

УДК 550.388.2

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ V_0 И V_1 В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ЗОНЕ

© 2019 г. О. А. Мальцева¹, *, Т. В. Никитенко¹, **¹Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета (НИИ физики ЮФУ), г. Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: mal@ip.rsu.ru

**e-mail: niki-ta1952@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2019 г.

После доработки 26.02.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

По данным ст. Норильск за 2003–2012 гг. изучены климатологические особенности и поведение параметров V_0 , V_1 , полученных расчетом $N(h)$ -профилей из кривых действующих высот, во время возмущений. Сходство с поведением в других широтных зонах заключается в том, что значения V_0 выше летом, чем зимой, и в годы высокой солнечной активности. Значения V_1 имеют минимум летом и максимум зимой, разброс от 1.3 до 3. Сравнение с моделью IRI-2016 дало относительные отклонения модельных значений V_0 от V_0 для V_0 до 100% зимой и 10–40% летом. Для параметра V_1 зимние значения составили 15–40%, летние 8–50%. В отличие от других зон коэффициенты корреляции между V_0 и высотой максимума $hmF2$, между V_0 и эквивалентной толщиной ионосферы τ имеют более низкие значения. Существуют несколько типов реакции параметров ТЕС, $foF2$, V_0 , V_1 на возмущения, которые в первом приближении можно представить в виде таблицы из 5 групп. В большинстве случаев V_0 растет во время возмущений, а V_1 падает. Не обнаружено зависимости результатов от уровня возмущений. Во время возмущений имеются большие пробелы в данных. Полное электронное содержание ионосферы ТЕС используется для определения знака возмущения.

DOI: 10.1134/S0016794019060087

1. ВВЕДЕНИЕ

Параметры V_0 и V_1 определяют форму $N(h)$ -профиля ионосферы и рассчитываются в любой модели, однако есть расхождение со значениями, которые получаются путем расчета профилей из ионограмм, например, наземных ионозондов (V_0 , V_1). Важность оценки V_0 и V_1 определяется тем, что форма $N(h)$ -профиля влияет на значения таких параметров, как время распространения, МПЧ, ТЕС. Большинство публикаций посвящены изучению поведения V_0 , V_1 и сравнению с моделями на средних, в низких и экваториальных широтах. В настоящей статье такое изучение проведено по данным высокоширотной ст. Норильск (69.4° N, 88.1° E). Исследование включает: 1) обзор результатов предшествующих публикаций; 2) описание климатологических особенностей поведения V_0 и V_1 в высокоширотной зоне; 3) поведение V_0 и V_1 во время возмущений.

2. ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ПУБЛИКАЦИЙ

Интерес к параметрам V_0 и V_1 вызван следующими обстоятельствами. Модель IRI является наиболее широко используемой и предпочтительной еще и в силу ее постоянной модификации [Bilitza et al., 2017]. В самом начале 2000-х гг. возникла потребность в точном знании и моделировании полного электронного содержания ионосферы ТЕС, которое сильно зависит от формы профиля, и оказалось, что эта форма, описываемая модельными параметрами V_0 и V_1 , далека от реальной. В модели IRI профиль электронной плотности внутренней ионосферы описывается следующим аналитическим выражением $Ne(h) = NmF2 \exp(-x^{B_1}) / \text{ch}(x)$, $x = (hmF2 - h) / V_0$ [Ramakrishnan and Rawer, 1972]. Для параметра V_0 в IRI предусмотрены две опции. Одна – это стандартная модель, основанная на таблице значений (опция V_0 -table), полученных по измерениям с помощью ионозондов (Ramakrishnan and Rawer, 1972; Bilitza, 1990), в которой параметр V_0 является разницей между высотой максимума $hmF2$ и высотой $h0.24$, где электронная концентрация падает до значения $0.24 NmF2$ ($x = 1$), определяя тол-

щину нижней части профиля. Параметр $V1$ определяет форму профиля между $hmF2$ и $h0.24$: чем больше $V1$, тем больше плотность электронов в этой области. Другая опция (опция Gul) основана на модели Gulyaeva [1987], использующей высоту, где плотность электронов падает до половины максимальной плотности. В ранней версии таблица $V0$ была составлена по данным среднеширотных станций. В работе [Bilitza et al., 2000] она была модифицирована включением данных низкоширотных и экваториальных станций. Стандартная опция $V1$ представлена суточной вариацией с помощью переходной функции Эпштейна [Gulyaeva, 2007]. Это вызвало всплеск публикаций по сравнению новых модельных и рассчитанных по ионограммам значений $V0$ и $V1$. Попутно были выявлены многие особенности поведения этих параметров. В работе [Chuo, 2012] по результатам 20 статей, опубликованных с 1972 по 2011 гг. и относящихся к среднеширотным и экваториальным областям, сделан вывод: $V0_Neh_I$ испытывает заметные дневные, сезонные изменения и зависимость от солнечной активности. Параметр $V1_Neh_I$ показывает небольшие сезонные изменения. Сама работа [Chuo, 2012] фокусируется на области экваториальной аномалии. Естественно, что наблюдались очень большие отличия от поведения в других зонах. Особенностью этой работы является исследование поведения $V0_Neh_I$ во время возмущений и, что особенно важно, в привязке к изменению параметров $NmF2$ и $hmF2$. Проводится сравнение с результатами модели IRI. Корреляция между $V0_Neh_I$ и $hmF2$ в период 6–13 LT мала во все сезоны. Коэффициенты корреляции составляют 0.152, -0.028 и 0.508 для равноденствия, лета и зимы, соответственно. Расчет модельных значений показал дневные и сезонные вариации для обеих опций, однако обе опции переоценивают наблюдаемые величины. Существенные положительные различия ($\sim 117\%$) для опции Gul появляются в период 10–15 LT летом и в равноденствие. Опция $V0_table$ не отражает восходно-заходных особенностей. Результаты работы [Zhang et al., 2008] относятся к низкоширотной зоне (получены по данным ст. Nainan ($19.4^\circ N$, $109.0^\circ E$) за период с марта 2002 по февраль 2005 г.). $V0_Neh_I$ имеет наибольшие медианные значения в летний полдень (~ 200 – 250 км) и наименьшие значения (~ 40 км) вблизи полуночи в месяцы равноденствия. Модель IRI (опция $V0_table$) недооценивает $V0_Neh_I$ в весенний период 2002 г., но обеспечивает хорошее соответствие летом и зимой. $V1_Neh_I$ имеет наименьшие медианные значения (~ 1.2) вблизи летнего полудня и более высокие значения в ночные часы, чем днем, для всех сезонов. В работе [Zhang et al., 2008] приведены суточные зависимости коэффициентов корреляции R между $V0_Neh_I$ и $hmF2$, $V0_Neh_I$ и $M(3000)F2$, $V1_Neh_I$ и $hmF2$,

