

**СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ  $E_s$  НАД ИРКУТСКОМ****DIURNAL VARIATIONS IN CHARACTERISTICS OF SPORADIC LAYER  $E_s$  OVER IRKUTSK****Е.А. Воронова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, voronova\_ea@iszf.irk.ru***К.Г. Ратовский***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, ratovsky@iszf.irk.ru***E.A. Voronova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, voronova\_ea@iszf.irk.ru***K.G. Ratovsky***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, ratovsky@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Проведено исследование морфологических особенностей полусуточных вариаций вероятности появления спорадического слоя  $E_s$   $PE_s$  и высоты слоя  $hE_s$  над Иркутском ( $52.3^\circ$  N,  $104.3^\circ$  E) на основе данных ионозонда DPS-4 за 2003–2021 гг. Путем усреднения за все годы рассчитываются суточные вариации  $PE_s$  и  $hE_s$  для каждого месяца. Отмечается, что  $PE_s$  достигает максимумов при спаде  $hE_s$  и что наблюдается асимметрия максимумов  $PE_s$ : утренние максимумы больше вечерних. Эти особенности интерпретируются на основе понятия оптимальной высоты образования  $E_s$  и роли фотоионизации в формировании этого спорадического слоя.

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

**Abstract.** We have studied the morphological features of semidiurnal variations in the occurrence of the sporadic  $E_s$  layer ( $PE_s$ ) and height of the layer ( $hE_s$ ), using data from the Irkutsk DPS-4 ionosonde ( $52.3^\circ$  N,  $104.3^\circ$  E) for 2003–2021. By averaging over all the years, we calculate diurnal variations in  $PE_s$  and  $hE_s$  for each month. It is observed that the maximum of occurrence  $PE_s$  is achieved when the height  $hE_s$  decreases; and there is an asymmetry in the maximum of occurrence  $PE_s$ : morning maxima are larger than evening ones. These features are interpreted based on the concept of the optimal height for  $E_s$  formation and the role of photoionization in forming the sporadic layer.

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

**ВВЕДЕНИЕ**

Спорадический слой  $E_s$  представляет собой тонкий плазменный слой металлических ионов, формируемый на высотах E-слоя от 90 до 130 км. Иногда  $E_s$  становится более плотным, чем регулярный E-слой или слой F2. В таких случаях слой  $E_s$  значительно влияет на распространение радиосигналов и на ионограммы F-области.

Механизм образования  $E_s$ -слоя объясняет теория ветрового сдвига: ионы сходятся сверху и снизу в результате дрейфа, вызванного встречными ветрами, например, когда зональный ветер восточного направления расположен ниже ветра западного направления. Поскольку ионно-нейтральные столкновительные силы противодействуют сближению, долгоживущие ионы металлов метеорного происхождения накапливаются в узких плотных слоях плазмы, возникающих преимущественно в зоне конвергенции ветрового сдвига.

Ветровые сдвиги, необходимые для формирования ионосферных слоев на средних широтах, обеспечиваются солнечно-синхронными приливами, преимущественно полусуточными [Forbes et al., 1995]. Тесная связь  $E_s$ -слоя с приливными ветрами в нижней термосфере объясняет наблюдаемый полусуточный характер возникновения слоев и регулярное

движение их вниз (см., например, [Гершман и др., 1976; Чавдаров и др., 1975; Mathews, 1998; Haldoupis et al., 2006; Arras et al., 2009; Fytterer et al., 2013; Oikonomou et al., 2014; Pignalberi et al., 2014]). Опускание слоя происходит в результате непрерывного процесса реформирования слоя:  $E_s$  следует за узлом конвергенции ионов, который смещается вниз с фазовой скоростью приливной волны. Теория ветрового сдвига подтверждается корреляцией между появлением  $E_s$  и горизонтальной компонентой геомагнитного поля [Гершман и др., 1976; Haldoupis, 2011].

Спорадические слои формируются преимущественно на больших высотах области E, поскольку вертикальная конвергенция ионов там происходит намного быстрее и, следовательно, более эффективно. На более низких высотах области E усиленные ионно-нейтральные столкновения уменьшают вертикальное движение ионов и в результате замедляют накопление ионов металлов. Подробно физический механизм формирования слоев и их опускания описан в обзорах [Гершман и др., 1976; Чавдаров и др., 1975; Haldoupis, 2011].

Суточные вариации вероятности наблюдения  $E_s$   $PE_s$  для различных станций исследовались в многочисленных работах. Анализ предыдущих исследо-

ваний показал, что суточные вариации  $PE_s$  можно разделить на три типа. Первый тип — это вариации  $PE_s$  с доминирующей полусуточной составляющей с двумя хорошо выраженными максимумами в утреннее и вечернее время. Второй тип — это вариации  $PE_s$  с приблизительно постоянным уровнем в светлое время и уменьшением в темное время (от первого типа отличаются отсутствием хорошо выраженного минимума в светлое время). Третий тип — это вариации  $PE_s$  с доминирующей суточной составляющей с хорошо выраженным максимумом в светлое время.

