

ИНДЕКС СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ E -СЛОЯ

© 2023 г. М. Г. Деминов^{1, *}, В. И. Бадин¹, Р. Г. Деминов², Е. В. Непомнящая¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троцк, Россия

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 03.08.2023 г.

Индекс $P = (F_1 + F_{81})/2$ является оптимальным индексом солнечной активности для критической частоты E -слоя f_oE , где F_1 и F_{81} — поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см в данный день и среднее за 81 день значение этого потока, центрированное на данный день. Поэтому для вычисления F_{81} в данный день необходимо знание F_1 не только в этот и предыдущие дни, но и на 40 дней вперед. Вместо индекса F_{81} в задачах краткосрочного прогноза этого индекса может быть использован $F(27, 81)$ — средневзвешенный индекс солнечной активности с характерным временем 27 дней за данный и предыдущие 80 дней. Поэтому для вычисления индекса $F(27, 81)$ достаточно знания F_1 в данный день и предыдущие дни. В данной работе представлены первые оценки эффективности такой замены для f_oE . Для этого проанализированы изменения точности расчетов f_oE при замене индекса P на $P^* = (F_1 + F(27, 81))/2$ в эмпирических моделях, построенных по данным f_oE ионосферных станций в дневные часы на средних и субавроральных широтах за 1959–1995 гг. Получено, что индексы P и P^* практически эквиваленты для вычисления f_oE по построенным эмпирическим моделям на этих широтах; разница коэффициентов вариации для f_oE не превышает 0.3% в каждый из сезонов на разных фазах солнечных циклов. Следовательно, индекс P^* может быть рекомендован для использования в задачах краткосрочного прогноза f_oE , поскольку он основан на индексах F_1 за данный и предыдущие дни в отличие от индекса P , для вычисления которого необходим прогноз F_1 на 40 дней вперед.

DOI: 10.31857/S0016794023600424, EDN: PWMGLH

1. ВВЕДЕНИЕ

Слой E ионосферы в дневные часы на субавроральных и более низких широтах образуется в результате ионизации атмосферы крайним ультрафиолетовым и мягким рентгеновским излучением Солнца и определяется балансом ионизационно-рекомбинационных процессов [Solomon, 2006; Pavlov and Pavlova, 2013]. Для этих процессов в качестве индикаторов солнечной активности обычно используют линейную комбинацию индексов F_1 и F_{81} — потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см в данный день и среднего за 81 день значения этого потока, центрированного на данный день. Например, индекс $P = (F_1 + F_{81})/2$ использован в моделях солнечного излучения EUVAC [Richards et al., 1994] и HEUVAC [Richards et al., 2006]. В модели крайнего ультрафиолетового излучения Солнца для общей циркуляции атмосферы использованы линейные комбинации индексов P , F_1 и F_{81} [Solomon and Qian, 2005].

В модели солнечного излучения Solar-SPAM использован индекс F_1 [Nikolaeva and Gordeev, 2023].

В базовом варианте международной справочной модели ионосферы (IRI) использован индекс Rz_{12} для оценки критической частоты E -слоя f_oE , где Rz_{12} — среднее за 12 месяцев число солнечных пятен [Bilitza, 2018]. Этот вариант модели дает средние за месяц (медианные) значения f_oE . Дополнительный анализ показал, что модель IRI можно применить и для вычисления ежедневных значений f_oE , если использовать индексы F_1 или F_{81} вместо Rz_{12} с учетом корреляционной связи между индексами Rz и F [Yang et al., 2017]. При этом индекс F_{81} дает большее увеличение точности вычисления f_oE по модели IRI, чем F_1 . Анализ ежедневных данных ст. Москва без разделения на сезоны показал, что для коэффициента корреляции f_oE с линейной комбинацией F_1 и F_{81} существует широкий максимум вблизи $P = (F_1 + F_{81})/2$ [Антонова и др., 1996]. Тем не менее, для ст. Москва двухкомпонентная модель f_oE с индексом P не на-

много точнее однокомпонентных моделей foE с индексами F_1 или F_{81} [Антонова и др., 1996].

