

УДК 550.388.2

ИНДЕКС СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ E -СЛОЯ НА СУБАВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

© 2022 г. М. Г. Деминов¹, *, Д. Д. Рогов²¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.

После доработки 28.03.2022 г.

Принята к публикации 25.05.2022 г.

На основе анализа данных субавроуральных ионосферных станций в дневные часы при низкой геомагнитной активности получено, что индекс $P = 0.5(F_1 + F_{81})$ является оптимальным индексом солнечной активности для ежедневных значений 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. Стандартные отклонения σ зависимости foE от P максимальны для зимы. В этот сезон для станций Салехард и Люкселе, которые расположены на полярном круге и вблизи него, величина σ существенно больше, чем для ст. Ленинград. Подстановка индекса P в модели ИПГ, IRI или NeQuick позволяет использовать эти модели для вычисления ежедневных значений foE . На основе предварительного анализа получено, что модель NeQuick точнее моделей ИПГ и IRI для зимы и равноденствий. Для лета эти модели обладают примерно одинаковой точностью с небольшим преимуществом модели ИПГ. Для станций Салехард и Люкселе зимой при $foE < 2$ МГц даже модель NeQuick занижает значения foE в среднем примерно на 0.2 МГц. Поиск причин этого свойства ионосферы требует специального рассмотрения.

DOI: 10.31857/S0016794022050042

1. ВВЕДЕНИЕ

Между ионосферой средних широт и авроральной области расположена субавроуральная ионосфера [Гальперин и др., 1990]. Слой E ионосферы в дневные часы на субавроуральных и более низких широтах образуется, в основном, 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 NEUVAC [Richards et al., 2006]. В модели крайнего ультрафиолетового излучения Солнца для вычисления общей циркуляции атмосферы использованы линейные комбинации индексов F_1 и F_{81} [Solomon and Qian, 2005].

В базовой версии международной справочной модели ионосферы (IRI) использован индекс Rz_{12} для оценки критической частоты E -слоя foE , где Rz_{12} — среднее за 12 месяцев число солнечных пятен [Bilitza, 2018]. Эта версия модели дает средние за месяц (медианные) значения foE . Дополнительный анализ показал, что модель IRI можно применить и для вычисления ежедневных значений foE , если использовать индексы F_1 или F_{81} вместо Rz_{12} с учетом корреляционной связи между солнечными индексами Rz и F [Yang et al., 2017]. При этом индекс F_{81} дает большее увеличение точности вычисления foE по модели IRI, чем F_1 [Yang et al., 2017]. Анализ ежедневных данных ст. Москва без разделения на сезоны показал, что для коэффициента корреляции foE 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 foE с индексом P не намного точнее однокомпонентных моделей foE с индексами F_1 или F_{81} [Антонова и др., 1996]. Более детальный анализ показал, что индекс P является оптимальным ин-

дексом солнечной активности для ежедневных значений f_oE на средних широтах [Деминов, 2022a]. Кроме того, было получено, что величина стандартного отклонения зависимости f_oE от P в дневные часы различна для разных сезонов и в разных областях средних широт [Деминов, 2022a].

Свойства f_oE в освещенной Солнцем субавроральной ионосфере и на средних широтах могут не совпадать по многим причинам. К ним относится увеличенная концентрация окиси азота $n(\text{NO})$, которая максимальна в авроральной области и может быть значительна на субавроральных широтах [Barth et al., 2003]. В свою очередь, увеличение $n(\text{NO})$ может привести к увеличению f_oE [Swider and Keneshea, 1993]. Высыпания энергичных электронов в плазмосфере (вблизи плазмопаузы) из-за их взаимодействия с электромагнитными волнами КНЧ-ОНЧ-диапазона, по-видимому, могут быть причиной дополнительного увеличения f_oE на субавроральных широтах даже при низкой геомагнитной активности [Лайонс и Уильямс, 1987; Tsurutani et al., 2019; He et al., 2020; Ma et al., 2021]. Это определило целесообразность поиска оптимального индекса солнечной активности для f_oE на субавроральных широтах. Решение данной задачи для освещенной Солнцем субавроральной области E ионосферы при низкой геомагнитной активности было главной целью данной работы. Ниже представлены результаты решения этой задачи. Они включают не только определение оптимального индекса солнечной активности для f_oE с учетом сезонных особенностей изменений f_oE , но и оценку эффективности включения этого индекса в известные эмпирические модели ионосферы для вычисления f_oE на субавроральных широтах.