$V1_Neh_I$ и $M(3000)F2$, $V0_Neh_I$ и $V1_Neh_I$. Коэффициенты R между $V0_Neh_I$ и $hmF2$ положительные, минимальные значения имеют место в полночь (~ 0.4 – 0.5), в дневные часы (10–20 LT) R превышают значение 0.9. Коэффициенты между $V0_Neh_I$ и $M(3000)F2$ имеют зеркальное отражение с отрицательными значениями. Для $V1_Neh_I$ все коэффициенты малы в течение 0–10 LT. Дневные (10–20 LT) коэффициенты лежат в диапазоне 0.6–0.8 для $V1_Neh_I$ и $M(3000)F2$, для $V1_Neh_I$ и $hmF2$, $V0_Neh_I$ и $V1_Neh_I$ коэффициенты отрицательны, являясь зеркальным отражением положительных значений для $V1_Neh_I$ и $M(3000)F2$. Это создает хорошую возможность, чтобы использовать $hmF2$ и $M(3000)F2$ для определения $V0_Neh_I$ и $V1_Neh_I$, однако нужно знать коэффициенты линейной регрессии. Результаты для индийского региона представлены в работах [Sethi et al., 2007, 2009] для ст. Дели ($28.6^\circ N$, $77.2^\circ E$) для дневных часов (10.00–14.00 LT) для трех сезонов 2003 г. и результаты сравнены с моделью IRI. Летом $V0_Neh_I$ падает от 150 км до 80 км, зимой $V0_Neh_I$ лежит в диапазоне ~ 70 – 80 км с максимумом в 13 LT, в равноденствие диапазон примерно тот же, но минимум в 12 LT. При сравнении с моделью IRI наилучшее соответствие со значениями $V0_Neh_I$ дала опция $V0_table$. Значения $V1_Neh_I$ зимой лежат в диапазоне 1.4–1.6, летом 1.8–1.9, в равноденствие 1.6–2.2. В модели IRI обе опции дают одинаковое постоянное значение 1.95 во все сезоны. Каждая работа добавляет определенный штрих в описание поведения этих параметров. В работе [Liu et al., 2010] основное внимание уделено сезонным и долготным вариациям $V0_Neh_I$ и $V1_Neh_I$ в экваториальной зоне по данным радиозатменных измерений на спутниках FORMOSAT-3/COSMIC (F3/C) в дневное время с 13 июля 2006 по 20 октября 2008 г., что позволило выявить сложные долготные вариации, зависящие от сезона. В равноденствие четко выделяются пики в волновой структуре. Наиболее поразительной особенностью является стабильный максимум вблизи долготы $100^\circ E$. В работе [Lei et al., 2004] представлена климатология $V0_Neh_ISR$ и $V1_Neh_ISR$ по данным радара некогерентного рассеяния (ISR) в американской среднеширотной зоне (Millstone Hill ($42.6^\circ N$, $288.5^\circ E$)) за период 1976–2002 гг. в спокойные дни. Поведение $V0_Neh_ISR$ характеризуется утренними и вечерними падениями для всех сезонов, кроме лета, и 15%-м изменением $V1_Neh_ISR$ в течение солнечных циклов. Оба параметра проявляют большие изменения ото дня ко дню во все сезоны. $V0_Neh_ISR$ ниже ночью, а выше днем, конкретный вид суточной зависимости меняется с сезоном и солнечной активностью. $V1_Neh_ISR$ проявляет большое рассеяние в диапазоне 0.8–5. Суточная вариация изменяется от ~ 1.7 (1.9) днем до ~ 2.5 (2.9) ночью

для низкой (высокой) активности. В сезонном ходе $B1_Neh_ISR$ днем выше зимой и ниже летом, ночью нет заметной вариации. От низкой к высокой активности $B1_Neh_ISR$ увеличивается на ~15%. Сравнение с моделью IRI-2001 ($B0_Gul$ и $B0_table$) дало следующие результаты. Суточные кривые $B0_IRI$ для обеих опций симметричны относительно полудня, тогда как в данных $B0_Neh_ISR$ такой симметрии нет. При низкой солнечной активности обе опции занижают значения. Значения $B0_IRI$ для опции $B0_table$ увеличиваются от низкой к высокой активности. Значения $B0_IRI$ для опции $B0_Gul$ при высокой активности занижают значения на 10–20 км. Дневные модельные $B1_IRI$ для опции $B1_table$ и ночные $B1_IRI$ для опции $B1_Gul$ близки к $B1_Neh_ISR$ при высокой активности. Модельные $B1_IRI$ не показывают какой-либо зависимости от солнечной активности.

