

УДК 551.510.535

ВАРИАЦИИ СЛОЯ E_s НАД НОВОСИБИРСКОМ В 23 И 24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

© 2022 г. А. Ю. Белинская*, А. А. Ковалев, В. Э. Карлин

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Россия*

**E-mail: BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru*

На ионосферной станции в г. Новосибирске (54.84°с.ш., 83.23°в.д.) ведутся непрерывные наблюдения методом вертикального зондирования с конца 60-х годов XX века. С 1995 года установлен цифровой ионозонд «ПАРУС», благодаря чему был накоплен в цифровом виде архив непрерывных рядов ионосферных параметров, полученных одним прибором в одном месте. Для исследования морфологических особенностей поведения ионосферы над Новосибирском в качестве параметров, характеризующих состояние нижней ионосферы, были выбраны критическая частота и действующая высота слоя E_s (соответственно, foE_s и h'E_s). Накопленный материал позволил проанализировать вероятности наблюдения (PEs) этого слоя в каждом месяце, в зависимости от времени суток и высоты, появления за период с 1996 по 2019 гг., который охватывает 23-й и 24-й одиннадцатилетние солнечные циклы. Не выявлено непосредственной зависимости от уровня солнечной активности, которая была представлена числами Вольфа (числом пятен на Солнце). Для изучения условий формирования спорадического образования E_s была рассмотрена статистическая связь между солнечной и магнитной активностями в период с 1996 по 2019 гг. Показано, что при нестабильной взаимосвязи солнечной и геомагнитной активности появление спорадического слоя более вероятно. Вероятность появления E_s проявляет явную зависимость от сезона и часа суток. В январе-феврале 2002 года слой E_s наблюдался редко (PEs около 15%), тогда как в другие года в среднем эта величина была 40–45%, а в 2011 году достигла 80%. В июле и августе появление слоя E_s практически 100%. Наиболее вероятное время появления спорадического слоя приходится на период с восхода до заката вне зависимости от месяца наблюдения, причем летом имеется два пика, когда он наблюдается 100% – это местные дневные и предзакатные часы, минимальное PEs приходится на ночные часы зимой. Проанализировано количество случаев появления E_s в конкретных высотных диапазонах, временной ряд этой величины повторяет солнечный цикл: низкие E_s (100–110 км) чаще наблюдаются в солнечном минимуме, а более высокие (115–130 км) – солнечном максимуме. Выявлена сезонная зависимость: более низкие спорадические слои (100–130 км) в большем количестве появляются летом, а более высокие E_s (> 135 км) – весной и зимой. Обсуждается формирование слоя E_s во время подготовки и реализации землетрясений в области 200–300 км от ионосферной станции. Однозначного отклика нижней ионосферы на эти события не выявлено.

Ключевые слова: ионосфера, спорадический слой ионосферы, солнечная активность, солнечный одиннадцатилетний цикл, вероятность появления спорадического слоя ионосферы.

Для цитирования: 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. http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_93.

Введение

E-слой ионосферы на высотах 95–150 км образуется благодаря метеорологическим приливным процессам снизу, солнечному излучению и метеорным следам сверху. Спорадические слои E_s с повышенной электронной концентрацией могут наблюдаться на высотах до 190 км. Знание свойств этих образований имеет большое практическое значение, т.к. вариации электронной концентрации

Es-слоя вызывают разрыв связи в КВ диапазоне или изменение фазы радиосигналов в гигагерцовом диапазоне. Кроме того, изучение этого явления может дать материал для объяснения связи процессов в нижней ионосфере с динамикой атмосферы. Был предложен ряд механизмов и теорий формирования таких образований, например, [Гершман, 1976; Whitehead, 1990; Kirkwood, Nilsson, 2000; Кокоруов, 2003; Arrasetal., 2008; Губенко, Кириллович, 2019]. Множественность причин возникновения слоев Es ставит перед исследователями вопросы: какие из факторов являются ведущими, действуют ли они одновременно и носят ли они региональный характер. Для ответа необходимо получить подробные данные о характеристиках Es-слоев как в отдельных районах Земли, так и в глобальном масштабе.