Вариации первого типа, как правило, наблюдаются в средних широтах в летнее время. Этот тип вариаций представлен в данных ионозондов вертикального зондирования в Южной Корее на ст. «Чеджу» (33.4° N, 126.3° E) и «Ичхон» (37.1° N, 127.5° E) [Jo et al., 2019]; в Австралии и Новой Зеландии на ст. «Канберра» (35.3° S, 149.0° E), «Хобарт» (42.9° S, 147.3° E) и «Крайстчерч» (43.4° S, 172.4° E) [Baggaley, 1989]; в Италии на ст. «Гибильманна» (37.9° N, 14.0° E) и «Рим» (41.8° N, 12.5° E) [Pignatelli et al., 2014]. В работе [Agras et al., 2009] вариации  $PE_s$  первого типа были получены также по данным GPS-приемников на спутниках CHAMP, GRACE и FORMOSAT-3/COSMIC с усреднением по широтной зоне 50°–55° N, а в работе [Maeda, Heki, 2015] — по данным наземных GPS-приемников в центральной части Японии. Следует отметить, что в работе [Agras et al., 2009] вариации первого типа наблюдались в июле, в апреле и в январе. С апреля по июнь и в сентябре–октябре вариации  $PE_s$  первого типа наблюдались также по данным ионозонда в Тайване (24°58' N, 121°11' E) [Lee et al., 2003].

Вариации  $PE_s$  второго типа наблюдаются на ионограммах вертикального зондирования в летнее время на различных широтах — от полярных до тропических: на Антарктическом п-ове (65°15' S, 64°16' W) [Зализовский, 2008]; в Новосибирске (54.8° N, 82.2° E) [Белинская и др., 2022]; Тайване (24°58' N, 121°11' E) [Lee et al., 2003]; Норфолке (29.0° S, 167.9° E) и Таунсвилле (19.6° S, 146.8° E) [Baggaley, 1989]. Интересно, что в монографии [Чавдаров и др., 1975] в качестве типичных суточных вариаций  $PE_s$  в летнее время приведены вариации первого типа, тогда как в монографии [Гершман и др., 1976] — вариации второго типа. При разделении спорадических слоев по типам [Кокоуров и др., 2003] суточные вариации  $E_s$  типа С в освещенное время суток являются вариациями первого типа,  $E_s$  типа F наблюдается в ночное время, а  $E_s$  типа L — в утренние и вечерние часы.

Вариации  $PE_s$  третьего типа можно разделить на два подтипа. Для вариаций первого подтипа характерен максимум  $PE_s$  вблизи полудня во все месяцы, включая летний период. Такие вариации  $PE_s$  наблюдались на китайских станциях «Чжанье» (39.2° N, 100.5° E) и «Пекин» (40.3° N, 116.3° E) [Wang et al., 2022], а также на австралийских станциях «Мундаринг» (32.0° S, 116.2° E) и «Брисбен» (27.5° S, 152.9° E) [Baggaley, 1989]. В вариациях второго подтипа при переходе от лета к зиме происходит ослабление вечернего максимума  $PE_s$  и в зимние месяцы единственный максимум  $PE_s$  наблюдается в утреннее время. Подобные вариации наблюдались на сред-

неширотных станциях [Baggaley, 1989; Jo et al., 2019; Зализовский, 2008; Белинская и др., 2022] и на низкоширотной станции «Тайвань» [Lee et al., 2003]. Подробнее такой переход будет рассмотрен далее на примере данных иркутского ионозонда.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные с временным разрешением 15 мин за 2003–2021 гг. ионозонда вертикального зондирования DPS-4, установленного в пункте с координатами 52.3° N, 104.3° E (Иркутск). В качестве характеристик спорадического слоя были выбраны действующая высота  $hE_s$ , полученная усреднением значений для данного месяца и местного времени за 2003–2021 гг., и вероятность наблюдения  $PE_s$ , рассчитанная как отношение количества наблюдений  $E_s$  к полному количеству измерений за 2003–2021 гг. для данного месяца и местного времени. Действующие высоты  $E_s$  близки к истинным высотам для  $E_s$  типов F и L, а также для  $E_s$  типа C в случаях, когда разница критических частот спорадического и регулярного слоев E не менее 2 МГц [Чавдаров и др., 1975].