В работе [Oinats et al., 2005] результаты относятся к среднеширотному региону: они получены по данным ст. Иркутск ($52.3^\circ N$, $104.3^\circ E$) в 2003–2004 гг. для 4 сезонов (зима, весна, лето, осень). Значения $B0_Neh_I$ зимой лежат в диапазоне 60–80 км с максимумами в 06 LT и 21 LT, весной диапазон составляет 70–100 км с максимумом в полдень и минимумом ночью, летом диапазон самый широкий 70–140 км с максимумом в 10–12 LT и минимумом ночью, осенью ситуация близка к весенней с минимальным падением в восходно-заходные часы. Все значения для 2003 г. больше значений для 2004 г., т.е. есть явная зависимость от солнечной активности. Для $B1_Neh_I$ зимой диапазон составляет 2.2–3.4 с максимумами в 06 LT и 21 LT и минимумом днем, весной диапазон 2.0–3.0 с максимумом ночью и минимумом днем, летом в пределах 1.8–3.2 плавное падение от ночи ко дню и подъем во второй половине дня, осенью диапазон 2.0–3.2 с подобием весеннего поведения. В работе [Oinats et al., 2005] приведены графики зависимостей полуденных значений $B1_Neh_I$ (12 LT) и зенитного угла Солнца χ от дня года. Оба графика близки друг к другу, что может указывать на причину сезонной зависимости $B1_Neh_I$. Сравнение $B0_Neh_I$ с моделью IRI было выполнено для 4 сезонов и двух опций $B0_table$ и $B0_Gul$. Суточные вариации для $B0_IRI$ для опции $B0_Gul$ находятся в хорошем соответствии с наблюдениями, особенно в летнее время, однако глубокие минимумы при переходе от ночных значений к дневным и наоборот не соответствуют наблюдениям. Результаты для опции $B0_table$ находятся в плохом соответствии как в сезонном, так и в суточном поведении. Для $B1$ модель $B1_table$ качественно воспроизводит поведение $B1_Neh_I$ кроме зимних восходно-заходных минимумов. Значение $B1_IRI = 3$ опции $B1_Gul$ далеко от наблюдаемых значений.

В работе [Perna et al., 2018] приводятся результаты для низкоширотной и экваториальной зоны южного полушария по данным бразильской Sao Jose ($23.1^\circ S$, $314.5^\circ E$) и аргентинской Tucuman ($26.9^\circ S$, $294.6^\circ E$) станций. Даются статистические результаты для низкой и высокой активности, однако наиболее интересная часть этой статьи связана с обзором работ и результатов по корреляции между $hmF2$ и $B0_Neh_I$. Коэффициенты корреляции между $hmF2$ и $B0_Neh_I$ оказались 0.87 в равноденствие, 0.57 зимой, 0.51 летом для станции SJ и высокой активности, для станции TU 0.69 в равноденствие, 0.85 летом высокой активности. Модель IRI_A дает неплохое соответствие для $B0_IRI_A$ во время равноденствия любой активности, но очень плохое соответствие для $B1_IRI_A$. Результаты лучше для низкой, чем для высокой активности.

Появление ТЕС в качестве параметра, описывающего состояние ионосферы, показало важность еще одного параметра – эквивалентной толщины ионосферы τ , которая может использоваться для определения $foF2$. В некоторых работах оценивалась корреляция между τ и $B0$. В работе [Chuo, 2010] исследовалась связь между τ и $B0_Neh_I$ по данным низкоширотной ст. Wuhan ($114.4^\circ E$, $30.6^\circ N$) с апреля 1999 по март 2000 г., т.е. в период высокой активности, и с другими параметрами ионосферы. Корреляция между τ и $B0_Neh_I$ была рассчитана отдельно для дневного (08:00–16:00 LT) и ночного (20:00–04:00 LT) времени. Дневные летнее (0.8115) и зимнее (0.8145) значения оказались выше равноденственного (0.6732). В ночное время соотношение по сезонам такое же, но все значения намного ниже: 0.5582 летом, 0.4820 зимой и 0.1591 в равноденствие. Была исследована связь параметров во время магнитной бури (МБ) 20–24.10.1999 г. с минимальным $Dst = -238$ нТл в 08:00 UT 22.10.1999 г. Наблюдалось увеличение ТЕС после начала МБ и флуктуации $foF2$ в период (13:00–20:00 UT). На этом фоне оба параметра τ и $B0_Neh_I$ испытывали четкое увеличение, более выраженное для τ , чем для $B0_Neh_I$. Отмечено, что увеличение τ , связанное с увеличением ТЕС и $hmF2$, указывает на сильное влияние плазмосферной части ТЕС на τ . Приводятся физические причины, объясняющие такое поведение параметров. Работа [Alagbe, 2012] напрямую посвящена корреляции τ и $B0_Neh_I$ как в периоды низкой и высокой активности, так и во время возмущений, по данным вертикального зондирования на ст. Ouagadougou, Burkina Faso ($12.4^\circ N$, $1.5^\circ W$) в 1990, 1991, 1995 гг. Получены коэффициенты корреляции, превышающие 0.95 в спокойное время и 0.90 во время возмущений. Приводятся коэффициенты регрессионных кривых $B0 = a\tau + b$. Поскольку не указано, откуда берутся значения ТЕС, можно предположить, что они вычислены по $N(h)$ -профилю в

соответствии с аппроксимацией до высоты 600 или 1000 км, но это не имеет отношения к реальному значению τ . В работе [Odeyemi et al., 2018] определяется корреляция между τ и $B0_Neh_I$ по данным ст. Pogin (8.500° N, 4.680° E) в 2010 г. и делается сравнение обоих параметров с моделью IRI-2016.