2. МЕТОДИКА

Для анализа использованы имеющиеся данные f_oE станций Ленинград (Leningrad, 60.0° N, 30.7° E, $\Phi = 55.8^\circ$ N), Люкселе (Lycksele, 64.7° N, 18.8° E, $\Phi = 61.3^\circ$ N) и Салехард (Salekhard, 66.5° N, 66.5° E, $\Phi = 61.5^\circ$ N) в дневные часы при низкой геомагнитной активности в интервале 1960–1998 гг., где в скобках указаны географические координаты и исправленные геомагнитные широты Φ этих станций. Широты Φ ионосферных станций получены по Интернет (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo>) для 1980 г., что примерно соответствует середине анализируемого интервала времени.

Для поиска оптимального индекса солнечной активности для f_oE конкретной станции использован массив данных f_oE этой станции. Этот массив использован для определения коэффициентов уравнения регрессии:

$$r(F) = (f_oE / f_oE(66)_{\text{IRI}})^4 = a + b(F - 66) \pm \sigma, \quad (1)$$

где

$$F = kF_1 + (1 - k)F_{81}, \quad (2)$$

f_oE – критическая частота E -слоя, полученная по данным ионосферной станции для конкретных геофизических условий (географические широта и долгота, год, день года, местное время, индекс солнечной активности F), $f_oE(66)_{\text{IRI}}$ – критическая частота E -слоя по базовой модели IRI для этих геофизических условий за одним исключением: индекс солнечной активности $F = 66$. Задаваемый параметр k может изменяться в диапазоне 0–1; $F = F_{81}$ для $k = 0$, $F = F_1$ для $k = 1$. В этом диапазоне можно найти параметр $k = k^*$, который удовлетворяет условию минимума стандартного отклонения σ уравнения регрессии (1), т.е. отклонения вычисленных по этому уравнению значений $r(F)$ от измеренных значений. Подстановка параметра $k = k^*$ в уравнение (2) дает оптимальный индекс солнечной активности $F = F^*$ для вычисления f_oE в ионосфере над данной ионосферной станцией по уравнению (1) или по одной из эмпирических моделей ионосферы, т.е. решение поставленной задачи.

Дополнительные условия, которые были приняты для получения устойчивых закономерностей, следующие. В уравнении (1) использованы средние из трех часовых значений $r(F)$ для данного дня: местный полдень, один час до и один час после полудня. Данные f_oE для каждого часа обычно определены по мировому времени, поэтому местный полдень в данном случае означает ближайшее к полудню измерение f_oE . Из этих трех часовых значений $r(F)$ в данный день оставляются значения, которые соответствуют низкой геомагнитной активности: $Kp^* < 2.3$. Кроме того, если для данного дня число значений $r(F)$ меньше двух, то данный день исключается из рассмотрения. Индекс Kp^* определен по средневзвешенному (с весовым коэффициентом $\tau = 0.6$) индексу геомагнитной активности $ap(\tau)$ [Деминов и др., 2021]:

$$Kp^* = 2.1 \ln(0.2ap(\tau) + 1), \quad (3)$$

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

ap_0 , ap_{-1} и т.д. – значения ap -индекса в данный, предыдущий и т.д. трехчасовые интервалы.

В полдень экваториальная граница диффузных высыпаний электронов $\Phi_m = 69^\circ$ для $Kp^* = 2.3$ согласно модели [Деминов и др., 2021]. Более детальная модель этих высыпаний в виде зависимости Φ_m от AE -индекса геомагнитной активности дает $\Phi_m = 71^\circ$ в полдень для $AE = 280$ [Wu et al., 2021], что примерно соответствует $Kp = 2.3$ с учетом связи между индексами AE и Kp [Старков, 1994]. Эти оценки и дополнительный анализ по-

казали, что обычно в интервале 11–13 LT при низкой геомагнитной активности ($Kp^* < 2.3$) анализируемые станции расположены к экватору от авроральной области, т.е. соответствуют субавроральной области. Отметим, что станции Салехард и Люкселе расположены на полярном круге и вблизи него соответственно. Следовательно, перечисленные условия и станции подобраны так, чтобы крайнее ультрафиолетовое излучение Солнца было основным источником ионизации атмосферы в области E ионосферы на рассматриваемых широтах. Это косвенно учтено при записи уравнения (1).

В базовой модели IRI уравнение (1) имеет вид:

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

где $B = 0.0094$, COV – среднее за 12 месяцев значение индекса солнечной активности F [Bilitza, 2018]. Отметим, что в базовой модели IRI для вычисления foE использована эмпирическая модель [Kouris and Muggleton, 1973a, 1973b]. Более детальная модель (ниже она названа моделью ИПГ) показывает, что коэффициент B может зависеть от широты и сезона [Нусинов, 1988, 2004; Nusinov, 2006]. Модель foE [Titheridge, 1996] в NeQuick [Nava et al., 2008] также содержит зависимость от сезона коэффициента, аналогичного коэффициенту B в уравнении (4). Это означает, что искомый коэффициент $k = k^*$ в уравнении (2) может зависеть от сезона. Здесь использовано разделение месяцев года по сезонам аналогично принятому в модели NeQuick: зима (11, 12, 1, 2), равноденствие (3, 4, 9, 10), лето (5, 6, 7, 8), где в скобках указан номер месяца.

