

## СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ ES НАД ИРКУТСКОМ

Е.А. Воронова, К.Г. Ратовский

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

## DIURNAL VARIATIONS IN ES SPORADIC LAYER CHARACTERISTICS OVER IRKUTSK

E.A. Voronova, K.G. Ratovsky

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

**Аннотация.** Для исследования морфологических особенностей спорадического слоя *Es* велась работа с такими параметрами как вероятность наблюдения (PEs) и высота (hEs) слоя на основе данных Иркутского ионозонда DPS-4 (52.3 N, 104.3 E) за 2003–2021 гг. Путем усреднения за все года рассчитывались суточные вариации PEs и hEs для каждого месяца. Работа концентрируется на морфологических особенностях полусуточных вариациях вероятности PEs и высоты hEs над Иркутском. Выявлены следующие особенности: (1) максимумы вероятности PEs достигаются при спаде высоты hEs; и (2) наблюдается асимметрия максимумов вероятности PEs: утренние максимумы больше вечерних. Эти особенности интерпретируются на основе понятия оптимальной высоты для образования *Es* и роли фотоионизации в формировании спорадического слоя.

**Ключевые слова:** спорадический слой, суточные вариации, вероятность наблюдения, высота, полусуточные приливы.

**Abstract.** To study the morphological features of the sporadic *Es* layer, we worked with such parameters as the occurrence (PEs) and height (hEs) of the layer based on data obtained at the Irkutsk DPS-4 ionosonde (52.3 N, 104.3 E) in 2003–2021. By averaging over all years, diurnal variations in PEs and hEs were calculated for each month. The paper focuses on the morphological features of semidiurnal variations in occurrence PEs and height hEs over Irkutsk. The following features were revealed: (1) the maximum of occurrence PEs is achieved when the height hEs decreases; and (2) there is an asymmetry in the maximum of occurrence PEs: morning maxima are larger than evening ones. These features are interpreted based on the concept of the optimal height for *Es* formation and the role of photoionization in the formation of the sporadic layer.

**Keywords:** sporadic layer, diurnal variations, occurrence, height, semidiurnal tides.

### 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 [Haldoupris, 2011]. Вертикальные сдвиги зонального и меридионального ветра приводят к встречному дрейфу металлических ионов метеорного происхождения, что приводит к образованию тонкого слоя с высокой электронной концентрацией. Спорадический слой *Es* подвержен суточным изменениям, что выражается в суточных вариациях его параметров. На данный момент нет полного понимания, почему для определенной географической местности и определенного времени года реализуется тот или иной тип суточных вариаций. Это сложный вопрос, требующий дальнейших исследований. Данная работа посвящена исследованию суточных вариаций вероятности наблюдения и высоты спорадического слоя, выявлению морфологических особенностей суточных вариаций и их интерпретации.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные ионозонда вертикального зондирования DPS-4, установленного в пункте с координатами 52.3° N, 104.3° E (Иркутск), с временным разрешением 15 мин за 2003–2021 гг. В качестве характеристик спорадического слоя были выбраны высота (hEs), полученная усреднением значений для данного месяца и местного времени за 2003–2021 гг., и вероятность наблюдения (PEs), рассчитанная как отношение количества наблюдений *Es* к полному

количеству измерений за 2003–2021 гг. для данного месяца и местного времени.

### СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ И ВЫСОТЫ

На рисунках 1 и 2 представлены суточные вариации для всех месяцев вероятности наблюдения PEs и высоты hEs спорадического слоя *Es*, соответственно. Из рисунка видно доминирование полусуточной составляющей для hEs с февраля по ноябрь и для PEs в феврале и с апреля по сентябрь. По всей видимости, доминирование полусуточной составляющей в суточных вариациях hEs является следствием полусуточных приливов в вариациях нейтрального ветра [Haldoupris, 2011]. При этом причина доминирования полусуточной составляющей в суточных вариациях PEs в настоящее время остается открытым вопросом. Для выявления связи полусуточных составляющих hEs и PEs рассмотрим более детально суточные вариации hEs и PEs в июне и июле, когда вероятности наблюдения слоя *Es* максимальны (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что суточные минимумы PEs наблюдаются на фазах роста hEs, а суточные максимумы PEs – на фазах спада hEs. Утренний и вечерний максимумы hEs близки друг к другу, тогда как утренний максимум PEs больше, чем вечерний. Как вариации hEs, так и вариации PEs демонстрируют хорошо выраженную полусуточную составляющую (максимумы в утреннее и вечернее время), однако сами вариации hEs и PEs не совпадают, показывая, как бы запаздывание PEs относительно hEs.