Наиболее полной и важной по многим аспектам работой является статья [Altadill et al., 2009]. Приведенный выше обзор работ показывает, что однозначно определить, какая опция лучше, трудно. В работе [Altadill et al., 2009] предложена новая модель $B0_A$, $B1_A$, причем, что особенно важно, ею охвачены несколько широтных зон: 0–20°, 20–40°, 40–60°. Модель основана на разложении Фурье по экспериментальным данным 27 ионозондов по всему земному шару. Параметры $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ определялись из $N(h)$ -профилей, усредненных за месяц на каждый час методом NHPC [Huang and Reinish, 1996; Reinish et al., 2005]. Отбирались спокойные условия, что привело к исключению 25% случаев. Коэффициенты разложения выражены в виде функции от $RZ12$, что обеспечивает прогностические возможности. Результаты приведены для двух сезонов: лето (май–июль в северном полушарии, ноябрь–январь в южном полушарии), зима (ноябрь–январь в северном полушарии, май–июль в южном полушарии). Рисунки 2, 3 этой статьи очень наглядно представляют особенности суточного поведения $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ для высокой и низкой активности. При описании результатов авторы сделали следующие акценты. Летом для всех широт и уровней солнечной активности доминирует суточный ход с полуденными значениями $B0_Neh_I$, превышающими полуночные. Летние $B0_Neh_I$ выше при высокой активности, чем при низкой. Зимние кривые $B0_Neh_I$ существенно отличаются от летних, обладая широтной зависимостью, и в низких широтах имеют явный суточный ход для всех уровней активности с превышением полуденных значений над полуночными. В диапазоне низко-средних широт проявляется полусуточная вариация для высокой активности и слабая зависимость при низкой. Зимние $B0_Neh_I$ выше при высокой активности. Для средне-высоких широт зимние значения выше для высокой активности. Значения $B1_Neh_I$ имеют гораздо больший разброс, чем $B0_Neh_I$. Летом всегда полуденные значения меньше полуночных, а суточная амплитуда уменьшается при увеличении широты. Летние значения $B1_Neh_I$ меньше для высокой активности. Зимой нет четкой суточной зависимости при низкой активности. Ночью суточная зависимость имеет явный вид в низких широтах при высокой активности. Зимние значения проявляют тенденцию превышать летние. Сравнение с двумя опциями IRI показало существенное улучшение качества опреде-

ления $B0$, $B1$. Количественные показатели представлены на рис. 8 этой статьи в виде средне-квадратических ошибок в зависимости от года. Средняя за все годы ошибка $\sigma(B0_IRI_A)$ для нового метода составила 17.77 км, для стандартной опции – 24.43 км, для опции Gul – 25.84 км, улучшив прогноз на 37.5% для стандартной опции и на 45.4% – для опции $B0_Gul$. Для $B1$ $\sigma(B1_IRI_A)$ составила 0.67 и 0.8 для нового метода и стандартной опции, улучшив прогноз на 19.4%. Эта модель является опцией по умолчанию в текущей версии IRI-2016. Таким образом, основные результаты ограничиваются широтой 60°. В работе [Zaalov et al., 2017] отмечается, что в авроральной зоне IRI-параметры могут давать значительные расхождения с экспериментом. По ссылке на [Themens, 2014], ошибки IRI для f_oF2 в полярной шапке могут достигать 50%, для $B0_IRI$ – 40%. Указано, что необходимы оценки для высокоширотной зоны.