Известно, что на процессы в атмосфере Земли большое влияние оказывает солнечная активность, которая может быть представлена числами Вольфа (<https://www.sidc.be/silso/datafiles>). 23-й 11-летний цикл солнечной активности (СА) начался в мае 1996 года и продолжался 12.6 года. Максимум СА отмечен в марте 2000 г. и вторичный максимум – в ноябре 2001 г., минимум – в декабре 2008 г. 24-ый цикл СА был несколько слабее, он начался в январе 2009 года и продолжался 11 лет, максимумы были в марте 2012 и в апреле 2014 гг., минимум отмечен в декабре 2019 года.

На геофизической обсерватории «Солнечно-Земной физики» ИНГГ СО РАН (г. Новосибирск) ведутся непрерывные наблюдения за ионосферой с конца 60-х годов XX-го века методом вертикального зондирования (<http://im.ipgg.sbras.ru>). С 1996 года введен в эксплуатацию цифровой ионозонд «Парус» (ИЗМИРАН). Таким образом, в нашем распоряжении имеются непрерывные ряды ионосферных параметров, полученные одним прибором в одном месте, что позволяет нам детально изучить поведение слоя Es над Новосибирском за два полных цикла СА. Для анализа были привлечены данные по критической частоте слоя Es и его действующей высоте. Надо отметить, что имеется один интервал с 06.2010 по 03.2011 гг., когда по техническим причинам ионозонд не работал ночью и частично данные были получены автоматической ионосферной станцией (АИС). В статье рассматривается вероятность появления слоя Es в отдельно взятом месяце и количество случаев появления такого образования в высотных диапазонах. Вероятность появления Es (PEs) рассчитывалась как отношение числа часов с наблюдаемым Es к полному количеству часовых наблюдений в каждом месяце.

В работе [Витинский и др., 1976] показано, что статистическая связь между геомагнитной и солнечной активностями имеет сложный характер. Для изучения условий формирования спорадического образования Es была рассмотрена статистическая связь между солнечной и магнитной активностями в период с 1996 по 2021 гг. Для этого был определен коэффициент корреляции между среднемесячными значениями чисел Вольфа W и индексами магнитной активности A_p для промежутка длиной в один год ($R(W, A_p)$). Полученный результат был отнесен к середине этого интервала, затем этот интервал был сдвинут на один месяц, и расчет был повторен и т.д. Таким образом, были получены ряды для каждого из солнечных циклов. Кроме того, для анализа были привлечены данные по количеству солнечных вспышечных событий 23 и 24 циклов СА с рентгеновским баллом M1 – X (http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_flare_events.ru.html).

Анализ и результаты

На рис. 1 представлены PEs для каждого месяца на фоне изменения чисел Вольфа в течение 23 и 24 солнечных циклов. Для графического представления мы «центрировали» ряды по максимуму цикла, соответственно, 23 цикл – это февраль 2001 г. и 24 цикл – это январь 2013 г. На нижней оси для удобства приведены года, которым соответствуют месяца, отложенные по ней.

У рассматриваемых циклов ветви роста и спада СА отличаются по длине (количество месяцев) и крутизне. Стоит отметить, что на ветви роста и в максимуме СА вероятности появления слоя Es рождаются для этих циклов, а в конце циклов эти отличия не так выражены.

Еще один момент привлекает внимание: если рассматривать изменение PEs от года к году в конкретный месяц, то стоит отметить, что для летних месяцев характерна одинаково высокая вероятность появления слоя Es, практически 100%, а в зимние месяцы PEs сильно меняется при средних значениях около