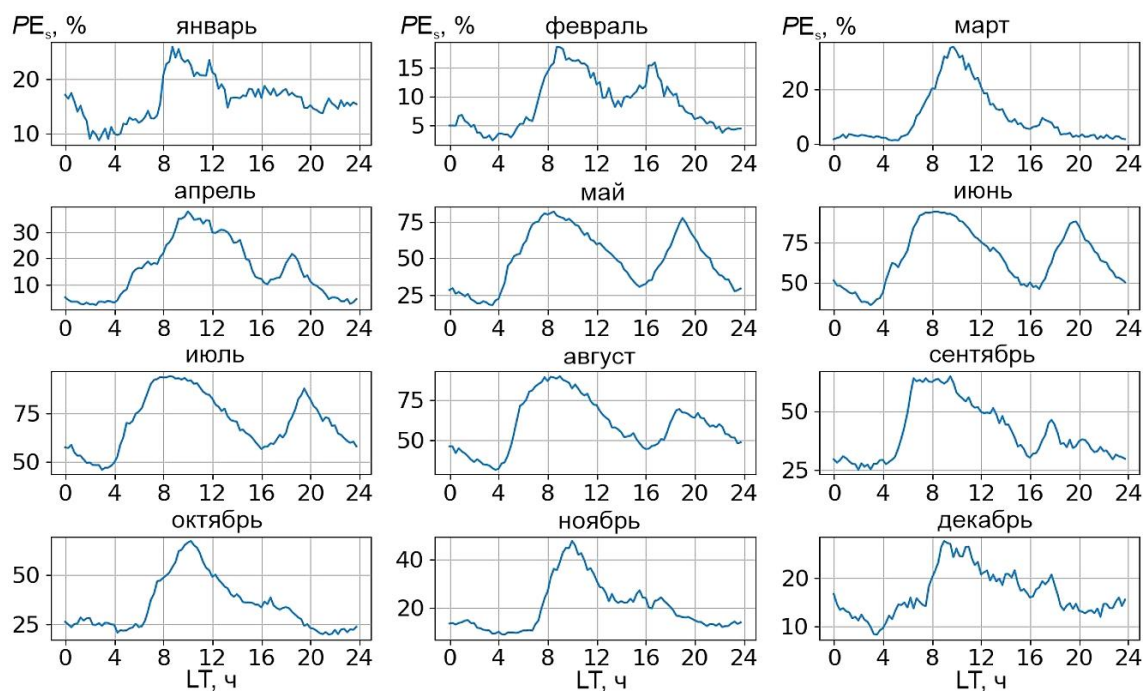
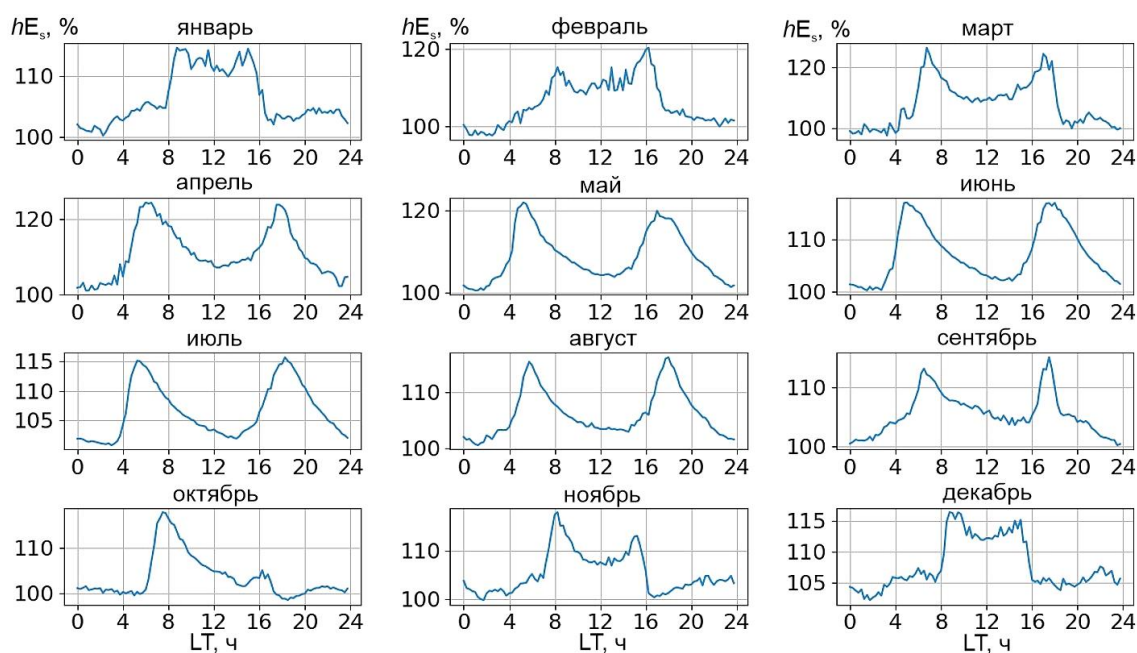
## СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ И ВЫСОТЫ

На рис. 1, 2 представлены суточные вариации для всех месяцев вероятности наблюдения  $PE_s$  и высоты  $hE_s$  соответственно.

На рис. 1, 2 видно доминирование полусуточной составляющей для  $hE_s$  с февраля по ноябрь и для  $PE_s$  с апреля по сентябрь и в феврале. По всей видимости, доминирование полусуточной составляющей в суточных вариациях  $hE_s$  является следствием полусуточных приливов в вариациях нейтрального ветра [Haldoupis, 2011]. При этом причина доминирования полусуточной составляющей в суточных вариациях  $PE_s$  в настоящее время остается неясной. Для выявления связи полусуточных составляющих  $hE_s$  и  $PE_s$  будут рассмотрены более детально суточные вариации  $hE_s$  и  $PE_s$  в летнее время, когда вероятности наблюдения слоя  $E_s$  максимальны (таблица, рис. 3).