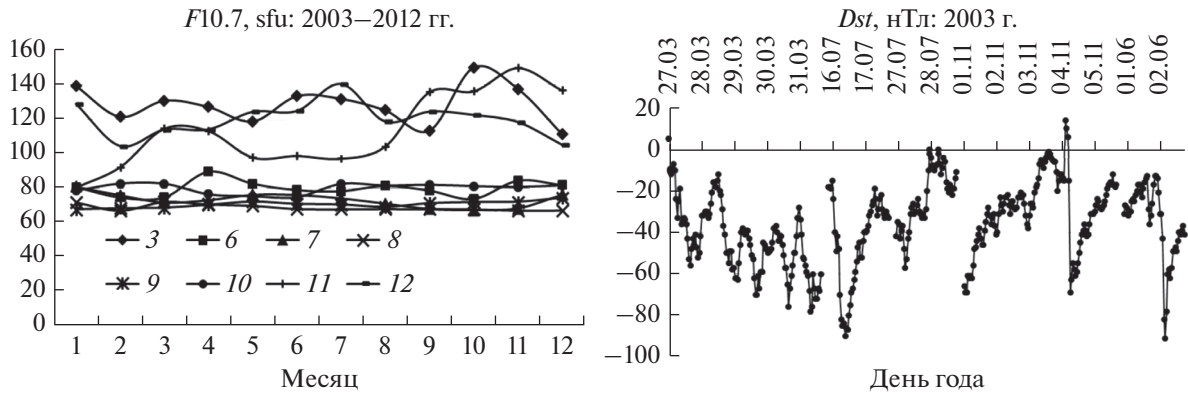
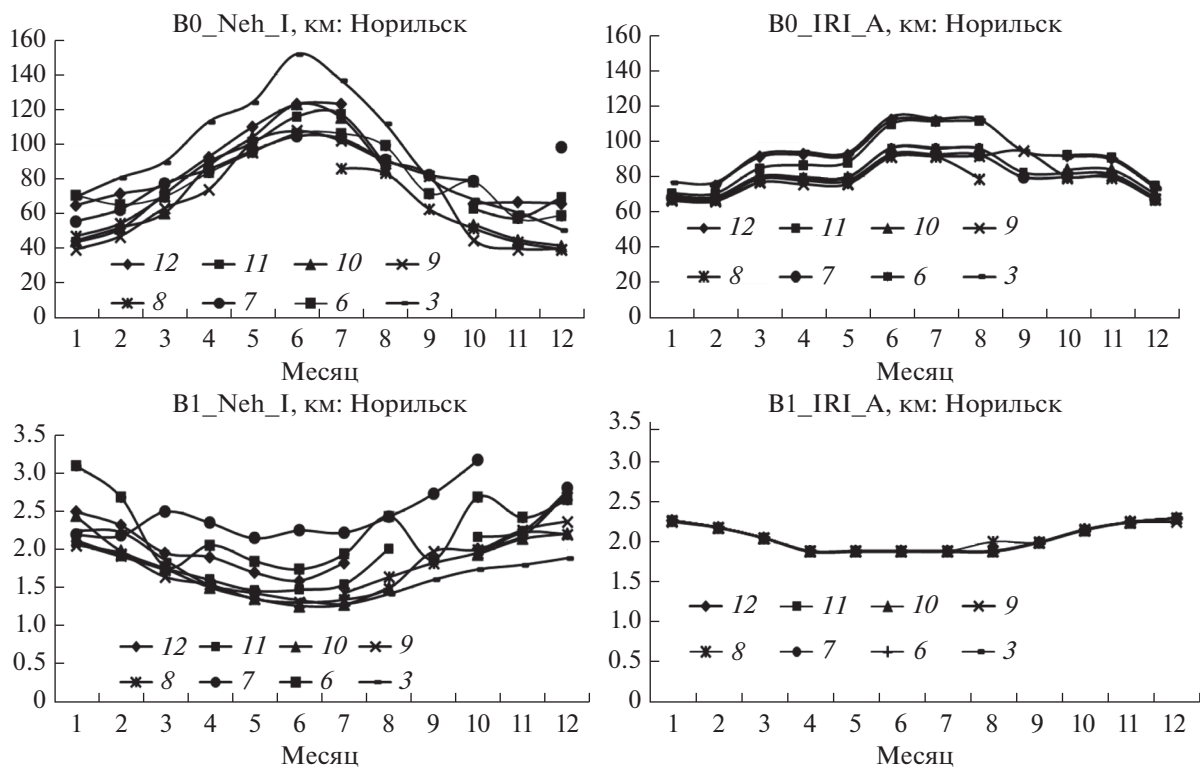
3. ОПИСАНИЕ КЛИМАТОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОВЕДЕНИЯ $B0_Neh_I$ И $B1_Neh_I$ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ЗОНЕ

Наиболее детально климатология параметров $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ представлена в работе [Altadill et al., 2009]. В данном разделе приводятся результаты для ст. Норильск. Для имеющихся в базе DIDbase (<http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>) данных (2003–2012 гг. с пропуском 2004–2005 гг.) максимум солнечной активности приходится на 2003 и 2011–2012 гг. Значения $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ в этой базе получены из расчета $N(h)$ -профилей по ионограммам $B3$ методом NHPC [Huang and Reinish, 1996; Reinish et al., 2005].

В левой части рис. 1 показаны среднемесячные значения индекса $F10.7$. Годы, которым соответствуют кривые, указаны цифрами. В правой части рис. 1 дано изменение индекса Dst в периоды, выбранные для описания поведения $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ во время возмущений.

Отличительной чертой очень многих работ является усреднение по сезонам, которое может включать от 3 до 4 мес. Здесь на рис. 2 приводятся среднемесячные значения параметров $B0_Neh_I$ и $B0_Neh_I$ и рассчитанные по модели IRI_A (опция [Altadill et al., 2009]). Указание на эту опцию дается буквой А.

В сезонном ходе значения $B0_Neh_I$ выше летом, чем зимой, и в годы высокой активности. Это совпадает со статистикой поведения в большинстве широтных зон. Модель IRI-A правильно воспроизводит тенденцию сезонного хода, в том числе зависимость от солнечной активности, но диапазон значений меньше, летние значения ниже $B0_Neh_I$, а ночные выше. Значения $B1_Neh_I$ имеют минимум летом, максимум зимой, разброс

Рис. 1. Поведение индексов $F10.7$ и Dst в исследуемый период.Рис. 2. Климатология параметров $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$ в сравнении с результатами модели IRI_A .

от 1.3 до 3.0. Есть некоторая тенденция обратной зависимости от солнечной активности. Для IRI значения $B1_IRI_A$ имеют сезонную зависимость, но нет зависимости от солнечной активности. Если сравнивать относительные отклонения σ , %, модельных значений от рассчитанных по ионограммам, то наибольшими они являются для параметра $B0_IRI_A$, причем зимой значения могут составлять до 100%, летние лежат в пределах 10–40% с общей тенденцией увеличения с уменьшением солнечной активности. Для параметра $B1_IRI_A$ зимние значения меньше (15–40%),

летние имеют больший разброс (8–50%) без определенной зависимости от солнечной активности.

Поскольку сравнений и для основных параметров ионосферы $foF2$ и $hmF2$ для высокоширотных зон не так много, на рис. 3 приводятся среднемесячные экспериментальные и модельные значения этих параметров.