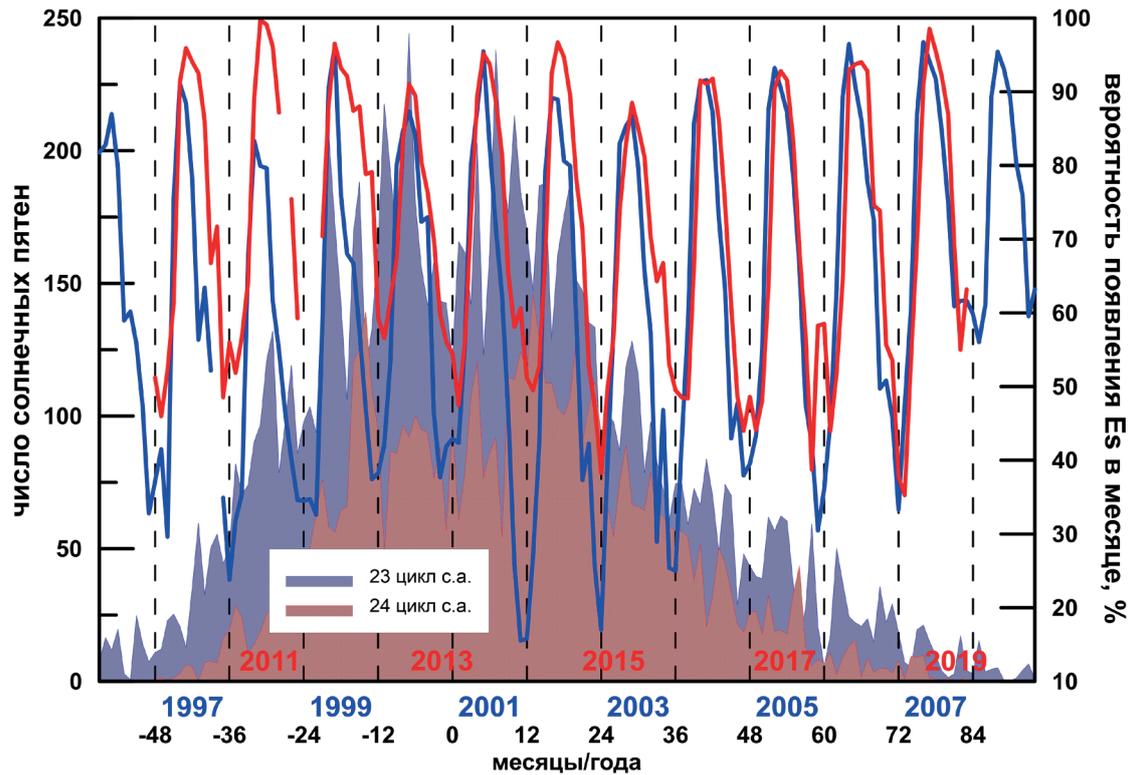


Рис. 1. Вероятность появления слоя Es для каждого месяца 23 и 24 солнечных циклов на фоне изменения чисел Вольфа. Синяя линия соответствует периоду с 05.1996 по 12.2008 гг., а красная линия – с 01.2009 по 12.2019 гг.