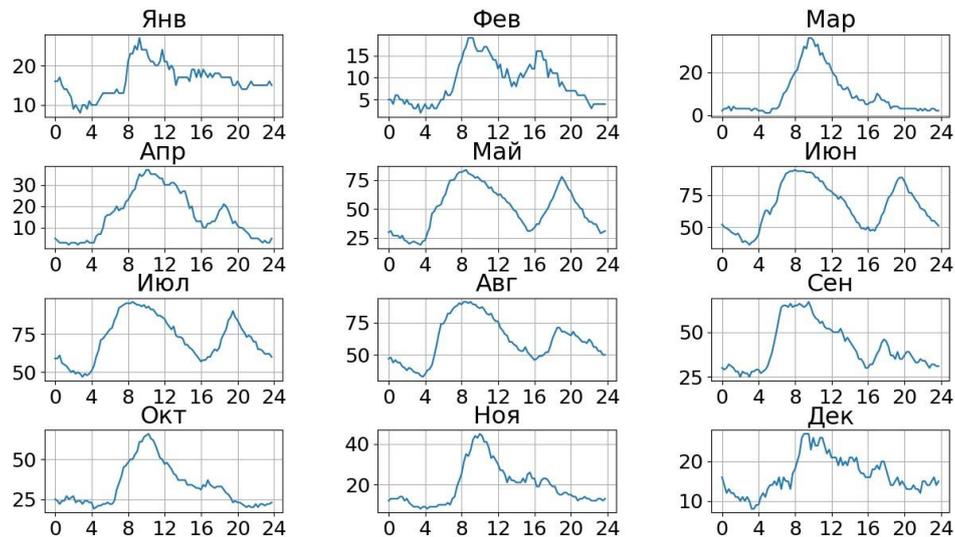


Рис. 1. Суточные вариации вероятности наблюдаемости PEc спорадического слоя Es

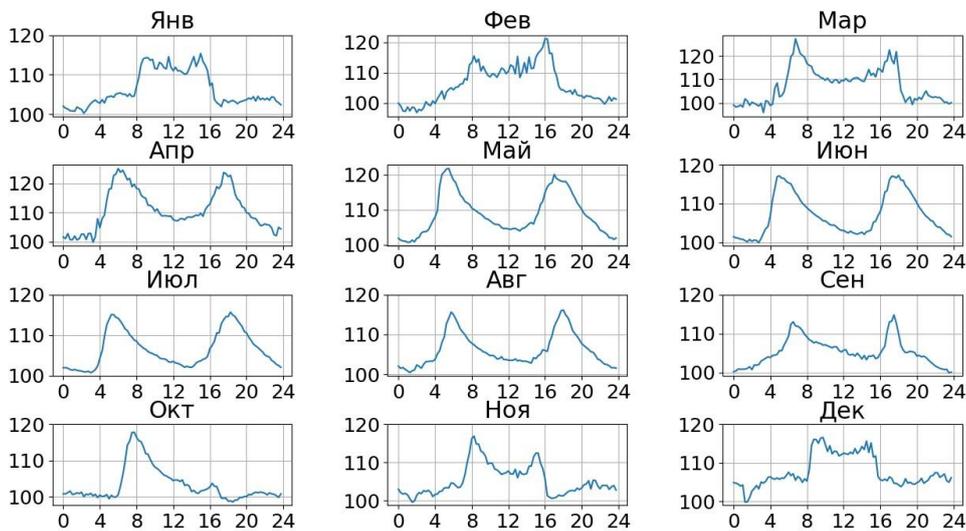


Рис. 2. Суточные вариации высоты hEs спорадического слоя Es

Подобная тенденция задержек максимумов PEc относительно максимумов hEs справедлива для всех месяцев, где достаточно хорошо выражена полусуточная составляющая PEc (рис. 1, 2). Для объяснения этой закономерности рассмотрим факторы [Haldoupis et al., 2023], влияющие на эффективность образования Es в зависимости от высоты. (1) С ростом высоты уменьшается скорость рекомбинации металлических ионов, что способствует повышению PEc с ростом высоты. (2) С ростом высоты уменьшается эффект столкновения ионов и нейтралов, препятствующего сближению ионов, что также способствует повышению эффективности образования Es с ростом высоты (3) Процесс термоабляции атомов и ионов металлов (высвобождения за счет интенсивного фрикционного нагрева) происходит преимущественно на высотах от 80 до 110 км, что способствует понижению эффективности образования Es с ростом высоты. С учетом всех трех факторов можно предположить, что существует оптимальная высота для образования спорадического слоя. Исходя из рисунков 1–3, можно предположить, что такая высота для летних месяцев находится в диапазоне 107–110 км в утреннее время и в диапазоне 111–115 км в вечернее время.