Значения $foF2$ в принципе согласуются. Значения $hmF2$ завышаются моделью. Для относительных отклонений σ , %, характеризующих точность определения $foF2$ с помощью модели IRI , были

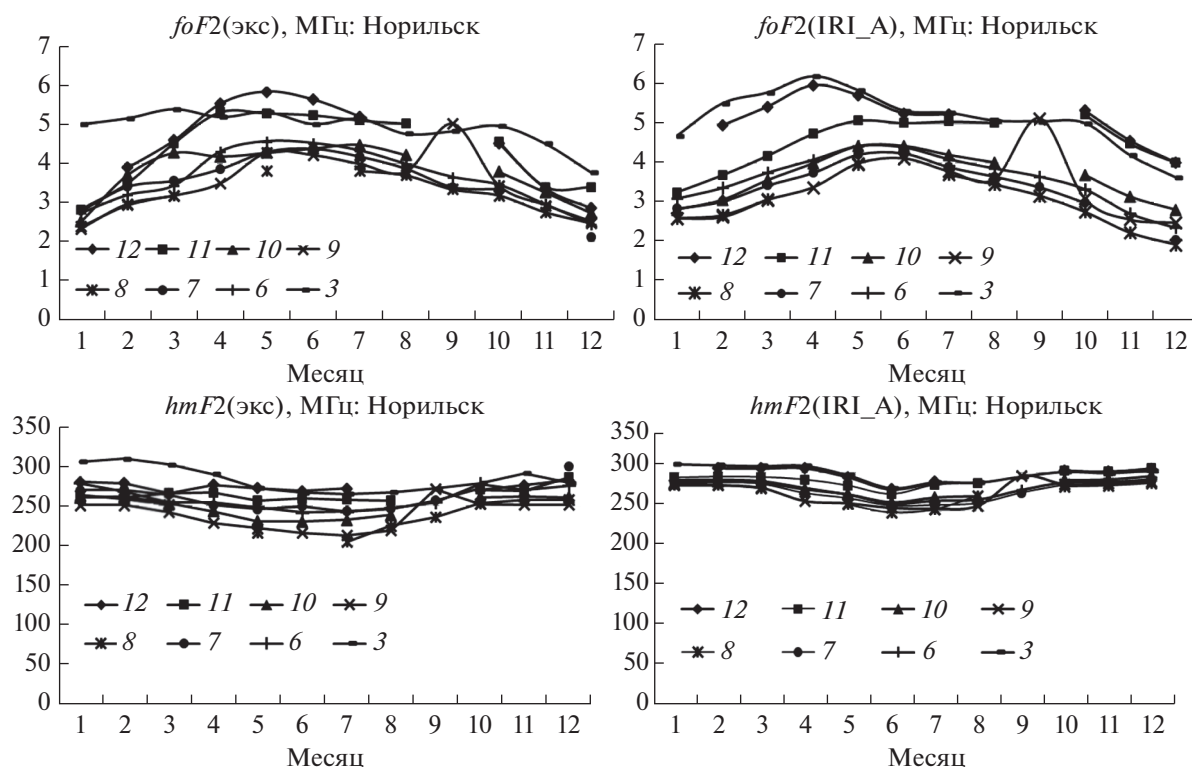


Рис. 3. Климатология параметров $foF2$ и $hmF2$ в сравнении с результатами модели IRI.

получены величины 1–10% в летнее время, 15–50% в зимнее время. Это дополняет результаты работы [Maltseva et al., 2013] для других высокоширотных станций, расположенных в американском и европейском регионах. Полученные в этой работе оценки для двух лет (2001 и 2007 гг.) показали зависимость σ для $foF2$ от солнечной активности: в минимуме σ в 1.5–2 раза больше, чем в максимуме, для медиан. Полученные в данной работе оценки для летних условий ниже границы значений из работы [Maltseva et al., 2013], зимние значения превышают верхнюю границу. Для параметра $hmF2$ имеется зависимость от солнечной активности: при высокой активности $\sigma < 10\%$, при низкой активности – 10–20%. Таким образом, оценки для $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ превышают точность определения стандартных параметров $foF2$, $hmF2$, что создает трудности при разработке модели $B0$, $B1$.

Суточный ход для различных месяцев максимальной и минимальной активности представлен на рис. 4, 5 для $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ и модельных значений. В суточном ходе вариации $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$ присущи только летним месяцам с четкой зависимостью от солнечной активности, в зимнее время $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$ имеют минимум и практически постоянны. Для месяцев равноденствия значения $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$ совпадают и лежат между минимумом и миниму-

мом. Эти тенденции близки к среднеширотным. Модель IRI обеспечивает следующие результаты в суточном ходе. Значения $B0_IRI_A$ постоянны, находятся на уровне равноденственных значений $B0_Neh_I$, проявляют некоторую зависимость от солнечной активности. Значения $B1_IRI_A$ постоянны только в летнее время, в остальные месяцы есть четкая тенденция сезонных вариаций с максимумами в полночь, но значения завышены.

В работе [Altadill et al., 2009] суточные зависимости $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$ приведены для двух сезонов (лета и зимы) с усреднением по соответствующим месяцам: май–июль для лета и ноябрь–январь для зимы. Для определения того, как работает модель [Altadill et al., 2009] в случае отдельной станции, рассчитали такие же зависимости для эталонной ст. Juliusruh с усреднением по тем же годам, для которых были данные для ст. Норильск, чтобы сравнить с результатами этой станции, которая попадает в средне-высокоширотный диапазон (40° – 60°) согласно рекомендациям работы [Altadill et al., 2009]. Результаты представлены на рис. 6, 7 для $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$. Годы высокой активности 2003 и 2012, годы низкой активности – 2006–2010.