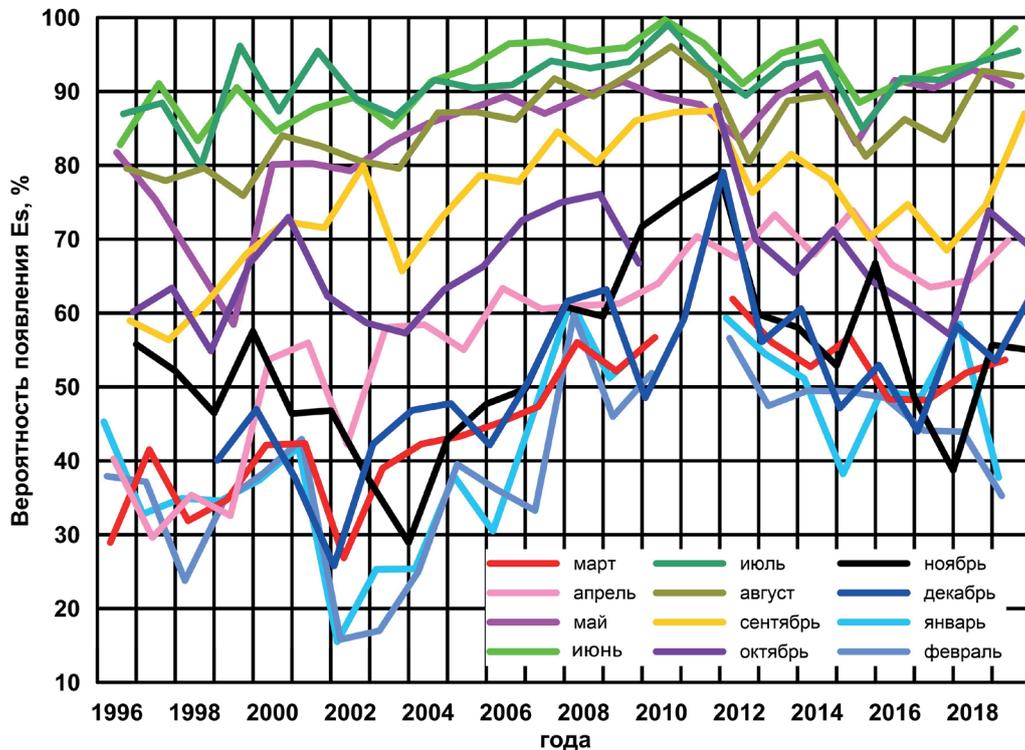


Рис. 2. Вероятность появления слоя Es по месяцам от года к году с 05.1996 по 12.2019 гг.

40–45% (рис. 2). В январе-феврале 2002 года слой Es практически не наблюдался (P_{Es} около 15%), а в декабре 2011 г. наоборот часто наблюдался (P_{Es} около 80%).

Как было отмечено выше, нами были проведены расчеты по выявлению связи между солнечной