## ОБЪЯСНЕНИЕ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ВЕРОЯТНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ $E_s$ НАЛИЧИЕМ ОПТИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ

На рис. 3 показаны суточные вариации  $hE_s$  и  $PE_s$  для июня и июля. Летние суточные вариации  $hE_s$  и  $PE_s$  характеризуются наличием как полусуточной (максимумы в утреннее и вечернее время), так и суточной составляющей (дневные значения превышают ночные). На рис. 3 видно, что суточные минимумы  $PE_s$  наблюдаются на фазах роста  $hE_s$ , а суточные максимумы  $PE_s$  — на фазах спада  $hE_s$ . Утренний и вечерний пики  $hE_s$  близки по величине, тогда как утренний пик  $PE_s$  больше, чем вечерний пик  $PE_s$ . Как вариации

Рис. 1. Суточные вариации вероятности наблюдения  $PE_s$  спорадического слоя EРис. 2. Суточные вариации высоты  $hE_s$  спорадического слоя E

$hE_s$ , так и вариации  $PE_s$  имеют хорошо выраженную полусуточную составляющую (максимумы в утреннее и вечернее время), однако сами вариации  $hE_s$  и  $PE_s$  не совпадают, демонстрируя запаздывание  $PE_s$  относительно  $hE_s$ .

В таблице приведено местное время, соответствующее восходу и закату, утренним и вечерним максимумам  $hE_s$  и  $PE_s$ , а также  $hE_s$  и  $PE_s$ , наблюдаемые в момент максимума  $PE_s$ . Из таблицы следует, что утренние максимумы высоты  $E_s$  наблюдаются через  $\sim 1$ – $1.5$  ч после восхода, разброс времен между различными месяцами составляет 25 мин. Утренние максимумы вероятности появления  $E_s$  наблюдаются

через  $\sim 2$ – $3$  ч после утренних максимумов  $hE_s$  (разброс 49 мин), через  $\sim 4$ – $5$  ч после восхода (разброс 51 мин).

Вечерние максимумы высоты  $E_s$  наблюдаются за  $\sim 2$ – $3$  ч до заката (разброс 49 мин). Вечерние максимумы вероятности появления  $E_s$  привязаны скорее к закату, чем к вечерним максимумам  $hE_s$ . Максимумы  $PE_s$  наблюдаются за 42–51 мин до заката (разброс 9 мин), при этом разброс относительно вечерних максимумов  $hE_s$  составляет 75 мин. Можно заметить также, что разница между вечерними максимумами  $PE_s$  и  $hE_s$  на  $\sim 1$  ч меньше, чем между утренними максимумами  $PE_s$  и  $hE_s$ . Высоты  $E_s$ , соответствующие



Моменты местного времени, соответствующие восходу и закату, утренним и вечерним максимумам  $hE_s$  и  $PE_s$ , а также  $hE_s$  и  $PE_s$ , наблюдаемые в момент максимума  $PE_s$

Месяц	Восход	LT( $hE_s$ )	LT( $PE_s$ )	$hE_s$ , км	$PE_s$ , %	Закат	LT( $hE_s$ )	LT( $PE_s$ )	$hE_s$ , км	$PE_s$ , %
Май	04:06	05:30	08:30	110	83	19:51	17:00	19:00	115	78
Июнь	03:40	05:00	08:45	107	94	20:26	18:00	19:45	111	89
Июль	03:59	05:15	08:45	107	95	20:17	18:15	19:30	112	90
Август	04:46	05:45	09:00	106	91	19:27	18:00	18:75	113	71