Для $B0_Neh_I$ лучше всего совпадают летние значения как для высокой, так и низкой активности. Зимние значения $B0_Neh_I$ для Juliusruh ниже модельных, особенно это относится к днев-

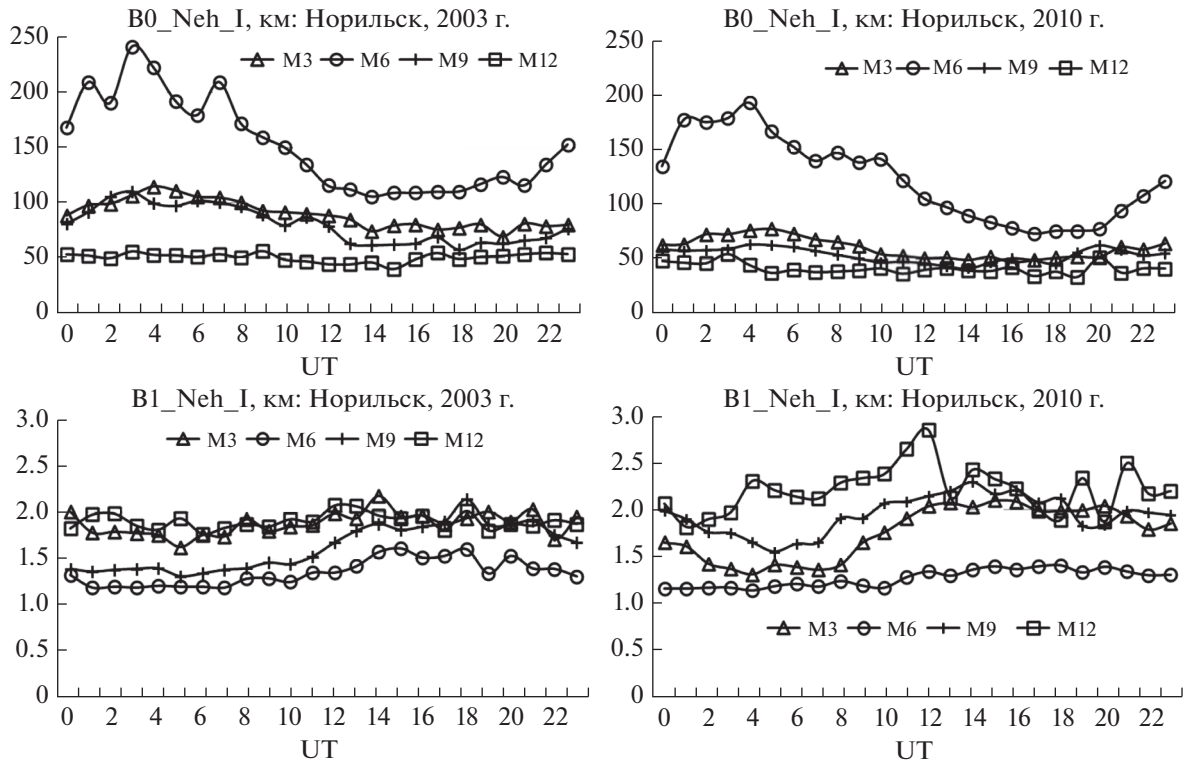


Рис. 4. Суточный ход значений параметров B0_Neh_I и B1_Neh_I для максимальной (2003 г.) и минимальной (2010 г.) солнечной активности.