Детальный анализ вклада индексов F_1 и F_{81} в foE по дневным данным ионосферных станций на субавроральных и средних широтах показал, что индекс P является оптимальным индикатором солнечной активности для foE во все сезоны [Демин, 2022а; Демин и Рогов, 2022]. Использование индекса F_{81} в задачах краткосрочного прогноза параметров солнечного излучения и ионосферы затруднительно, поскольку для вычисления F_{81} необходим прогноз F_1 на 40 дней вперед. Был выполнен поиск индекса солнечной активности $F(T, N)$ для замены F_{81} в этих задачах, где $F(T, N)$ — кумулятивный (средневзвешенный с характерным временем T в сутках) индекс этой активности, вычисленный по данным F_1 за данный и предыдущие N дней [Демин, 2022б]:

$$F(T, N) = \sum_{n=0}^N F_1(-n) \tau^n / \sum_{n=0}^N \tau^n, \quad (1)$$

где $\tau = \exp(-1/T)$, индекс $n = 0$ соответствует данному дню. Этот поиск был основан на определении оптимальных параметров T, N из условия минимума среднеквадратичного отклонения индекса $F(T, N)$ от F_{81} при относительно низких значениях N . Было получено, что индекс $F(27, 81)$ с параметрами $T = 27$ и $N = 3T$ является искомым эффективным индексом солнечной активности для замены F_{81} в задачах краткосрочного прогноза параметров солнечного излучения [Демин, 2022б].

Эффективность использования индекса $F(27, 81)$ для вычисления параметров ионосферы ранее не рассматривалась. Целью данной работы было решение этой задачи для foE в дневные часы на субавроральных и средних широтах. Для этого использованы индексы

$$P = (F_1 + F_{81})/2, \quad P^* = (F_1 + F(27, 81))/2. \quad (2)$$

Итак, если замена индекса P на индекс P^* в задаче вычисления foE не приводит к уменьшению точности этого вычисления при известных F_1, F_{81} и $F(27, 81)$, то индекс P^* имеет преимущество перед индексом P в задаче краткосрочного прогноза foE , поскольку не требует прогноза F_1 на 40 дней вперед.

Ниже последовательно представлены результаты анализа точности использования индекса P или P^* в задачах создания эмпирических моделей foE по данным ионосферных станций и использования этих индексов в одной из известных эмпирических моделей foE .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Один из способов создания модели foE для дневных часов по данным конкретной станции

основан на определении коэффициентов уравнения регрессии по массиву данных foE этой станции:

$$r(F) = (foE/foE(66)_{IRI})^4 = a + b(F - 66) \pm \sigma, \quad (3)$$

где foE — критическая частота E -слоя по данным ионосферной станции для конкретных геофизических условий (географические широта и долгота, год, день года, местное время, индекс солнечной активности F), $foE(66)_{IRI}$ — критическая частота E -слоя по базовой модели IRI для этих геофизических условий за одним исключением: индекс солнечной активности $F = 66$. Уравнение (3) при известных коэффициентах a и b является эмпирической моделью величины $r(F)$ и, следовательно, foE по данным выбранной станции, поскольку величина $foE(66)_{IRI}$ известна по модели IRI. В данном случае сравнение стандартных отклонений σ моделей $r(F)$ для двух вариантов ($F = P$ и $F = P^*$) позволяет судить об эффективности замены индекса P на индекс P^* в задаче создания эмпирической модели foE по данным конкретной ионосферной станции.

Дополнительные условия, которые были приняты для получения устойчивых закономерностей, аналогичны принятым в работе [Демин, 2022а]. В уравнении (3) использованы средние из пяти часовых значений $r(F)$ для данного дня: местный полдень, два часа до и два часа после полудня. Данные foE для каждого часа обычно определены по мировому времени, поэтому местный полдень в данном случае означает ближайшее к полудню измерение foE . Из этих пяти часовых значений $r(F)$ в данный день оставлялись значения, которые соответствуют не очень высокой геомагнитной активности: $Kp^* < 4$. Кроме того, если для данного дня число значений $r(F)$ меньше трех, то данный день исключался из рассмотрения. Индекс Kp^* определен по средневзвешенному (с весовым коэффициентом $\tau = 0.6$) индексу геомагнитной активности $ap(\tau)$:

$$Kp^* = 2.1 \ln(0.2ap(\tau) + 1), \quad (4)$$

где [Wrenn, 1987]

$$ap(\tau) = (1 - \tau)(ap_0 + ap_{-1}\tau + ap_{-2}\tau^2 + \dots),$$

ap_0, ap_{-1} и т.д. — значения ap -индекса в данный, предыдущий и т.д. трехчасовые интервалы. Индекс Kp^* использовался для учета зависимости широты главного ионосферного провала (ГИП) от геомагнитной активности. Широта ГИП до некоторой степени является экваториальной границей авроральной области [Гальперин и др., 1990]. Тем самым косвенно учтено, что расширение авроральной области и увеличение джоулева нагрева термосферы в этой области может быть причиной изменения foE на субавроральных и средних широтах. Обычно влияние геомагнитной актив-

Таблица 1. Ионосферные станции, их географические координаты, коэффициенты вариации $c_v(P)$ и $c_v(P^*)$ эмпирических моделей (3) для зимы, равноденствия и лета, вычисленные по данным foE этих станций для дневных часов при $Kp^* < 4$

№	Станция	Координаты	$c_v(P)$, % зима/равн./лето	$c_v(P^*)$, % зима/равн./лето
1	Boulder	40.0° N, 254.7° E	10.2/9.8/14.1	10.6/9.8/14.2
2	Wakkanai	45.4° N, 141.7° E	9.8/9.7/11.2	10.1/10.3/11.7
3	Slough	51.5° N, 359.4° E	11.0/10.9/12.1	11.4/11.3/12.6
4	Juliusruh	54.6° N, 13.4° E	16.2/11.2/11.8	16.7/11.3/12.1
5	Tomsk	56.5° N, 84.9° E	13.8/11.0/8.6	14.0/11.1/9.3
6	Leningrad	60.0° N, 30.7° E	20.5/11.8/12.4	20.6/11.8/13.2
7	Lykseele	64.6° N, 18.8° E	29.6/13.4/12.0	29.8/13.6/12.3
8	Salekhard	66.5° N, 66.5° E	28.4/12.9/9.0	28.3/12.7/9.1

ности на изменения foE на средних широтах не превышает нескольких процентов [Антонова и др., 1996], что и определило выбор критерия $Kp^* < 4$ для анализируемых станций.

В базовой модели IRI уравнение (3) имеет вид:

$$r_{\text{IRI}} = (foE_{\text{IRI}}/foE(66)_{\text{IRI}})^4 = 1 + B(\text{COV} - 66), \quad (5)$$

где $B = 0.0094$, COV – среднее за 12 месяцев значение индекса солнечной активности F . Отметим, что в базовой модели IRI для вычисления foE использована эмпирическая модель [Kouris and Muggleton, 1973a, b]. Более детальная модель (ниже она названа моделью ИПГ) показывает, что коэффициент B может зависеть от широты и сезона [Нусинов, 1988; Nusinov, 2006]. Модель foE [Titheridge, 1996] в NeQuick [Nava et al., 2008] также содержит зависимость от сезона коэффициента, аналогичного коэффициенту B в уравнении (5). Это означает, что коэффициенты уравнения (3) могут зависеть от сезона. Здесь использовано разделение месяцев года по сезонам по аналогии с моделью NeQuick: зима (11, 12, 1, 2), равноденствие (3, 4, 9, 10), лето (5, 6, 7, 8), где в скобках указан номер месяца.