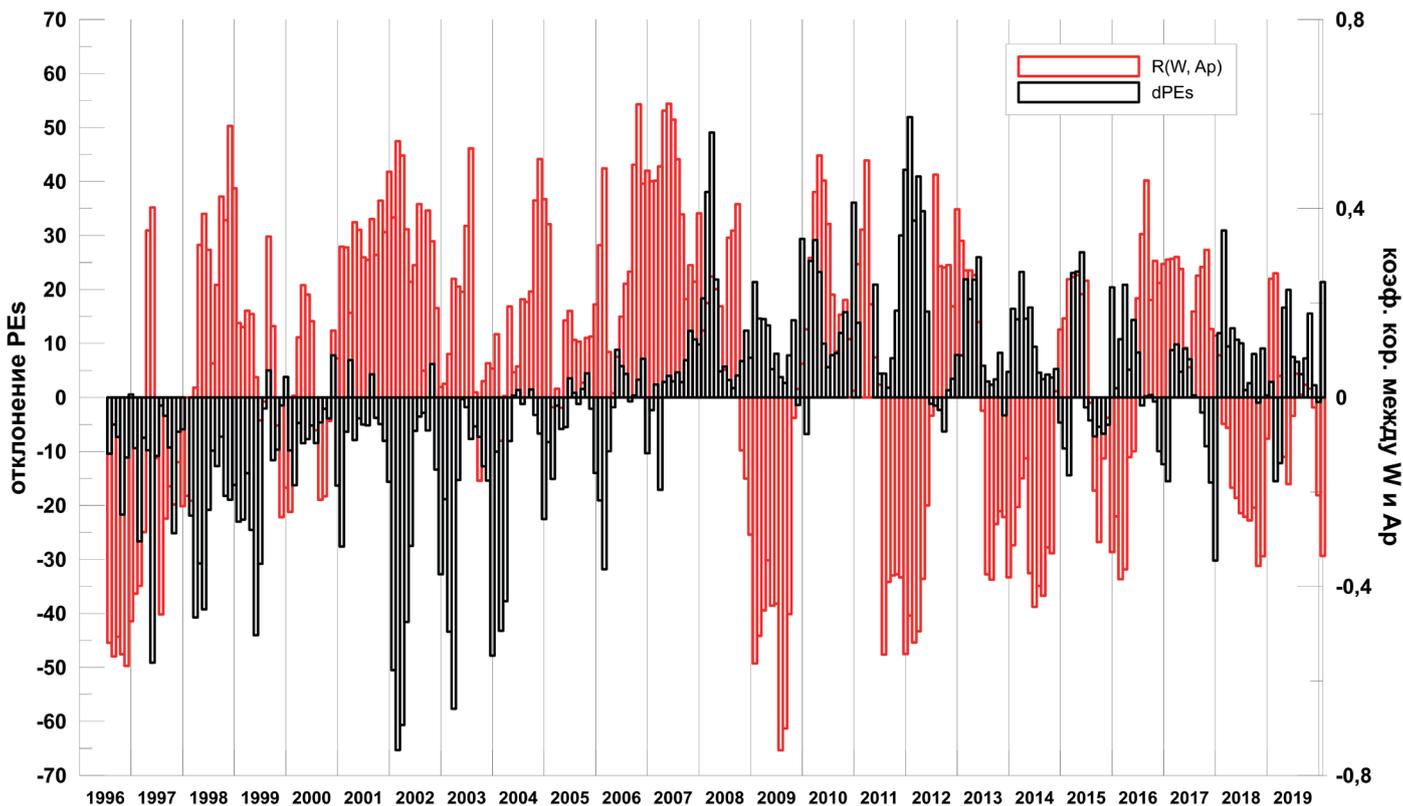


Рис. 3. Отклонение вероятности появления E_s от многолетнего среднемесячного и изменение связи солнечной и магнитной активностей

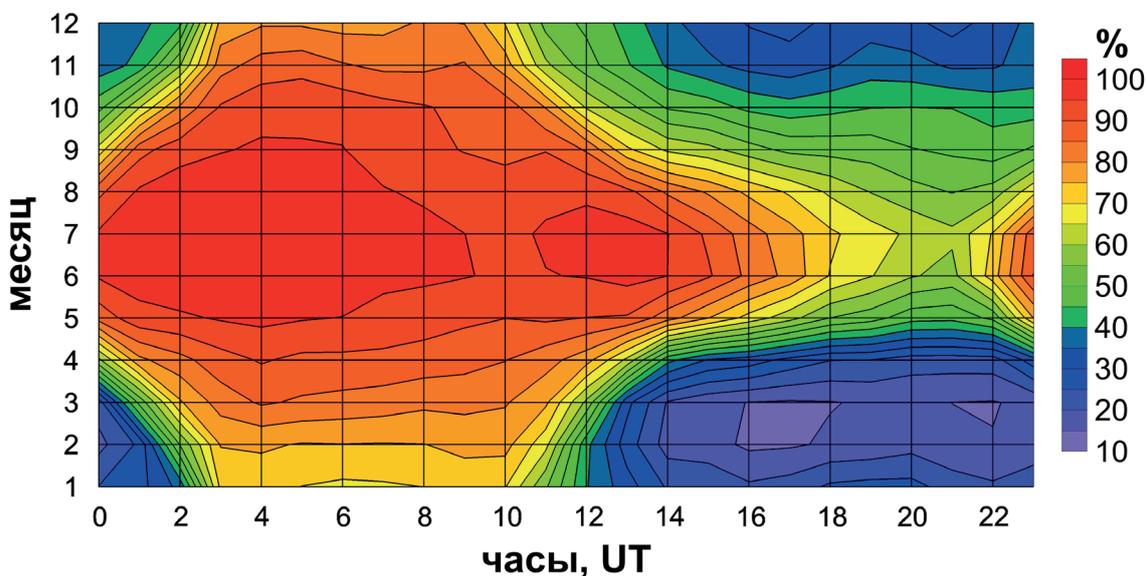


Рис. 4. Вероятность появления слоя E_s в зависимости от месяца наблюдения в конкретный час, 1996–2019 гг.

и геомагнитной активностями. На рис. 3 приведены скользящие коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями чисел Вольфа W и индексами магнитной активности Ap ($R(W, Ap)$). Можно заметить положительную корреляцию между солнечной и геомагнитной активностью в

течение 23-го цикла SA, тогда как в 24-м цикле SA мы видим чередование периодов с положительной и отрицательной корреляцией. Но и эти явления не могут служить объяснением зимнего «провала» в 2002–2003 годах, т.к. в это время был очень низкий $R(W,Ap)$. Аналогичные значения можно видеть и в 1998, 2005 и 2019 годах, но там нет эффекта в ионосфере. На этом же рис. 3 приведены отклонения наблюдаемой вероятности появления слоя Es от многолетних среднемесячных. Отчетливо наблюдается следующая картина: когда коэффициент корреляции в 24-м цикле SA меняет знак на короткие промежутки (практически каждый год), то мы видим более высокие вероятности появления слоя Es по сравнению с многолетними наблюдениями.

