дневные часы в ~12 LT.

В весенний период наблюдается увеличение вероятности появления E_s-слоя, а суточный ход становится более сложным. Помимо основного дневного максимума, начинает формироваться дополнительное повышение вероятности в вечернее время. Это может быть связано с изменением динамики нейтральных ветров в нижней термосфере.

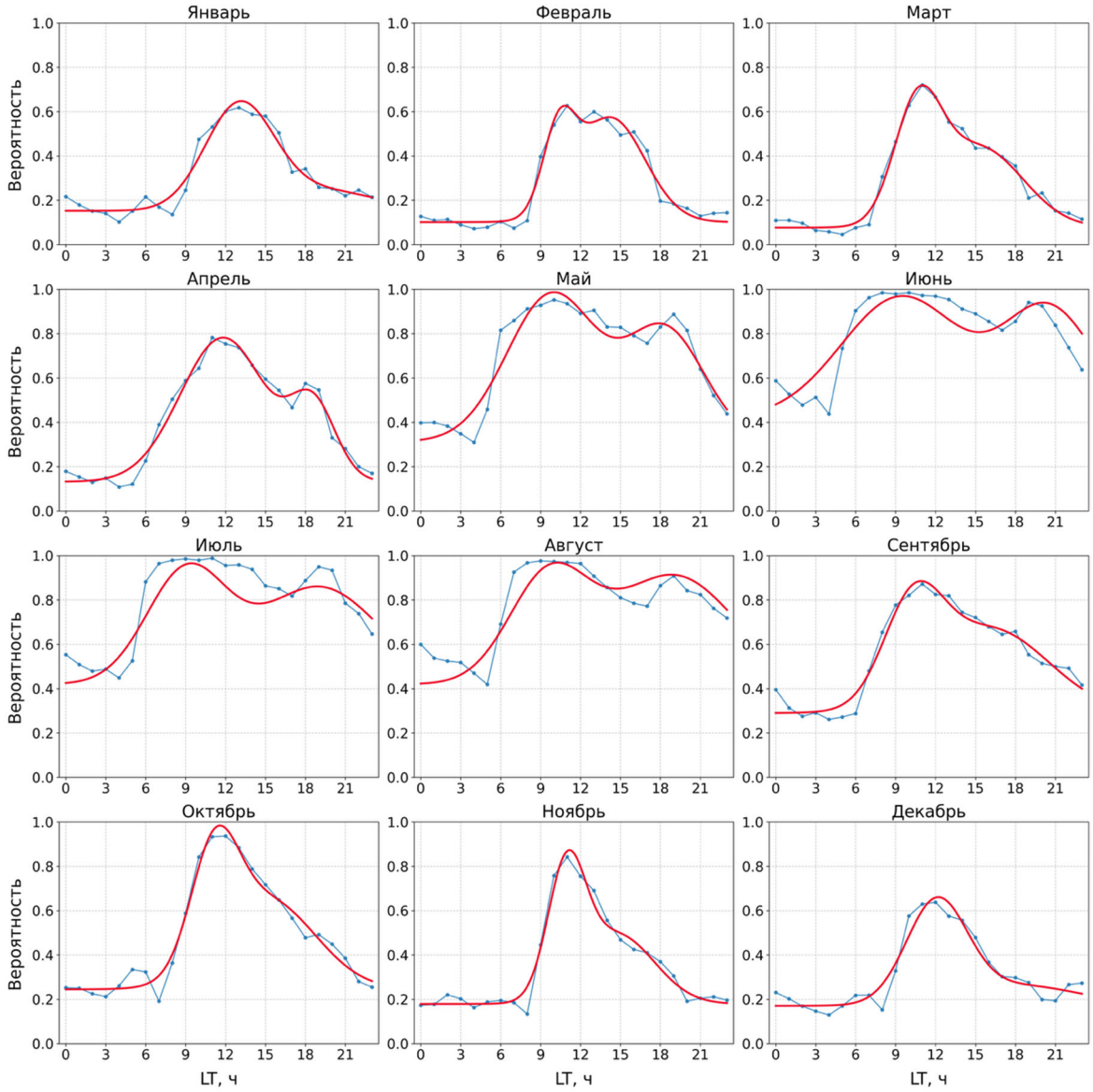

Рис. 1. Суточный ход вероятности появления E_s-слоя для разных месяцев (синие кривые) и результаты аппроксимации суммой гауссовых функций (красные кривые)

Наиболее высокая вероятность наблюдается в летние месяцы, когда значения в дневные часы достигают 0.9–1.0. В этот период суточный ход приобретает двухпиковую структуру, основной максимум формируется в утреннее время, а менее выраженный — в вечернее время. Между максимумами наблюдается относительное снижение вероятности. Подобная структура хорошо согласуется с сезонными особенностями формирования спорадических слоев в средних широтах [Воронова, Ратовский, 2025; Белинская и др., 2022; Wang et. al, 2022].

Осенью вероятность появления E_s-слоя постепенно уменьшается. Суточный ход вновь становится преимущественно однопиковым, при этом максимум смещается к полуденным часам.

Сравнение экспериментальных данных и результатов аппроксимации показывает, что использование суммы двух гауссовых функций позволяет достаточно точно описывать как положение максимумов, так и общую форму суточных распределений вероятности появления E_s-слоя. Особенно хорошее согласие наблюдается для зимнего и осеннего периодов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследован суточный ход вероятности появления спорадического слоя над Калининградским регионом. Показано, что использование суммы двух гауссовых функций позволяет с высокой точностью описывать сезонные особенности вероятности появления E_s-слоя.

Предложенный подход обеспечивает компактное параметрическое описание суточных вариаций вероятности появления E_s-слоя и может быть использован в задачах эмпирического моделирования ионосферы и прогнозирования условий распространения радиоволн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белинская А.Ю., Ковалев А.А., Карлин В.Э. Вариации слоя E_s над Новосибирском в 23 и 24 солнечных циклах // Динамические процессы в геосферах. 2022. Т. 14. № 1. С. 93–100. https://doi.org/10.26006/10.26006/22228535_2022_14_1_93

Воронова Е.А., Ратовский К.Г. Суточные вариации характеристик спорадического слоя E_s над Иркутском // Солнечно-земная физика. 2025. Т. 11. № 1. С. 63–69.

https://doi.org/10.12737/szf-111202507.

Сенягин Е.Д., Тимченко А.В., Бессараб Ф.С., Клименко М.В., Борчевкина О.П. Многочастотный анализ характеристик спорадического слоя E над Калининградским регионом в 2014–2024 гг. // Химическая физика. 2026. Т. 45, № 5, С. 96–105.

Haldoupis C. A tutorial review on sporadic E layers // Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere. 2011. P. 381–394. DOI: 10.1007/978-94-007.

Wang W., Jiang C., Wei L., et al. Comparative study of the E_s layer between the plateau and plain regions in China // Remote Sensing. 2022. V. 14, N 12. ID 2871. https://doi.org/10.3390/rs14122871.

Whitehead J.D. (). The formation of the sporadic E layer in the temperate zones // J. Atm. Terr. Phys. 1961. V. 20, N 1. P. 49–58. DOI: 10.1016/0021-9169(61)90097-6.