Для анализа использованы часовые данные foE субавроральных и среднеширотных ионосферных станций за 1959–1995 гг. В качестве характеристики точности уравнения (3) по данным foE конкретной станции в дневные часы каждого сезона для $Kp^* < 4$ использован коэффициент вариации

$$c_v(F) = (\sigma(F)/r(F)_{\text{mean}}) \times 100\%, \quad (6)$$

где $\sigma(F)$ и $r(F)_{\text{mean}}$ – стандартное отклонение и среднее значение величины $r(F)$ в локальной эмпирической модели (3) для данной выборки foE , $F = P$ или $F = P^*$. Коэффициент вариации называют также относительным стандартным отклонением [Гмурман, 2003]. Результаты вычисления коэффициентов вариации $c_v(P)$ и $c_v(P^*)$ по дан-

ным ионосферных станций для выбранных условий приведены в табл. 1, где индексы солнечной активности P и P^* определены уравнениями (2). Из данных в этой таблице можно видеть, что величины $c_v(P)$ и $c_v(P^*)$ изменяются с широтой и сезоном в пределах 9–30%, для относительно низких широт (до 50° N) летом значения коэффициентов вариации больше, чем зимой, на более высоких широтах зимние значения этих коэффициентов больше летних. Самые высокие значения $c_v(P)$ и $c_v(P^*)$ наблюдаются зимой на субавроральных широтах. Для всех приведенных в табл. 1 данных разница между $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ для выбранной станции данного сезона меньше 1%, или $(c_v(P^*)/c_v(P) - 1) < 0.1$. В табл. 1 значимыми являются только целые значения коэффициентов вариации [Taylor, 1982], десятичные доли этих коэффициентов приведены только для сравнения $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$. Следовательно, индексы P и P^* обеспечивают практически одинаковую точность вычисления foE для дневных часов по локальным эмпирическим моделям для субавроральных и средних широт, если судить по данным в табл. 1.

Коэффициенты $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$, приведенные в табл. 1, получены для интервала 1959–1995 гг. без разделения по фазам солнечных циклов. Для периодов роста или спада солнечных циклов разница между этими коэффициентами может быть более значительной из-за систематического изменения индексов солнечной активности со временем. В табл. 2 приведены коэффициенты $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ с разделением по фазам солнечных циклов в интервале 1959–1995 гг. В данном случае фазе роста солнечных циклов соответствуют интервалы 1964–1968, 1976–1979, 1986–1989 гг., фазе спада солнечных циклов – интервалы 1959–1964, 1970–1976, 1981–1986, 1990–1996 гг. Из данных в табл. 2 можно видеть, что для ст. Ленинград (Leningrad) летом на фазе роста солнечных циклов разница между $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ составляет 1.3% и, кроме того, значения $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ на этой фазе

Таблица 2. Ионосферные станции, их географические координаты, коэффициенты вариации $c_v(P)$ и $c_v(P^*)$ эмпирических моделей (3) для зимы, равноденствия и лета, вычисленные по данным foE этих станций для дневных часов при $Kp^* < 4$ для фаз роста и спада солнечных циклов в интервале 1959–1995 гг.

№	Станция	Координаты	$c_v(P)$, % зима/равн./лето	$c_v(P^*)$, % зима/равн./лето
Фаза роста солнечных циклов				
1	Boulder	40.0° N, 254.7° E	10.0/9.3/12.1	10.1/9.1/12.0
2	Slough	51.5° N, 359.4° E	11.6/11.7/12.4	12.2/12.1/12.6
3	Juliusruh	54.6° N, 13.4° E	14.3/10.6/10.1	14.9/10.2/10.8
4	Leningrad	60.0° N, 30.7° E	21.2/12.7/15.2	21.0/12.6/16.5
5	Lykseele	64.6° N, 18.8° E	28.0/14.6/13.9	27.9/14.2/14.0
Фаза спада солнечных циклов				
1	Boulder	40.0° N, 254.7° E	12.8/12.2/16.1	13.5/12.5/16.5
2	Slough	51.5° N, 359.4° E	12.5/12.5/13.4	13.3/13.0/14.0
3	Juliusruh	54.6° N, 13.4° E	18.7/14.1/14.1	19.4/14.6/14.3
4	Leningrad	60.0° N, 30.7° E	21.1/13.7/13.1	21.4/13.5/13.8
5	Lykseele	64.6° N, 18.8° E	30.9/15.6/13.8	31.0/16.2/14.5