Что касается вероятности появления слоя Es в зависимости от месяца наблюдения в конкретный час, то ожидаемо наиболее вероятное время появления спорадического слоя с восхода до заката (рис. 4). А в зимние месяцы, начиная с 15UT, Es практически отсутствует. В остальные сезоны ночью 50%-ная вероятность. Из особенностей стоит отметить, что 100%-ное появление слоя Es в летние месяцы имеет 2 пика в период местного дня (с 00UT до 09UT) и потом в предзакатные часы с 11UT до 14UT.

Как известно, спорадические слои могут появляться на разных высотах. Над Новосибирском диапазон их наблюдений составляет от 100 до 190 км. При обработке данных по спорадическому слою высота с ионограммы округляется до 5 км. Нами была предпринята попытка выявить закономерность появления Es на той или иной высоте. Для этого мы рассмотрели количество случаев появления Es в различных высотных диапазонах; было выделено 5 эшелонов высоты: 100–110, 115–130, 135–150, 155–170 и 175–190 км. Анализ этих временных рядов выявил, что количество случаев появления Es в конкретных высотных диапазонах повторяет солнечный цикл: низкие Es (100–110 км) тяготеют к солнечному минимуму, а более высокие (115–130 км) – солнечному максимуму. На рис. 5 показано среднее количество случаев слоя Es в определенном высотном эшелоне в зависимости от месяца за период 1996–2019 гг. Здесь можно увидеть еще один интересный эффект: более низкие спорадические слои (100–130 км) в большем количестве появляются летом, а более высокие Es (> 135 км) – весной и зимой.

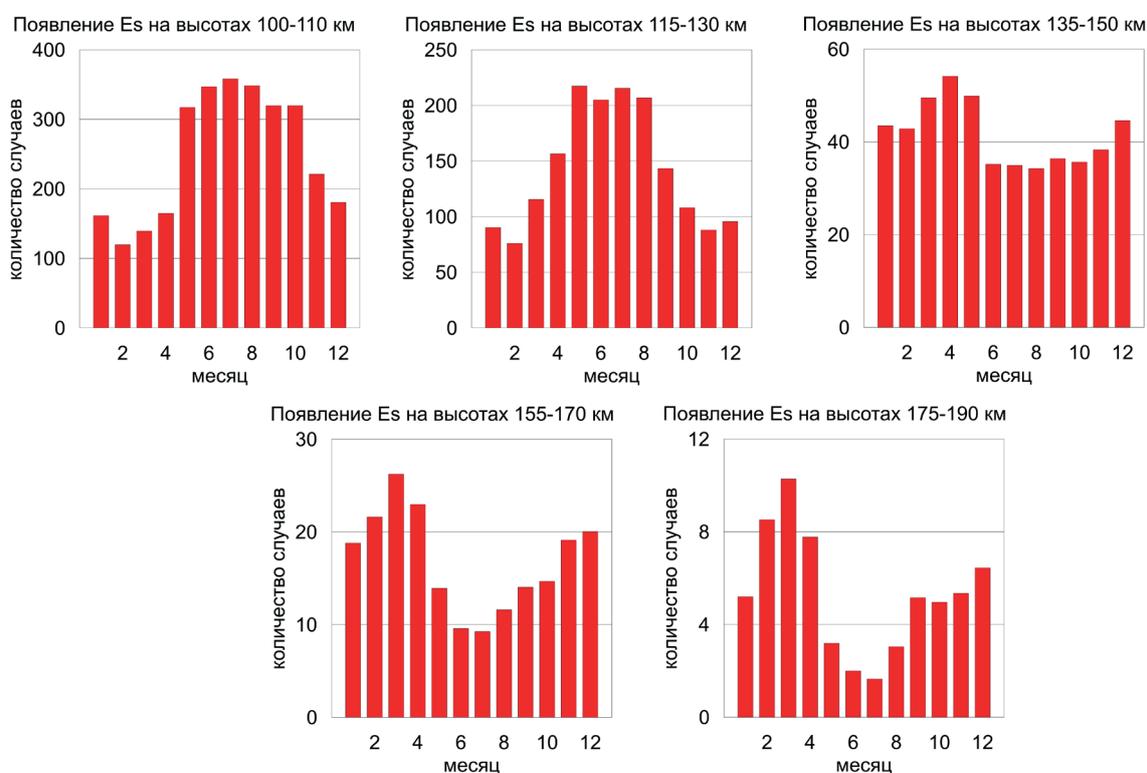


Рис. 5. Среднее количество случаев слоя Es в определенном высотном эшелоне в зависимости от месяца за период 1996–2019 гг.