Суточная составляющая PEc (дневные значения превышают ночные) может быть объяснена суточной составляющей hEs (дневные значения превышают ночные), однако, наш взгляд, существуют факторы, для объяснения которых необходимо привлекать фотоионизацию металлических атомов. Из рис. 3 видно, что для приблизительно одного и того же диапазона hEs дневные значения PEc заметно превышают ночные. В июне диапазон hEs 102–103 км соответствует 13–14 LT и 23–23:30 LT, при этом в дневное время PEc меняется от 72 до 79 %, а в ночное время составляет ~ 62 %. В июле hEs ~ 102 км соответствует 13–14 LT и 23:30–23:45 LT, при этом в дневное время PEc меняется от 57 до 60 %, а в ночное время составляет ~ 50 %. Другим фактором, объясняемым эффектом фотоионизации, является асимметрия утреннего и вечернего максимума PEc. Максимумы PEc больше утром чем вечером, а высоты, соответствующие максимумам PEc больше вечером чем утром. Данная асимметрия может объясняться тем, что утренний спад hEs приходится на рост фотоионизации, а вечерний спад hEs — на спад фотоионизации.

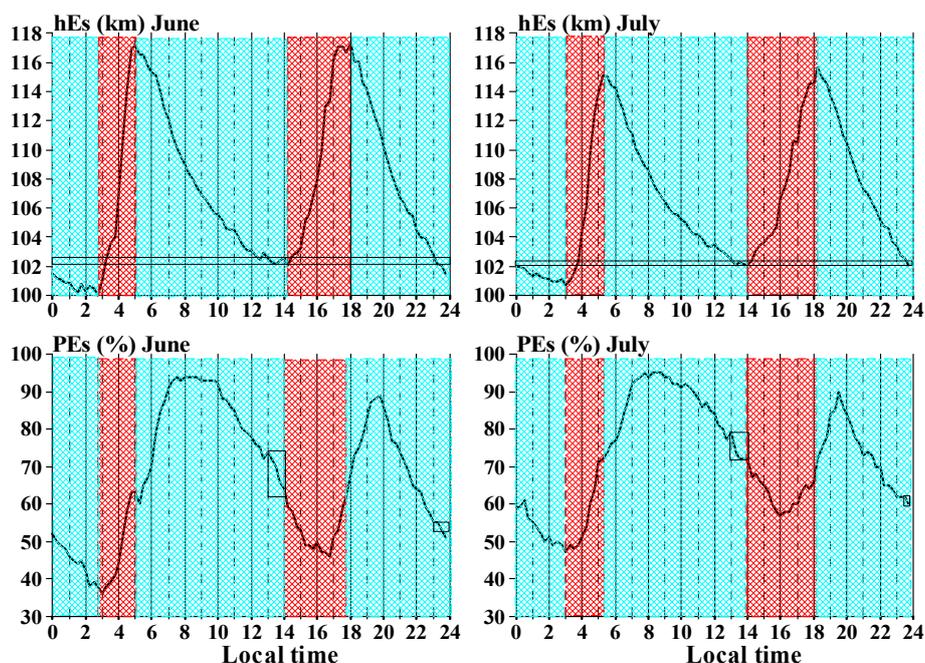


Рис. 3. Суточные вариации hEs (вверху) и PEs (внизу) для июня и июля, фазы роста hEs заштрихованы красным, фазы спада hEs — синим. Вверху прямоугольниками показаны диапазоны изменения hEs для 13–14 LT (вблизи дневного минимума hEs). Внизу прямоугольниками показаны диапазоны изменения PEs, соответствующие диапазонам изменения hEs на верхнем рисунке

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным фактором, объясняющим доминирование полусуточной составляющей в суточных вариациях hEs, являются полусуточные приливы в вариациях нейтрального ветра [Haldoupis, 2011]. Доминирование полусуточной составляющей в суточных вариациях PEs может объясняться существованием оптимальной высоты для образования спорадического слоя и преимущественно полусуточными вариациями hEs. Дополнительным фактором, влияющим на суточные вариации PEs, является

фотоионизация металлических атомов (вероятность образования Es пропорциональна фотоионизации).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Haldoupis C.A. Tutorial Review on Sporadic E Layers // *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*. 2011. P. 381–389. DOI:10.1007/978-94-007-0326-1\_29
- Haldoupis C., Haralambous H., Meek C. et al. Understanding the diurnal cycle of midlatitude sporadic E. The role of metal atoms // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023. V. 128, iss. 4. URL: <https://doi.org/10.1029/2023JA031336>