больше, чем для фазы спада солнечных циклов. Для всех остальных случаев, приведенных в табл. 2, разница между $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ меньше 1% и значения $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ на фазе роста солнечных циклов меньше, чем для фазы спада солнечных циклов. Возможная причина приведенной особенности массива данных foE для ст. Ленинград летом связана с дополнительным вкладом $foEs$ в этот массив, поскольку частота появления спорадического слоя E повышена именно летом и слои E и Es не всегда различаются однозначно. Итак, индексы солнечной активности P и P^* обеспечивают практически одинаковую точность вычисления foE для дневных часов по локальным эмпирическим моделям для субавроральных и средних широт для фаз роста или спада солнечных циклов. Приведенная выше особенность ст. Ленинград не является исключением из этого правила. Она показывает, что даже в сложных случаях обработки ионограмм разница между $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ составляет примерно 1%. Отметим, что в табл. 1 и 2 приведены коэффициенты вариации $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ для величины $r(F)$, которая пропорциональна $(foE)^4$. Поэтому для foE эти коэффициенты в 4 раза меньше и разница между $c_v(P^*)$ и $c_v(P)$ не превышает 0.2% для этого случая, если основываться на данных, приведенных в табл. 1.

Приведенные выше результаты сравнения точности использования индексов P и P^* для вычисления foE основаны на построении локальной эмпирической модели (3) по массиву данных foE выбранной станции. Представляет интерес оценка точности использования этих индексов в глобальных эмпирических моделях foE с учетом солнечного источника ионизации атмосферы. Од-

ной из таких моделей является модель NeQuick [Nava et al., 2008]. Используемая здесь модель NeQuick отличается от базового варианта использованием индекса солнечной активности F : в данном случае $F = P$ или $F = P^*$, в базовом варианте F — это среднее за 12 месяцев значение потока радиационного излучения Солнца на длине волны 10.7 см, где индексы P и P^* определены уравнениями (2). Отметим, что модель NeQuick для варианта $F = P$ использовалась как солнечный компонент модели foE в Системе мониторинга и прогноза ионосферы SIMP-2 [Демин и др., 2019]. На рис. 1 показаны результаты сопоставления foE в полдень для $Kp^* < 4$ в интервале 1959–1995 гг., полученные по экспериментальным данным и по модели NeQuick для $F = P$ и $F = P^*$ для станций Боулдер (Boulder), Слау (Slough) и Юлиусрух (Juliusruh/Rugen). Координаты этих станций приведены в табл. 1 и 2. Данные на этом рисунке получены без разделения на сезоны и фазы солнечных циклов. Из данных на этом рисунке следует, что максимальная разница между коэффициентами вариации $c_v(P)$ и $c_v(P^*)$ наблюдается для ст. Слау и составляет 0.1%. В данном случае значимыми являются только целые значения $c_v(P)$, поэтому с достаточной точностью $c_v(P) = c_v(P^*) = 4\%$ для всех приведенных на рисунке станций.

Итак, индексы P и P^* являются эквивалентными индексами солнечной активности, поскольку они приводят к практически совпадающим значениям foE в дневные часы как при использовании локальных эмпирических моделей foE на субавроральных и средних широтах, так и глобальных эмпирических моделей foE на средних широтах. В то же время индекс P^* имеет преимущество пе-