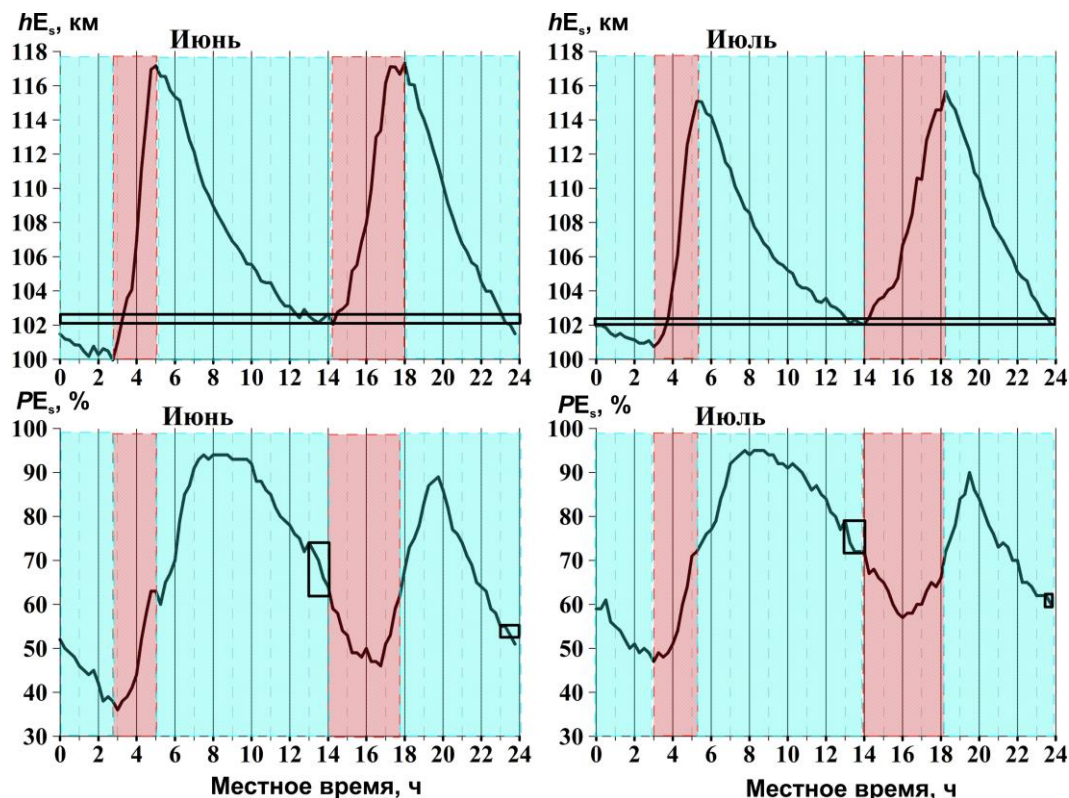


Рис. 3. Суточные вариации  $hE_s$  (вверху) и  $PE_s$  (внизу) для июня и июля, фазы роста  $hE_s$  заштрихованы красным, фазы спада  $hE_s$  — синим. Прямоугольниками показаны: вверху — диапазоны высот, соответствующие 13:00–14:00 LT (вблизи дневного минимума  $hE_s$ ); внизу — диапазоны изменения  $PE_s$ , соответствующие интервалам пересечения  $hE_s$  диапазона высот, отмеченного на верхних панелях

временам максимумов  $PE_s$ , варьируют от 107 до 110 км в утром и от 111 до 115 км вечером.

Подобная тенденция задержек максимумов  $PE_s$  относительно максимумов  $hE_s$  справедлива для большинства месяцев (рис. 4), где достаточно хорошо выражена полусуточная составляющая  $PE_s$  (см. рис. 1, 2). С февраля по ноябрь имеет место следующая последовательность: рассвет — утренний максимум  $hE_s$  — утренний максимум  $PE_s$  — вечерний максимум  $hE_s$  — вечерний максимум  $PE_s$  — закат, исключением являются январь и декабрь.

Для объяснения закономерности следования максимумов  $hE_s$  и  $PE_s$  рассмотрим факторы влияния высоты  $hE_s$  на эффективность образования  $E_s$  [Haldoupis et al., 2023].

1. С ростом высоты уменьшается скорость рекомбинации металлических ионов, что способствует повышению эффективности образования  $E_s$ .

2. С ростом высоты уменьшается эффективность столкновений и нейтралов, препятствующих сближению ионов, что также способствует повышению эффективности образования  $E_s$ .

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  $E_s$  с ростом высоты.

С учетом всех трех факторов можно предположить, что существует оптимальная высота образования спорадического слоя E. Исходя из таблицы, можно предположить, что такая высота находится в диапазоне 107–110 км в утреннее время и в диапазоне 111–115 км в вечернее время.

Существование оптимальной высоты образования  $E_s$  объясняет поведение  $PE_s$  на фазе спада  $hE_s$ : сначала  $hE_s$ , уменьшаясь, приближается к оптимальной высоте образования слоя и, как следствие,  $PE_s$  увеличивается; затем, продолжая уменьшаться,  $hE_s$  удаляется от оптимальной высоты и  $PE_s$  уменьшается. Тем не менее предположение о существовании оптимальной высоты не объясняет минимумы  $PE_s$  на фазах роста  $hE_s$ . Для прояснения этого вопроса рассмотрим суточное поведение  $hE_s$  в июне 2005 г. без усреднения (рис. 5).

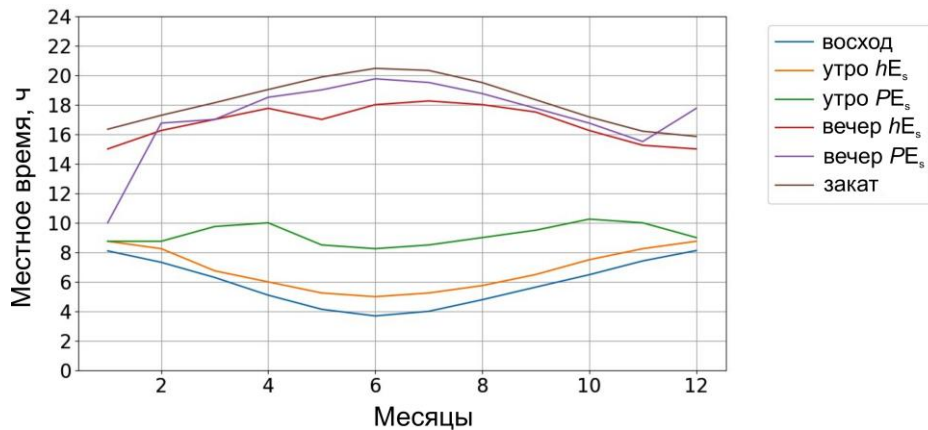


Рис. 4. Время рассвета и заката, а также максимумов  $PE_s$  и  $hE_s$  для каждого месяца