В работе [Белинская и др., 2021] были рассмотрены параметры ионосферы до, во время, и после Бачатского землетрясения, которое произошло 18 июня 2013 г. Среди полученных результатов особо выделим, что за двое суток до основного толчка в нижней ионосфере наблюдались повышенные значения плотности ионизации в спорадических слоях и низкая высота образования этих структур. Надо отметить, что за весь месяц таких экстремальных отклонений не наблюдалось. Продолжая исследование в этом направлении, мы рассмотрели 22 землетрясения в период 1996–2019 гг., эпицентр которых был удален от ионосферной станции не более, чем на 300 км, и магнитуда была больше 3. Были вычислены отклонения количества слоев Es в месяц землетрясения от среднемесячных средних за весь период (в процентах), результат приведен в табл. 1.

Таблица 1.

год	месяц	100-110 км	115-130 км	135-150 км	155-170 км	175-190 км
1998	8	-34	49	-22	-48	-56
2000	3	18	3	-67	-74	–
2002	1	-44	-74	-98	–	–
2002	8	0	5	-40	-69	–
2005	9	31	-24	-50	-9	-11
2006	8	40	-43	-28	-38	–
2007	6	49	-45	-47	-41	–
2012	1	57	21	68	-50	116
2013	6	-3	40	15	76	118
2014	1	-10	28	60	169	175
2014	9	5	11	10	49	167
2016	7	30	-45	-36	3	–
2016	10	-13	-18	0	103	89
2016	11	-12	-23	23	37	185
2017	3	-35	-21	39	157	433
2018	3	-25	22	72	92	95
2019	1	-34	1	-11	-10	-61
2019	2	-58	-7	-33	2	32
2019	7	-9	32	34	176	243
2019	10	-27	42	120	150	306

Можно отметить, что наблюдается чаще повышенное образование высоких спорадических слоев, чем по многолетним наблюдениям. Вероятность появления Es в месяц, когда было событие, могла быть как выше, так и ниже, чем многолетнее среднее. Однозначного отклика не наблюдалось.

Заключение

Проведенный анализ характеристик спорадических слоев над Новосибирском за период с 1996 по 2019 гг. выявил следующие особенности:

- для летних месяцев характерна одинаково высокая вероятность появления слоя Es (практически 100%), а в зимние месяцы PEs сильно меняется при средних значениях около 40–45%. В январе-феврале 2002 года слой Es практически не наблюдался (PEs около 15%), а в декабре 2011 был частым явлением (PEs около 80%);

- при нестабильной взаимосвязи солнечной и геомагнитной активностей появление спорадического слоя более вероятно;
- наиболее вероятное время появления спорадического слоя приходится на период с восхода до заката вне зависимости от месяца наблюдения, причем летом имеется два пика, когда он наблюдается 100% – это местные дневные и предзакатные часы, минимальное PEs приходится на ночные часы зимой;
- количество случаев появления Es в конкретных высотных диапазонах повторяет солнечный цикл: низкие Es (100–110 км) чаще наблюдаются в солнечном минимуме, а более высокие (115–130 км) – в солнечном максимуме; более низкие спорадические слои (100–130 км) в большем количестве появляются летом, а более высокие Es (> 135 км) – весной и зимой.

Проведенное исследование выявило несколько неразрешенных проблем, например, почему появление спорадических слоев зимой сильно отличается от года к году или как влияет связь между солнечной и геомагнитной активностями на вероятность появления Es.

В работе [Laštovička, 2021] проведено сравнение использования нескольких индексов SA в ионосферных исследованиях. Показано, что для поиска долгосрочных трендов или климатологических исследований параметров ионосферы, а также для моделирования ионосферы лучше всего подходит индекс F10.7 для годовых значений foE, а индексы Mg II и F30 оказались лучшими как для годовых, так и для месячных значений foF2. Возможно, рассматривая вариации характеристик слоя Es в зависимости не от индекса W SA, а от других индексов, можно получить несколько иные результаты, чем приведены в этой работе.