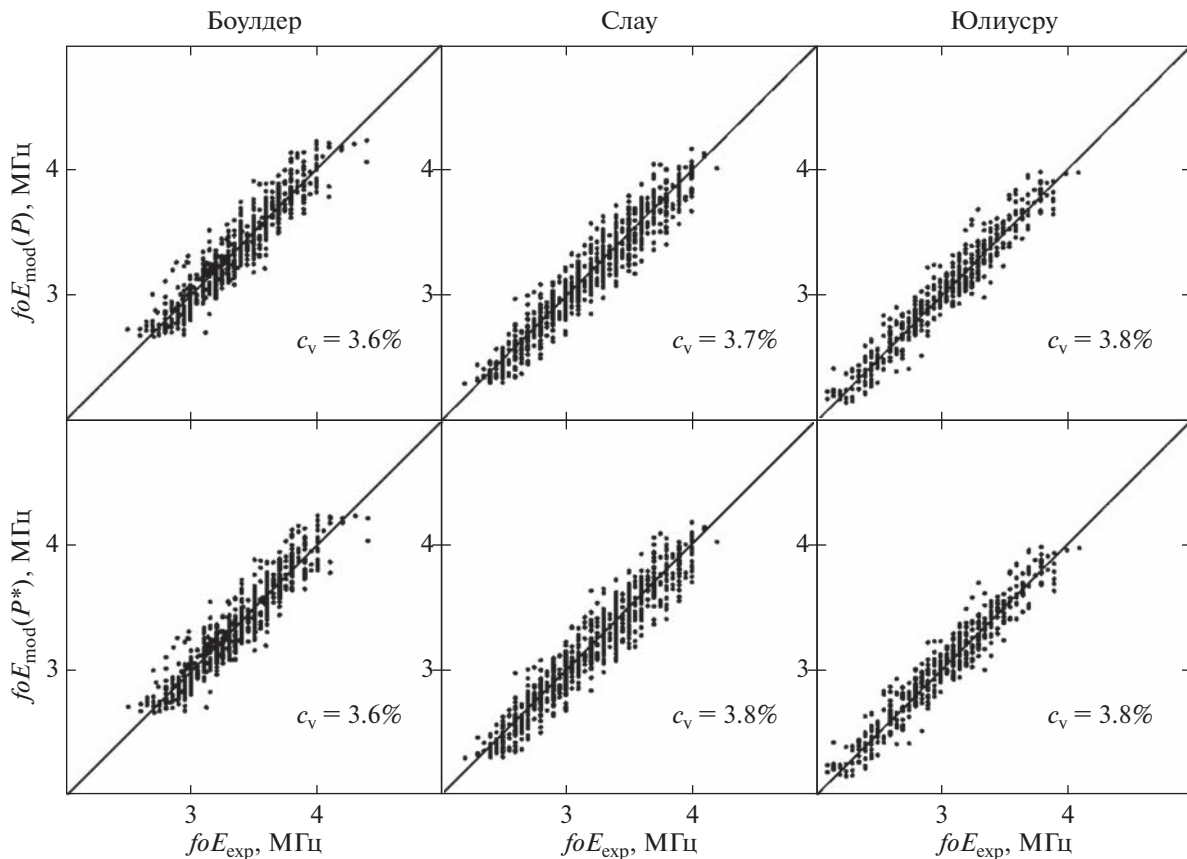


Рис. 1. Сравнение измеренных значений критической частоты E -слоя foE_{exp} на трех станциях при $Kp^* < 4$ в полдень в интервале 1959–1995 гг. с результатами расчетов foE_{mod} по модели NeQuick для индексов солнечной активности P (верхняя панель) и P^* (нижняя панель); c_v — коэффициент вариации модели. Для наглядности точки на рисунке соответствуют каждому 10-му значению foE из массива данных.

ред индексом P в задачах краткосрочного прогноза foE , поскольку в отличие от индекса P для вычисления P^* не требуются знания потока солнечного радиоизлучения в последующие 40 дней.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Выше отмечалось, что при построении локальных эмпирических моделей foE использована зависимость $r(F)$ от F в виде уравнения регрессии (3), где $r(F) \sim (foE)^4$. Поэтому приведенные в табл. 1 и 2 коэффициенты вариации c_v для уравнения регрессии (3) примерно в 4 раза больше, чем для модели foE при прочих равных условиях. В данном случае, например, для ст. Боулдер коэффициент вариации c_v для foE по локальной модели изменяется в пределах 2.5–3.6% в зависимости от сезона (табл. 1). Модель NeQuick для foE на этой станции дает $c_v = 3.6\%$ без разделения на сезоны (рис. 1). Это отражает общую тенденцию относительно высокой точности локальной модели для данной станции по сравнению с глобальной моделью.