Итак, задача определения оптимального индекса солнечной активности для foE в дневные часы (11–13 LT) при низкой геомагнитной активности ($Kp^* < 2.3$) по базе данных анализируемых станций на субавроральных широтах сводится к поиску коэффициента $k = k^*$ в уравнении (2) для каждого сезона, который удовлетворяет условию минимума стандартного отклонения σ уравнения регрессии (1). Результаты решения этой задачи приведены ниже.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

На рисунке 1 показаны зависимости стандартных отклонений σ уравнения регрессии (1) от параметра k для каждого сезона, полученные по данным foE станций Ленинград, Люкселе и Салехард. Для этого по данным конкретной станции в интервале 1960–1998 гг. в дневные часы (11–13 LT) данного сезона при $Kp^* < 2.3$ для каждого значения параметра k (с шагом 0.05 в интервале от 0 до 1) были вычислены коэффициенты уравнения регрессии (1) и стандартное отклонение σ этого уравнения. На следующем этапе из массива ис-

ключались данные, которые удовлетворяли условию $r(F) > 3\sigma$, и вычисления повторялись. В результате были получены зависимости σ от k . На рисунке 1 они аппроксимированы полиномом пятой степени для большей наглядности. Из данных на этом рисунке видно, что для всех приведенных случаев наблюдаются широкие минимумы σ , где $k = k^*$, которые расположены в диапазоне $0.35 < k^* < 0.65$. Для каждого случая отклонение σ для $k = 0.5$ от σ для $k = k^*$ не превышает 0.1%. Следовательно, параметр $k = k^* = 0.5$ в уравнении (2) обеспечивает минимальные (или близкие к минимальным) значения σ для каждого из рассмотренных случаев. Параметру $k = 0.5$ в уравнении (2) соответствует индекс

$$P = (F_1 + F_{81})/2. \quad (5)$$

Следовательно, индекс P – оптимальный индекс солнечной активности для foE на субавроральных широтах, что является решением поставленной задачи. Тем не менее, из данных на рис. 1 следует, что для каждого из приведенных случаев разница в значениях σ для $k = 0.5$ и $k = 0$ или $k = 1$ не превышает 2%, т.е. преимущества индекса P по сравнению с индексами F_1 или F_{81} слабо выражены.

Из данных на рис. 1 можно видеть, что для всех анализируемых станций самые высокие значения σ наблюдаются для зимы, и в этот сезон они максимальны для станций Люкселе и Салехард. Для ст. Ленинград значения σ в равноденствие и летом почти совпадают, для ст. Салехард значения σ в равноденствия больше, чем летом. В результате, для ст. Салехард амплитуда годовых изменений σ больше, чем для ст. Люкселе и, тем более, для ст. Ленинград.

Подстановка индекса P вместо F в уравнение регрессии (1) позволяет получить значимые коэффициенты этого уравнения по данным ионосферной станции для конкретных условий, например, для полудня. В известных глобальных эмпирических моделях используются другие индексы солнечной активности. Например, в базовой модели IRI используется индекс COV (см. уравнение (4)). В этих моделях можно заменить используемый индекс солнечной активности на P для вычисления ежедневных значений foE и коэффициентов уравнения регрессии (1) по глобальным моделям для заданных координат ионосферной станции. Для предварительной оценки такой возможности можно сопоставить зависимости $r(F)$ от $F = P$ по уравнениям регрессии (1), построенные по данным ионосферной станции и глобальным моделям IRI [Bilitza, 2018], NeQuick [Nava et al., 2008] или ИПГ [Nusinov, 2006] для координат этой станции. На рис. 2 представлены результаты такого сопоставления для станций Салехард и Ленинград для трех сезонов в полдень при низкой геомагнитной активности ($Kp^* < 2.3$) и не очень высокой солнечной активности ($P <$