Исследование спорадического слоя ионосферы будет продолжено путем привлечения данных не только за другие года и для других регионов, но и с привлечением других гелиогеофизических индексов.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FWZZ-2022-0019).

Список литературы

- Белинская А.Ю., Ковалев А.А., Семаков Н.Н., Белинская С.И. Вариации параметров ионосферы и геомагнитного поля во время Бачатского землетрясения 18 июня 2013 г. // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 1. С. 98–105.
- Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. Л. : Гидрометеоздат. 1976. 351 с.
- Гершман Б.Н., Игнатъев Ю.А., Каменецакая Г.Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя Es на различных широтах. М. : Наука, 1976. 107 с.
- Губенко В.Н., Кириллович И.А. Модуляция спорадических E-слоев мелкомасштабными атмосферными волнами в высокоширотной ионосфере Земли // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 3. С. 116–129.
- 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.
- Arras C., Wickert J., Beyerle G., et al. A global climatology of ionospheric irregularities derived from GPS radio occultation // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L14809.
- Kirkwood S., Nilsson H. High Latitude Sporadic E and other layers // Space Sci. Rev. 2000. V. 91. N 3/4. P. 579–613.
- Laštovička J. The best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations // Adv. Space Res. 2021. V. 68. P. 2354–2360.
- Whitehead J.D. Sporadic E layers: History and recent observations // Adv. Space Res. 1990. V. 10. N 10. P. 85–91.

VARIATIONS OF THE ES LAYER OVER NOVOSIBIRSK IN 23 AND 24 SOLAR CYCLES

A. Yu. Belinskaya*, A. A. Kovalev, V. E. Karlin

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS

Novosibirsk, Russia

**E-mail: BelinskayaAY@ipgg.sbras.ru*

Continuous observations have been carried out by vertical sounding at the ionospheric station in Novosibirsk (54.84°N, 83.23°E) since the late 1960s of the XX century. The digital ionosonde “PARUS” has been installed since 1995, thanks to which an archive of continuous series of ionospheric parameters obtained by one instrument in one place was accumulated in digital form. To study the morphological features of the behavior of the ionosphere over Novosibirsk, we chosen the critical frequency and virtual layer height Es (foEs and h' es, respectively) as parameters characterizing the state of the lower ionosphere. The accumulated material made it possible to analyze the observation probabilities (PEs) of this layer in each month depending on the time of day and height of appearance for the period from 1996 to 2019, which covers the 23rd and 24th eleven-year solar cycles. There was no direct dependence on the level of solar activity, which was represented by Wolf numbers (the number of sunspots). To study the conditions for the formation of the sporadic Es formation, the statistical relationship between solar and magnetic activities in the period from 1996 to 2019 was considered. It was shown that with an unstable relationship between solar and geomagnetic activities, the appearance of a sporadic layer is more likely. The probability of the appearance of Es shows a clear dependence on the season and hour of the day. In January-February 2002, the Es layer was rarely observed (PEs about 15%), while, as in other years, this value was on average 40-45%, and in 2011 it reached 80%. In July and August, the appearance of the Es layer is almost 100%. The most probable time of occurrence of the sporadic layer falls on the period from sunrise to sunset, regardless of the month of observation, and in summer there are two peaks, when it is observed 100% - these are local daytime and pre-sunset hours, the minimum PEs occur at night hours in winter. The number of occurrences of Es in specific altitude ranges is analyzed, the time series of this value repeats the solar cycle: low Es (100-110 km) are more often observed at solar minimum, and higher ones (115-130 km) - at solar maximum. A seasonal dependence was revealed: lower sporadic layers (100–130 km) appear in greater numbers in summer, and higher Es (> 135 km) in spring and winter. The formation of the Es layer during the preparation and realization of earthquakes in the region of 200–300 km from the ionospheric station is discussed. An unambiguous response of the lower ionosphere to these events has not been revealed.

Keywords: ionosphere, sporadic ionospheric layer, solar activity, solar eleven-year cycle, probability of occurrence of a sporadic ionospheric layer.