Коэффициент вариации c_v характеризует изменчивость foE . Из данных в табл. 1 и 2 следует, что эта изменчивость зимой на относительно высоких широтах больше, чем на низких широтах. Для лета характерна противоположная тенденция. Повышенная изменчивость foE зимой на относительно высоких широтах, по-видимому, связана с дополнительным вкладом в foE аврорального источника ионизации атмосферы из-за выпадения электронов с энергиями 1–10 кэВ. Еще одним фактором, влияющим на изменчивость foE , может быть геомагнитная активность. Принятое условие $Kp^* < 4$ позволяет исключить до некоторой степени эффекты геомагнитных бурь, но не суббурь. Обычно геомагнитная активность на фазе роста солнечного цикла меньше, чем на фазе спада. Поэтому можно ожидать, что изменчивость foE на фазе роста солнечного цикла меньше, чем на фазе спада. Из табл. 2 следует, что эта тенденция выполнена почти для всех приведенных в этой таблице данных. Эти данные показывают также, что увеличенная изменчивость foE на фазе спада солнечного цикла не привела к увеличению

разницы между коэффициентами вариации $c_v(P)$ и $c_v(P^*)$ для данной фазы: она меньше 1% для каждого сезона и каждой станции, приведенной в табл. 2. Это подтверждает эквивалентность индексов P и P^* в задачах вычисления foE по эмпирическим моделям ионосферы.

Радиоизлучение Солнца не является единственным индикатором солнечной активности для расчета ионизации атмосферы мягким рентгеновским и крайним ультрафиолетовым излучением Солнца как основной причины образования E -слоя ионосферы на средних широтах. В качестве такого индикатора может быть использован поток солнечного излучения в линии Лайман-альфа ($L\alpha$, $\lambda = 121.6$ нм). Поток излучения в линии $L\alpha$ был использован, например, как входной параметр модели спектра солнечного излучения в диапазонах 5–105 нм и 115–242 нм [Nusinov et al., 2021]. В данной работе поток солнечного излучения в линии $L\alpha$ не использовался по единственной причине: он пока не прогнозируется, а индекс P^* имеет прогностическую направленность.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее было получено, что индекс $P = (F_1 + F_{81})/2$ является оптимальным индексом солнечной активности для критической частоты E -слоя foE , где F_1 и F_{81} — поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см в данный день и среднее за 81 день значение этого потока, центрированное на данный день. Было получено также, что индекс $F(27, 81)$ может быть использован для замены индекса F_{81} в задачах краткосрочного прогноза этого индекса, где $F(27, 81)$ — средневзвешенный индекс солнечной активности с характерным временем 27 дней за данный и предыдущие 80 дней. В данной работе даны первые оценки эффективности такой замены для foE . Для этого проанализированы изменения точности расчетов foE при замене индекса P на $P^* = (F_1 + F(27, 81))/2$ в эмпирических моделях, построенных по данным foE ионосферных станций в дневные часы на средних и субавроральных широтах за 1959–1995 гг. Получены следующие выводы.

1. Индексы P и P^* практически эквиваленты для вычисления foE по построенным эмпирическим моделям на этих широтах: разница коэффициентов вариации для foE не превышает 0.3% в каждый из сезонов на разных фазах солнечных циклов. Следовательно, индекс P^* может быть рекомендован для использования в задачах краткосрочного прогноза foE , поскольку он основан на индексах F_1 за данный и предыдущие дни в отличие от индекса P , для вычисления которого необходим прогноз F_1 на 40 дней вперед.

2. Дополнительные оценки коэффициентов вариации для foE на средних широтах в полдень