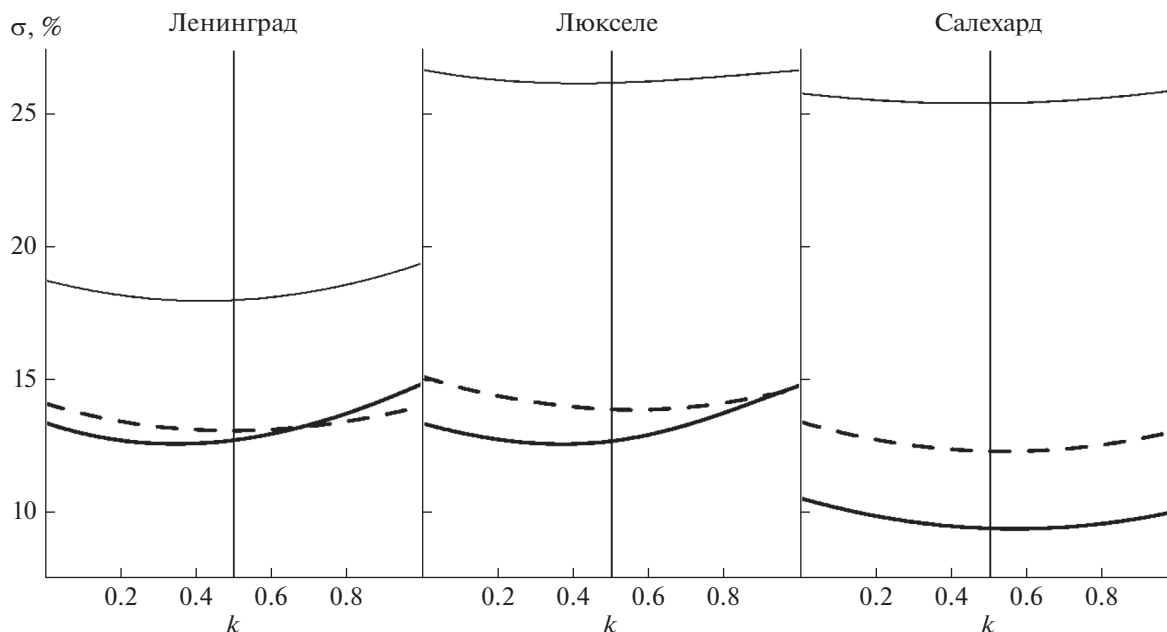


Рис. 1. Зависимости стандартных отклонений σ уравнения регрессии (1) от параметра k в уравнении (2), полученные по данным foE станций Ленинград, Люкселе и Салехард в дневные часы для зимы (тонкие линии), равноденствия (штриховые линии) и лета (толстые линии).

< 200). Последнее условие связано с тем, что уравнение регрессии (1) перестает быть линейным при высокой солнечной активности. Из данных на этом рисунке видно, что модель NeQuick точнее моделей ИПГ и IRI для зимы и равноденствий. Для лета эти модели обладают примерно одинаковой точностью с небольшим преимуществом модели ИПГ. Для зимы модель NeQuick является самой точной из рассмотренных, тем не менее, для ст. Салехард она дает заниженные значения $r(F)$ по сравнению с экспериментальными данными. Следовательно, для ст. Салехард зимой в полдень (и вблизи полудня) характерны не только высокая изменчивость $r(F)$ (рис. 1), но и сильное отклонение средних экспериментальных значений $r(F)$ от полученных даже по модели NeQuick (рис. 2). Дополнительные оценки показали, что свойства уравнений регрессии (1) для станций Люкселе и Салехард отличаются не сильно, поэтому зависимости $r(F)$ от $F = P$ для ст. Люкселе во многом подобны приведенным на рис. 2 для ст. Салехард.

Для приложений могут быть полезны средние арифметические (d) и среднеквадратичные (σ) отклонения измеренных значений foE от вычисленных по выбранным моделям. Для станций Ленинград и Салехард они приведены в табл. 1. Данные в этой таблице показывают, что изменения σ лежат в диапазоне 0.1–0.2 МГц. Эти данные подтверждают, что для зимы и равноденствия модель NeQuick точнее моделей ИПГ и IRI, в том числе, за счет относительно низкого значения d для

NeQuick. Для лета модель ИПГ точнее моделей IRI и NeQuick, но разница в величине σ не превышает 0.014 МГц.

Сопоставление экспериментальных данных foE с результатами расчетов foE по модели NeQuick для зимы в полдень при низкой геомагнитной ($Kp^* < 2.3$) и не очень высокой солнечной ($P < 200$) активностях позволяет получить дополнительные сведения об особенностях foE для этих условий (рис. 3). Для наглядности, на этом рисунке точками показаны каждые пятые сопоставления foE по модели и экспериментальным данным. Сплошные линии на этом рисунке соответствуют идеальному варианту совпадения foE по экспериментальным данным и модели. Из данных на рис. 3 следует, что для ст. Ленинград критическая частота $foE > 1.8$ МГц, и систематическая разница между экспериментальными и вычисленными по модели NeQuick частотами foE незначительна. Для ст. Салехард на частотах $foE < 2$ МГц модель NeQuick занижает экспериментальные данные foE и в среднем эта разница составляет 0.2 МГц. Для ст. Люкселе характерна аналогичная тенденция.

ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные на рис. 1 значения σ для станций Ленинград, Люкселе и Салехард показывают, что для равноденствия и лета они отличаются не сильно. Аналогичным свойством обладают среднеширотные станции на географических широ-

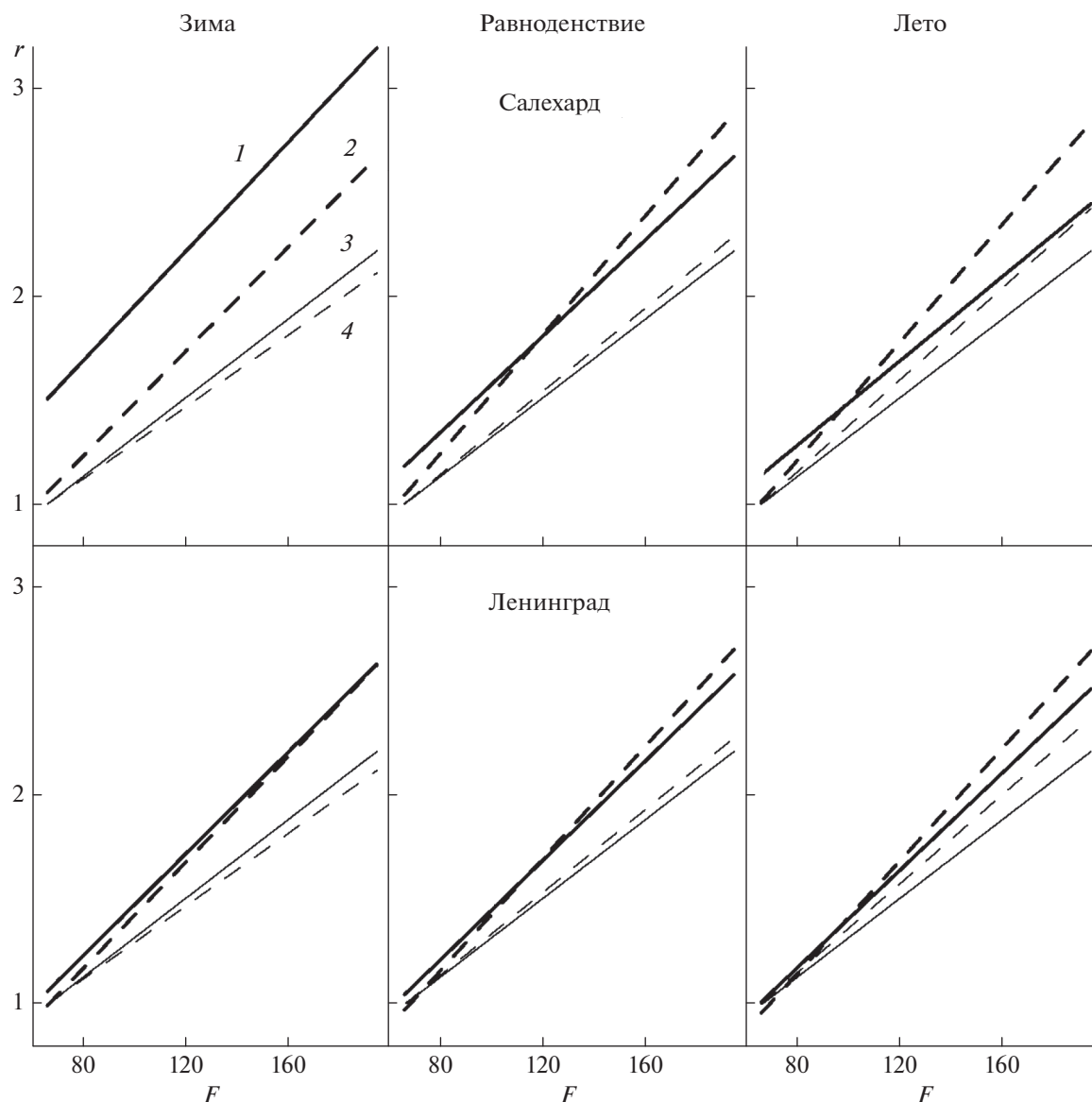


Рис. 2. Зависимость $h(F)$ от $F = P$ по уравнению (1) для координат станций Салехард и Ленинград в полдень при низкой геомагнитной активности для зимы, равноденствия и лета по экспериментальным данным (1) и моделям NeQuick (2), IRI (3) и ИПГ (4).