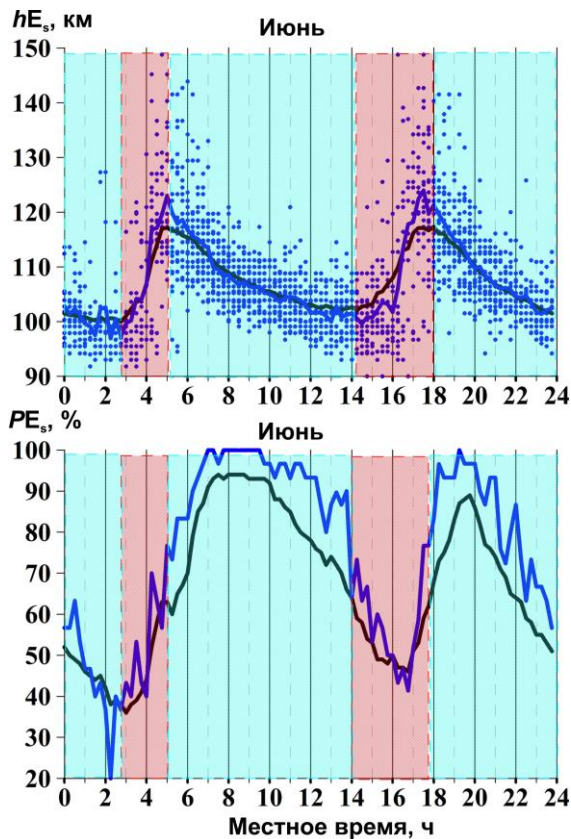


Рис. 5. Суточное поведение  $hE_s$  (вверху) и  $PE_s$  (внизу) в июне 2005 г.: синие линии — средние величины за все июня с 2003 по 2021 гг.; черные — средние величины за июнь 2005 г.; розовой заливкой обозначены фазы роста  $hE_s$ , голубой — фазы спада  $hE_s$ . На верхней панели синими точками показаны наблюдавшиеся значения  $hE_s$ .

На рис. 5 синими точками представлены высоты  $hE_s$  в различные дни июня 2005 г. для данного местного времени. Из рис. 5 видно, что на фазах роста  $hE_s$  имеют место отражения как бы от верхнего и нижнего спорадического слоя (в отдельные дни — от нижнего слоя, в отдельные дни — от верхнего слоя). Наличие верхнего и нижнего спорадических слоев будет рассмотрено ниже более детально. Рост средней высоты  $E_s$ -слоя обусловлен постепенным прева-лированием отражений от верхнего слоя. Начало фазы роста  $hE_s$  приблизительно совпадает с началом

появлений отражений от верхнего слоя, а конец фазы роста  $hE_s$  — с окончанием появления отражений от нижнего слоя. На фазе роста преимущественно происходят отражения от слоев, наиболее отдаленных от оптимальной высоты (как вниз, так и вверх), что объясняет минимумы  $PE_s$  на фазах роста  $hE_s$ .

Наличие верхнего и нижнего спорадических слоев иллюстрируют рис. 6 и 7, на которых показаны вероятности наблюдения  $E_s$  как функции высоты и местного времени для всех июня и июля с 2003 по 2021 г. На фазе роста усредненной высоты, когда наблюдается минимум  $PE_s$ , слои  $E_s$  преимущественно регистрируются на высотных интервалах либо 95–105 км, либо 115–125 км. На фазе спада усредненной высоты и максимума вероятности появления  $E_s$ -слоя наблюдаются в высотном диапазоне 105–115 км — вблизи оптимальной высоты образования спорадического слоя E. Заметим, что времена наблюдения верхнего и нижнего спорадических слоев соответствуют временам наблюдения спорадического слоя типа CL, обозначающего одновременное наблюдение слоев типа C и L [Кокоуров и др., 2003].

Ионозондом, как правило, наблюдается только один слой (наличие двух слоев является следствием наблюдений в разные дни). Два слоя одновременно регистрируются ионозондом в редких случаях. В то же время данные радара некогерентного рассеяния в Arecibo демонстрируют регулярное одновременное присутствие как минимум двух спорадических слоев [Christakis et al., 2009].

## РОЛЬ ФОТОИОНИЗАЦИИ

Суточная составляющая  $PE_s$  (дневные значения превышают ночные) может быть объяснена суточной составляющей  $hE_s$  (дневные значения превышают ночные), однако, наш взгляд, существуют факторы, для объяснения которых необходимо привлекать фотоионизацию металлических атомов. На рис. 3 видно, что для приблизительно одного и того же диапазона  $hE_s$  дневные значения  $PE_s$  заметно превышают ночные. В июне диапазон  $hE_s$  102–103 км соответствует 13–14 и 23–23:30 LT, при этом в дневное время  $PE_s$  изменяется от 72 до 79 %, а в ночное время составляет ~62 %. В июле  $hE_s$  ~ 102 км соответствует 13–14