по известной глобальной модели NeQuick подтверждают этот вывод: разница коэффициентов вариации для $foF2$ при замене индекса P на P^* не превышает 0.1%.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят WDC for Solar-Terrestrial Physics, Великобритания, за данные foE ионосферных станций и индексы солнечной активности (<http://www.ukssdc.ac.uk/wdccc1/>); WDC for Geomagnetism, Япония, за данные ap -индекса (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при частичной поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта № 20-72-10023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Л.А., Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. Аэрономия слоя Е (учет вариаций УФ-излучения и геомагнитных возмущений). М.: Янус, 168 с. 1996.
- Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 192 с. 1990.
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 479 с. 2003.
- Деминов М.Г., Михайлов А.В., Михайлов В.В., Шубин В.Н., Цыбуля К.Г. Ионосферное моделирование и прогнозирование / Системный мониторинг ионосферы. Сб. науч. тр. (Ред. Н.Г. Котонаева). М.: ФИЗМАТ-ЛИТ. С. 286–343. 2019.
- Деминов М.Г. Индекс солнечной активности для критической частоты E -слоя на средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 2. С. 206–210. 2022a. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020055>
- Деминов М.Г. Эффективный индекс солнечной активности для краткосрочного прогноза среднего индекса этой активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 3. С. 302–306. 2022б. <https://doi.org/10.31857/S0016794022030051>
- Деминов М.Г., Rogov Д.Д. Индекс солнечной активности для критической частоты E -слоя на субавроральных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 5. С. 627–634. 2022. <https://doi.org/10.31857/S0016794022050042>
- Нусинов А.А. Детерминированная модель среднеширотного и экваториального E -слоя (описание и сравнительные характеристики точности) // Ионосферные исслед. № 44. С. 94–99. 1988.
- Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere // Adv. Radio Sci. V. 16. P. 1–11. 2018. <https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018>
- Kouris S.S., Muggleton L.M. Diurnal variation in the E-layer ionization // J. Atmos. Terr. Phys. V. 35. P. 133–139. 1973a. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(73\)90221-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90221-3)
- Kouris S.S., Muggleton L.M. World morphology of the Appleton E-layer seasonal anomaly // J. Atmos. Terr. Phys.

- V. 35. 141–151. 1973b.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(73\)90222-5](https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90222-5)
- *Nava B., Coisson P., Radicella S.M.* A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 70. P. 1856–1862. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015>
- *Nikolaeva V., Gordeev E.* SPAM: Solar spectrum prediction for applications and modeling // *Atmosphere*. V. 13. 226. 2023.
<https://doi.org/10.3390/atmos14020226>
- *Nusinov A.A.* Seasonal-latitudinal variations of ionospheric E-layer critical frequencies dependence on solar activity in empirical models // *Adv. Space Res.* V. 37. P. 433–436. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.11.017>
- *Nusinov A.A., Kazachevskaya T.V., Katyushina V.V.* Solar extreme and far ultraviolet radiation modeling for aeronomic calculations // *Remote Sens.* V. 13, 1454. 2021.
<https://doi.org/10.3390/rs13081454>
- *Pavlov A.V., Pavlova N.M.* Comparison of NmE measured by the boulder ionosonde with model predictions near the spring equinox // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 102. P. 39–47. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.006>
- *Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G.* EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations // *J. Geophys. Res.* V. 99. P. 8981–8992. 1994.
<https://doi.org/10.1029/94JA00518>
- *Richards P.G., Woods T.N., Peterson W.K.* HEUVAC: A new high resolution solar EUV proxy model // *Adv. Space Res.* V. 37. P. 315–322. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.06.031>
- *Solomon S.C., Qian L.* Solar extreme-ultraviolet irradiance for general circulation models // *J. Geophys. Res.* V. 110. A10306. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011160>
- *Solomon S.C.* Numerical models of the E-region ionosphere // *Adv. Space Res.* V. 37. P. 1031–1037. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.09.040>
- *Taylor J.R.* An introduction to error analysis. Mill Valley, CA: Univer. Sci. Books, 270 p. 1982.
- *Titheridge J.E.* Re-modeling the ionospheric E region // *Kleinheubacher Berichte*. V. 39. P. 687–696. 1996.
- *Wrenn G.L.* Time-weighted accumulations $ap(\tau)$ and $Kp(\tau)$ // *J. Geophys. Res.* V. 92. P. 10125–10129. 1987.
<https://doi.org/10.1029/JA092iA09p10125>
- *Yang Z., Ssessanga N., Tran L.T., Bilitza D., Kenpankho P.* On improvement in representation of foE in IRI // *Adv. Space Res.* V. 60. P. 347–356. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.008>