тах $\varphi > 50^\circ \text{ N}$, включая станцию Юлиусру/Рюген (Juliusruh/Rugen, 54.6° N , 13.4° E , $\Phi = 50.8^\circ \text{ N}$) [Деминов, 2022a]. Более детальный анализ показал, что для лета и равноденствия в полдень (и вблизи полудня) при низкой геомагнитной активности свойства f_oE на средних ($\varphi > 50^\circ \text{ N}$) и субавроральных широтах во многом подобны, включая зависимости f_oE от зенитного угла Солнца, сезона и солнечной активности. Из данных на рис. 1 и приведенных в работе [Деминов, 2022a] результатов следует, что в дневные часы во все сезоны индекс $P = (F_1 + F_{81})/2$ является оптимальным индексом солнечной активности для f_oE на средних и субавроральных широтах.

При прочих равных условиях зенитный угол Солнца χ максимален зимой и увеличивается с ростом широты. Например, в полдень зимой (первого января) $\chi = 82.9, 87.6$ и 89.4° для станций Ленинград, Люкселе и Салехард. Напомним, что в данном случае ноябрь, декабрь, январь и февраль соответствуют зиме, поэтому середина этого сезона примерно соответствует первому января. Крайнее ультрафиолетовое излучение Солнца является источником как прямой ионизации атмосферы, так и ионизации из-за этого излучения, рассеянного геокоорной, т.е. верхними слоями нейтральной атмосферы Земли [Каширин, 1986; Titheridge, 2003]. Зимой в полночь второй источ-

Таблица 1. Средние арифметические (d) и среднеквадратичные (σ) отклонения (в МГц) измеренных f_oE от вычисленных по моделям ИПГ, IRI и NeQuick для станций Ленинград и Салехард для зимы, равноденствия и лета в полдень при низкой геомагнитной ($Kp^* < 2.3$) и не очень высокой ($P < 200$) солнечной активности в интервале 1960–1998 гг.

Модель	Зима		Равноденствие		Лето	
	d	σ	d	σ	d	σ
Ленинград						
ИПГ	0.06	0.133	0.05	0.111	0.02	0.095
IRI	0.05	0.125	0.06	0.116	0.05	0.109
NeQuick	0.00	0.118	0.00	0.102	−0.01	0.103
Салехард						
ИПГ	0.16	0.197	0.10	0.138	0.05	0.108
IRI	0.15	0.188	0.11	0.146	0.08	0.122
NeQuick	0.01	0.171	0.01	0.101	−0.01	0.110

ник ионизации атмосферы (назовем его ночным источником) становится преобладающим, и f_oE равно 0.7 МГц по модели NeQuick. В модели NeQuick для больших зенитных углов Солнца ($\chi > 86.2^\circ$) учтено плавное уменьшение f_oE с увеличением χ за счет замены χ на эффективный зенитный угол χ_{eff} . В данном случае для ст. Салехард в полдень зимой $\chi = 89.4^\circ$ и $\chi_{\text{eff}} = 88.0^\circ$. В результате, по модели NeQuick для ст. Салехард в полдень зимой при низкой солнечной активности $f_oE = 1.2$ МГц без учета ночного источника ионизации атмосферы и $f_oE = 1.4$ МГц с учетом этого источника. Более детальный анализ показал, что для зимы в полдень на субавроральных широтах повышенная точность модели NeQuick (относительно моделей IRI и ИПГ, см. рис. 2) обусловлена более корректным учетом зависимости f_oE от

зенитного угла Солнца χ при больших значениях χ , включая учет ночного источника ионизации атмосферы.

Тем не менее, даже модель NeQuick для зимы в полдень на субавроральных широтах занижает критическую частоту E -слоя для низких значений этой частоты ($f_oE < 2$ МГц) в среднем примерно на 0.2 МГц (рис. 3). Этот эффект наиболее ярко выражен для ст. Салехард и практически отсутствует для ст. Ленинград (рис. 3). Последнее связано с тем, что частоты $f_oE < 2$ МГц для ст. Ленинград наблюдались очень редко. Поэтому можно ожидать, что данный эффект характерен для зенитных углов Солнца больше $\sim 85^\circ\text{--}86^\circ$. Приведенные данные не позволяют судить о существовании этого эффекта для $\chi > 90^\circ$.