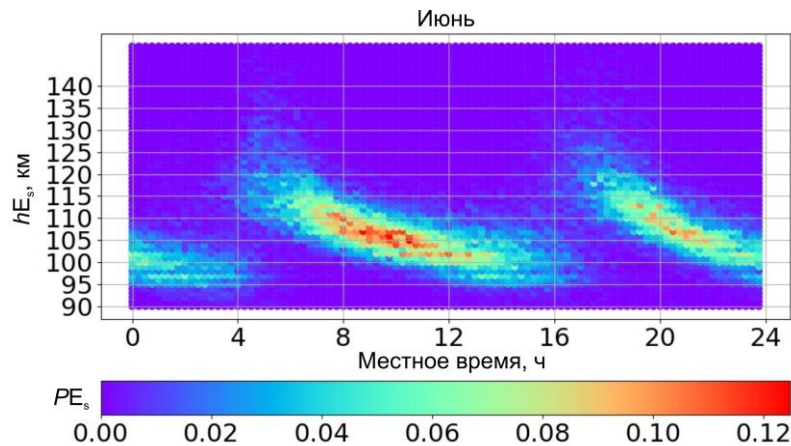


Рис. 6. Вероятность наблюдения  $PE_s$  как функция высоты (с шагом 1 км) и местного времени ( $LT=UT+7$ ) для всех июней за 2003–2021 гг.

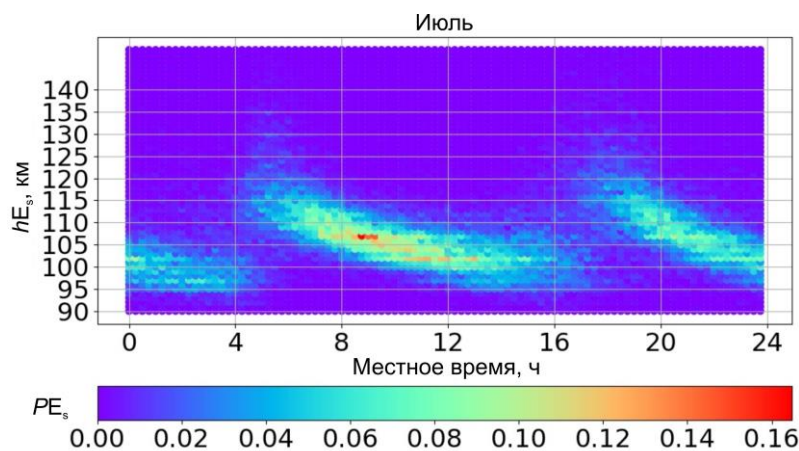


Рис. 7. Вероятность наблюдения  $PE_s$  как функция высоты (с шагом 1 км) и местного времени ( $LT=UT+7$ ) для всех июлей за 2003–2021 гг.

и 23:30–23:45 LT, при этом  $PE_s$  в дневное время изменяется от 57 до 60 %, а в ночное время составляет ~50 %. Другим фактором, объясняемым эффектом фотоионизации, является асимметрия утреннего и вечернего максимумов  $PE_s$ . Максимумы  $PE_s$  больше утром, чем вечером, а высоты, соответствующие максимумам  $PE_s$ , больше вечером, чем утром (см. таблицу). Данная асимметрия может объясняться тем, что утренний спад  $hE_s$  приходится на рост фотоионизации, а вечерний спад  $hE_s$  — на спад фотоионизации.

Полусуточная составляющая  $hE_s$  (максимумы в утреннее и вечернее время) объясняется полусуточными вариациями положения узла конвергенции ветрового сдвига, в свою очередь обусловленными полусуточной составляющей нейтрального ветра. Суточная составляющая  $hE_s$  (дневные значения превышают ночные) может быть связана с эффектом фотоионизации. На рис. 3 видно, что минимальные значения  $hE_s$  приблизительно одинаковы в дневное и ночное время. Более высокие средние значения  $hE_s$  в дневное время связаны с появлением отражений от верхнего слоя при  $hE_s \sim 102$ – $103$  км, тогда как в ночное время отражения от верхнего слоя появляются при  $hE_s \sim 100$  км. Это различие может быть связано с тем, что в ночное время отражения от верхне-

го слоя появляются только с наступлением рассвета и началом процесса фотоионизации. Альтернативным объяснением является то, что ночные  $hE_s$  могут быть узлами конвергенции ветрового сдвига, обусловленными суточной составляющей нейтрального ветра.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных Иркутского ионозонда DPS-4 ( $52.3^\circ$  N,  $104.3^\circ$  E) за 2003–2021 гг. осуществлен морфологический анализ высоты и вероятности наблюдения слоя  $E_s$ . Выявлено доминирование полусуточной составляющей как для высоты, так и для вероятности наблюдения  $E_s$ . Доминирование полусуточной составляющей в суточных вариациях  $hE_s$  является следствием полусуточных приливов в нейтральном ветре [Haldoupis, 2011].

Для интерпретации доминирования полусуточной составляющей в суточных вариациях вероятности наблюдения  $E_s$  предложена концепция оптимальной высоты образования спорадического слоя. Максимум  $PE_s$  наблюдается на фазе спада высоты  $E_s$ , когда  $hE_s$  соответствует оптимальной высоте образования спорадического слоя. На фазе роста усредненной высоты  $E_s$  преимущественно происхо-



дят отражения от слоев, наиболее отдаленных от оптимальной высоты (как вниз, так и вверх), что объясняет минимумы вероятности появления  $E_s$  на фазах роста высоты слоя.

Дополнительным фактором, влияющим на суточные вариации вероятности наблюдения  $E_s$ , является фотоионизация металлических атомов (вероятность образования  $E_s$  пропорциональна фотоионизации).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

## 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.

Гершман Б.Н., Игнатьев Ю.А., Каменецкая Г.Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя  $E_s$  на различных широтах. М.: Наука, 1976. 108 с.

Зализовский А.В. Роль тропосферных процессов в формировании спорадических слоев E-области ионосферы над Антарктическим полуостровом. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2008. Т. 13, № 1. С. 26–38.

Кокоуров В.Д., Петрухин В.Ф., Пономарев Е.А., Сутырин Н.А. Климатические особенности области E ионосферы. *Солнечно-земная физика*. 2003. Вып. 3. С. 24–27. (Kokourov V.D., Petrukhin V.F., Ponomarev E.A., Sutyurin N.A. Climatic features of the ionosphere E region. *Solar-Terr. Phys.* 2003. Iss. 3. P. 24–27. (In Russian)).

Чавдаров С.С., Часовитин Ю.К., Чернышева С.П., Шефтель В.М. *Среднеширотный спорадический слой E ионосферы*. М.: Наука, 1975. 148 с.

Arras C., Jacobi C., Wickert J. Semidiurnal tidal signature in sporadic E occurrence rates derived from GPS radio occultation measurements at higher midlatitudes. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27, no. 6. P. 2555–2563. DOI: [10.5194/angeo-27-2555-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-2555-2009).

Baggaley W.J. Ionospheric  $E_s$  in southern hemisphere temperate zone. Seasonal characteristics for  $f_oE_s$ ,  $Au_s$ . *J. Phys.* 1989. Vol. 42, no. 4. P. 451–464. DOI: [10.1071/PH890451](https://doi.org/10.1071/PH890451).

Christakis N., Haldoupis C., Zhou Q., Meek C. Seasonal variability and descent of mid-latitude sporadic E layers at Arecibo. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27, iss. 3. P. 923–931. DOI: [10.5194/angeo-27-923-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-923-2009).

Forbes J.M., Makarov N.A., Portnyagin Yu.I. First results from the meteor radar at South Pole: A large 12-hour oscillation with zonal wavenumber one. *Geophys. Res. Lett.* 1995. Vol. 22, no. 23. P. 3247–3250. DOI: [10.1029/95GL03370](https://doi.org/10.1029/95GL03370).

Fytterer T., Arras C., Jacobi C. Terdiurnal signatures in sporadic E layers at midlatitudes. *Adv. Radio Sci.* 2013. Vol. 11. P. 333–339. DOI: [10.5194/ars-11-333-2013](https://doi.org/10.5194/ars-11-333-2013).

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

Haldoupis C., Meek C., Christakis N., et al. Ionogram height time intensity observations of descending sporadic E layers at mid-latitude. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. Vol. 68, no. 3–5. P. 539–557. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.03.020).

Haldoupis C., Haralambous H., Meek C., Mathews J.D. Understanding the diurnal cycle of midlatitude sporadic E. The role of metal atoms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2023. Vol. 128, no. 4. e2023JA031336. DOI: [10.1029/2023JA031336](https://doi.org/10.1029/2023JA031336).

Jo E., Kim Y.H., Moon S., Kwak Y.S. Seasonal and local time variations of sporadic E layer over South Korea. *J. Astron. Space Sci.* 2019. Vol. 36, no. 2. P. 61–68. DOI: [10.5140/JASS.2019.36.2.61](https://doi.org/10.5140/JASS.2019.36.2.61).

Lee C.-C., Liu J.-Y., Pan C.-J., Hsu H.-H. The intermediate layers and associated tidal motions observed by a digisonde in the equatorial anomaly region. *Ann. Geophys.* 2003. Vol. 21, no. 4. P. 1039–1045. DOI: [10.5194/angeo-21-1039-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-1039-2003).

Maeda J., Heki K. Morphology and dynamics of daytime midlatitude sporadic-E patches revealed by GPS total electron content observations in Japan. *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67, no. 89. DOI: [10.1186/s40623-015-0257-4](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0257-4).

Mathews J.D. Sporadic E: current views and recent progress. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998. Vol. 60, no. 4. P. 413–435. DOI: [10.1016/S1364-6826\(97\)00043-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00043-6).

Oikonomou C., Haralambous H., Haldoupis C., Meek C. Sporadic E tidal variabilities and characteristics observed with the Cyprus digisonde. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 119. P. 173–183. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.07.014).

Pignalberi A., Pezzopane M., Zuccheretti E. Sporadic E layer at mid-latitudes: average properties and influence of atmospheric tides. *Ann. Geophys.* 2014. Vol. 32, no. 11. P. 1427–1440. DOI: [10.5194/angeo-32-1427-2014](https://doi.org/10.5194/angeo-32-1427-2014).

Wang W., Jiang C., Wei L., et al. Comparative study of the  $E_s$  layer between the plateau and plain regions in China. *Remote Sens.* 2022. Vol. 14, no. 12. Id. 2871. DOI: [10.3390/rs14122871](https://doi.org/10.3390/rs14122871).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 5 ноября 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

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. DOI: [10.12737/szf-111202507](https://doi.org/10.12737/szf-111202507).