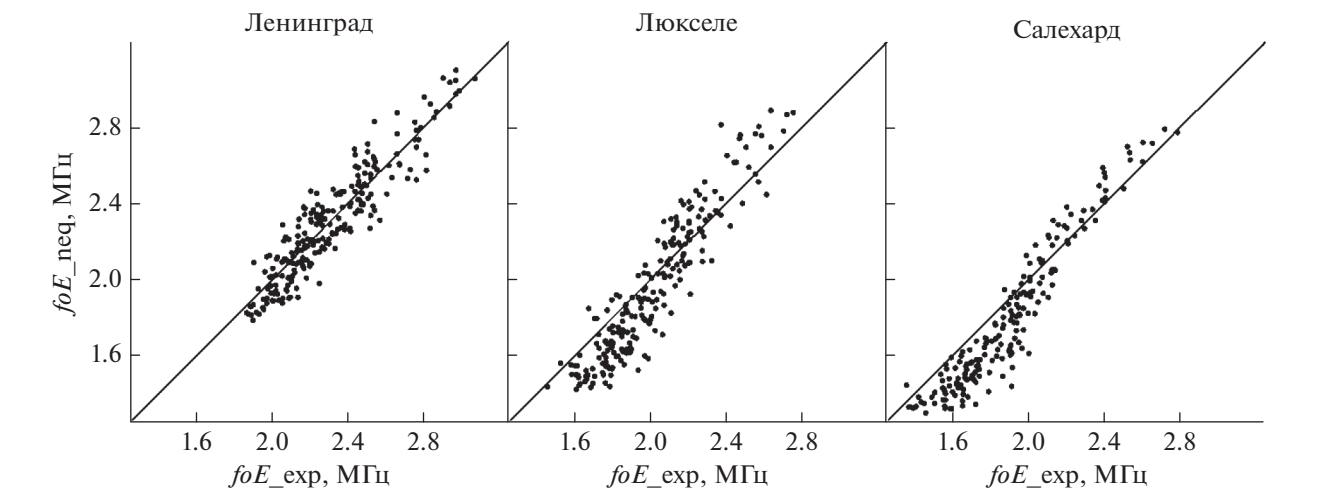


Рис. 3. Сопоставление доступных экспериментальных данных критической частоты слоя (f_oE_{exp}) в интервале 1960–1998 гг. для полудня при низкой геомагнитной активности с результатами расчетов (f_oE_{neq}) по модели NeQuick для ионосферных станций Ленинград, Люкселе и Салехард. Для наглядности, точками показаны каждые пятые сопоставления f_oE по модели и экспериментальным данным.

Причины приведенной ошибки модели NeQuick на субавроральных широтах неизвестны, и анализ этих причин требует специального рассмотрения. Здесь отметим только некоторые из возможных причин. Зависимость foE от χ при высоких значениях χ может быть недостаточно точной по модели NeQuick. Одной из причин этого может быть увеличенная концентрация окиси азота $n(\text{NO})$, которая максимальна в авроральной области и значительна на субавроральных широтах [Barth et al., 2003]. В свою очередь, увеличение $n(\text{NO})$ может привести к увеличению foE [Swider and Kenneshea, 1993]. Высыпания энергичных электронов в плазмосфере (вблизи плазмопаузы) из-за их взаимодействия с электромагнитными волнами КНЧ-ОНЧ-диапазона, по-видимому, могут быть причиной дополнительного увеличения foE на субавроральных широтах даже при низкой геомагнитной активности [Лайонс и Уильямс, 1987; Tsurutani et al., 2019; He et al., 2020; Ma et al., 2021]. На этом пути, по-видимому, важен анализ свойств E -слоя ионосферы субавроральных широт для большего диапазона изменений зенитного угла Солнца и местного времени.

Использование индекса $P = 0.5(F_1 + F_{81})$ для вычисления foE по выбранным моделям затруднено для текущего времени, поскольку для вычисления F_{81} необходимы данные F_1 на 40 дней вперед. Одним из вариантов решения этой задачи может быть замена индекса F_{81} в данный день на $F(T, N)$ — кумулятивный (средневзвешенный с характерным временем T в сутках) индекс солнечной активности, вычисленный по индексам F_1 в данный и предыдущие N дней:

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

где $\tau = \exp(-1/T)$, индекс $n = 0$ соответствует данному дню, $T = 27$ и $N = 81$ [Деминов, 2022б]. По предварительным оценкам, замена F_{81} на $F(27, 81)$ не приводит к заметным изменениям foE , вычисленных по выбранным моделям. Например, такая замена дает разницу меньше 0.01 МГц в значениях среднеквадратичных отклонений σ моделей для приведенных в таблице данных. Тем не менее, целесообразен анализ эффективности замены F_{81} на $F(27, 81)$ в вычислениях foE для более широкого набора гелиогеофизических условий, что выходит за рамки данной работы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен поиск оптимального индекса солнечной активности для вычисления foE на субавроральных широтах на основе анализа имеющихся данных критической частоты foE станций Ленинград, Люкселе и Салехард в дневные часы (11–13 LT) при низкой геомагнитной активности

($Kp^* < 2.3$) в интервале 1960–1998 гг. Получены следующие выводы.

1. Индекс $P = 0.5(F_1 + F_{81})$ является оптимальным индексом солнечной активности для ежедневных значений 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.

2. Стандартные отклонения σ зависимости foE от P максимальны для зимы. В этот сезон для станций Салехард и Люкселе, которые расположены на полярном круге и вблизи этого круга, величина σ существенно больше, чем для ст. Ленинград.

3. Подстановка индекса P в модели ИПГ, IRI или NeQuick позволяет использовать эти модели для вычисления ежедневных значений foE . На основе предварительного анализа получено, что модель NeQuick точнее моделей ИПГ и IRI для зимы и равенденствий. Для лета эти модели обладают примерно одинаковой точностью с небольшим преимуществом модели ИПГ. Для станций Салехард и Люкселе зимой при $foE < 2$ МГц даже модель NeQuick дает заниженные значения foE в среднем примерно на 0.2 МГц. Поиск причин этого свойства ионосферы требует специального рассмотрения.

5. 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 в рамках научного проекта № 20-72-10023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Л.А., Иванов-Холодный Г.С., Чертопруд В.Е. Аэрономия слоя E (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.
- Деминов М.Г. Индекс солнечной активности для критической частоты E -слоя на средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 2. С. 206–210. 2022а.
- Деминов М.Г. Эффективный индекс солнечной активности для краткосрочного прогноза среднего индекса этой активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 3. С. 302–306. 2022б.

- Демин М.Г., Шубин В.Н., Бадин В.И. Модель критической частоты Е-слоя для авроральной области // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. № 5. С. 610–617. 2021.
- Каширин А.И. Фотоионизация в ночной ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 26. № 4. С. 563–568. 1986.
- Лайонс Л., Уильямс Д. Физика магнитосферы. Количественный подход: Пер. с англ. М.: Мир, 312 с. 1987.
- Нусинов А.А. Детерминированная модель среднеширотного и экваториального Е-слоя (описание и сравнительные характеристики точности) // Ионосферные исслед. № 44. С. 94–99. 1988.
- Нусинов А.А. Ионосфера как природный детектор для исследования долговременных изменений потоков солнечного геоэффективного излучения // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 44. № 6. С. 779–786. 2004.
- Старков Г.В. Статистические зависимости между индексами магнитной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 34. № 1. С. 129–131. 1994.
- Barth C.A., Mankoff K.D., Bailey S.M., Solomon S.C. Global observations of nitric oxide in the thermosphere // J. Geophys. Res. V. 108. № A1. 2003.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009458>
- Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere // Adv. Radio Sci. V. 16. P. 1–11. 2018.
- He Z., Yu J., Chen L., Xia Z., Wang W., Li K., Cui J. Statistical study on locally generated high-frequency plasmaspheric hiss and its effect on suprathermal electrons: Van Allen Probes observation and quasi-linear simulation // J. Geophys. Res. – Space. V. 125. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028526>
- Kouris S.S., Muggleton L.M. Diurnal variation in the E-layer ionization // J. Atmos. Terr. Phys. V. 35. P. 133–139. 1973a.
- Kouris S.S., Muggleton L.M. World morphology of the Appleton E-layer seasonal anomaly // J. Atmos. Terr. Phys. V. 35. P. 141–151. 1973b.
- Ma Q., Li W., Zhang X.-J., Bortnik J., Shen X.-C., Connor H.K. et al. Global survey of electron precipitation due to hiss waves in the Earth's plasmasphere and plumes // J. Geophys. Res. – Space. V. 126. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2021JA029644>
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Solomon S.C. Numerical models of the E-region ionosphere // Adv. Space Res. V. 37. P. 1031–1037. 2006.
- 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>
- Swider W., Keneshea T.J. The quiet sunrise E region: Enhancements at high latitudes in winter due to increased nitric oxide // J. Geophys. Res. V. 98. № A2. P. 1725–1728. 1993.
- Titheridge J.E. Re-modeling the ionospheric E region // Kleinheubacher Berichte. V. 39. P. 687–696. 1996.
- Titheridge J.E. Ionisation below the night F2 layer – a global model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 65. P. 1035–1052. 2003.
- Tsurutani B.T., Park S.A., Falkowski B.J., Bortnik J., Lakhina G.S., Sen A. et al. Low frequency ($f < 200$ Hz) polar plasmaspheric hiss: coherent and intense // J. Geophys. Res. – Space. V. 124. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2019JA027102>
- Wu C., Ridley A.J., DeJong A.D., Paxton L.J. FTA: A feature tracking empirical model of auroral precipitation // Space Weather. V. 19. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020SW002629>
- 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.