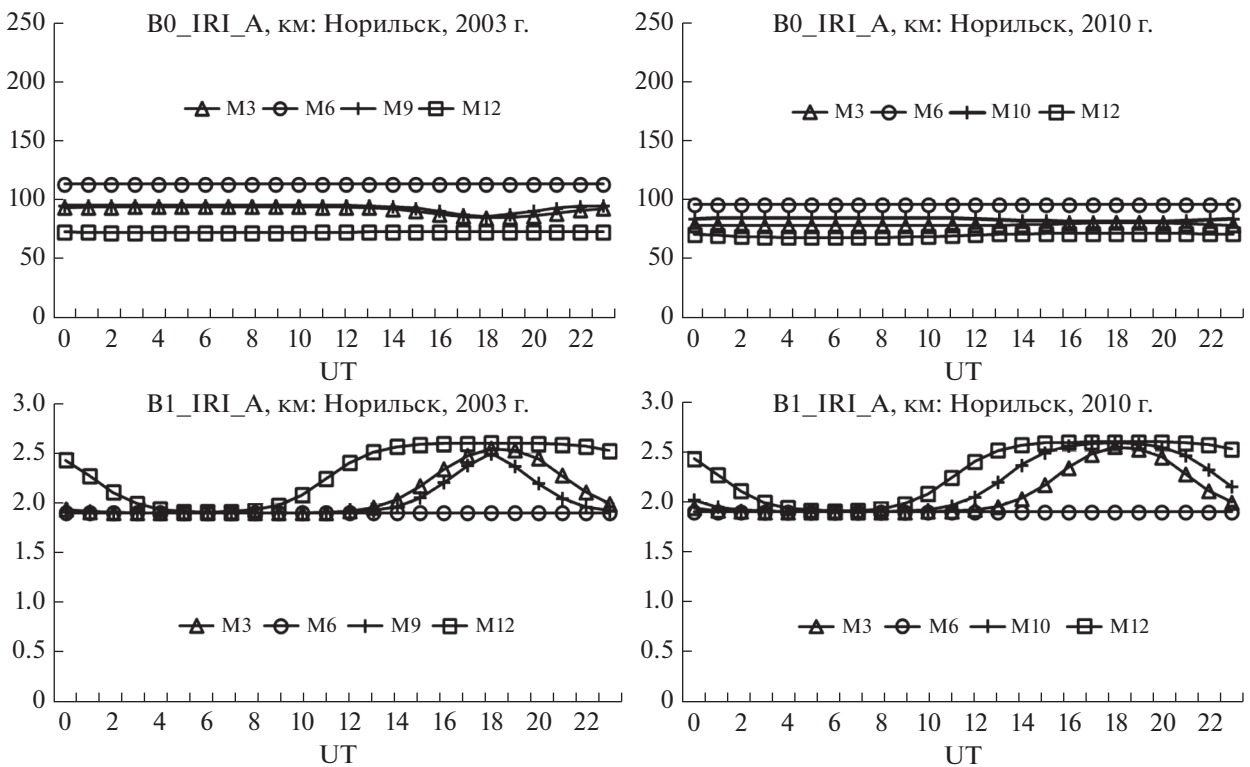


Рис. 5. Суточный ход модельных B0_IRI_A и B1_IRI_A для максимальной (2003 г.) и минимальной (2010 г.) солнечной активности.

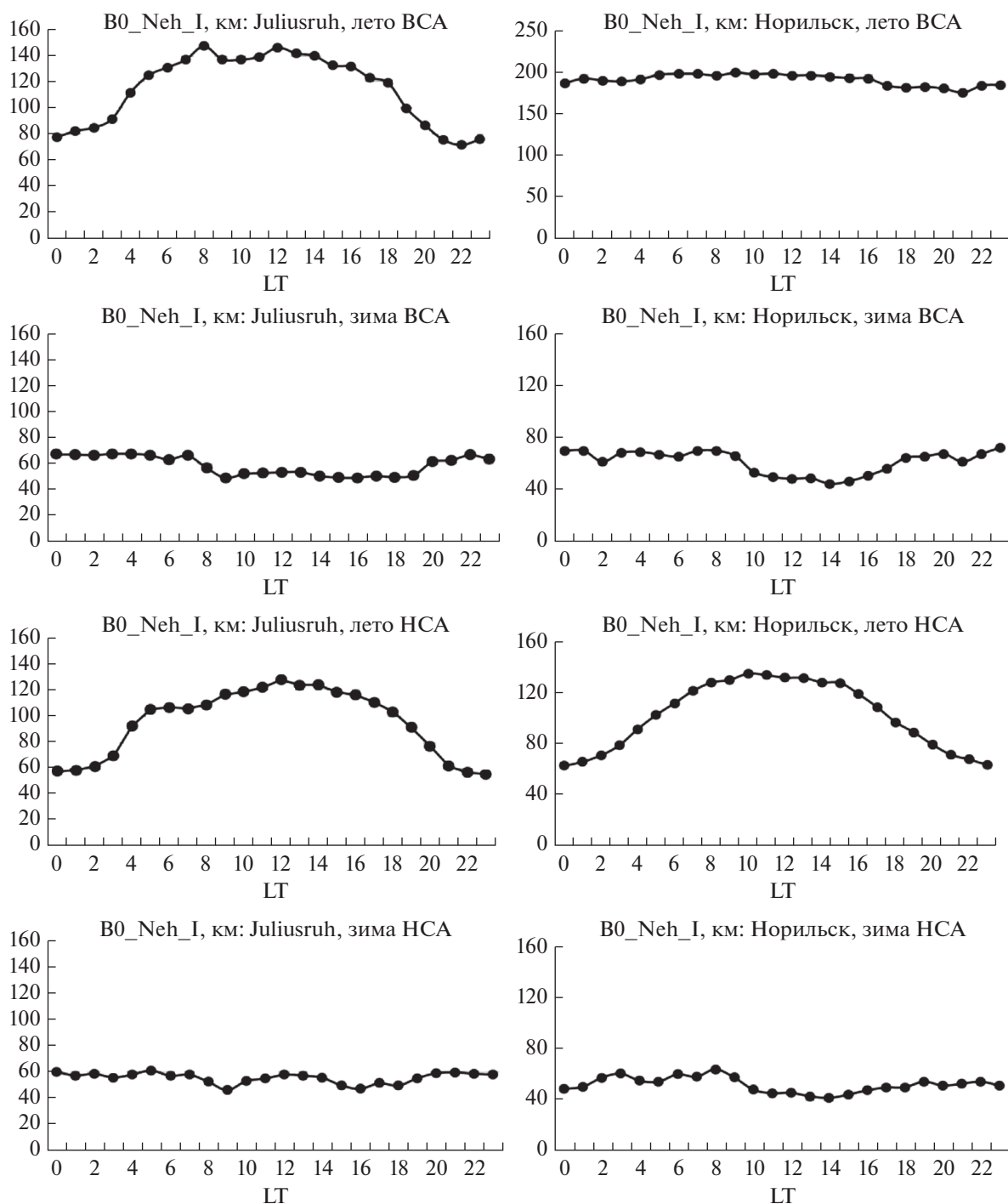


Рис. 6. Суточные вариации $B0_Neh_I$ для различных сезонов и уровней солнечной активности для двух станций.

ным значениям в период высокой активности, маскирующим восходно-заходные впадины, хорошо видимые на модельной кривой. Для ст. Норильск, которая попадает в более высокоширотный диапазон, летние значения намного выше и кривая суточного хода почти плоская. Для зимних значений кривые двух станций близки за исключением более длинного дневного периода.

Для $B1_Neh_I$ диапазон значений для Juliusruh во всех случаях шире. В зимний период восходно-заходные максимумы выражены более сильно. В период низкой активности на модельной кривой их нет, они присутствуют только в разбросе значений. Для ст. Норильск диапазоны $B1_Neh_I$ существенно уже, сами значения ниже, восходно-заходные максимумы выражены в период высо-

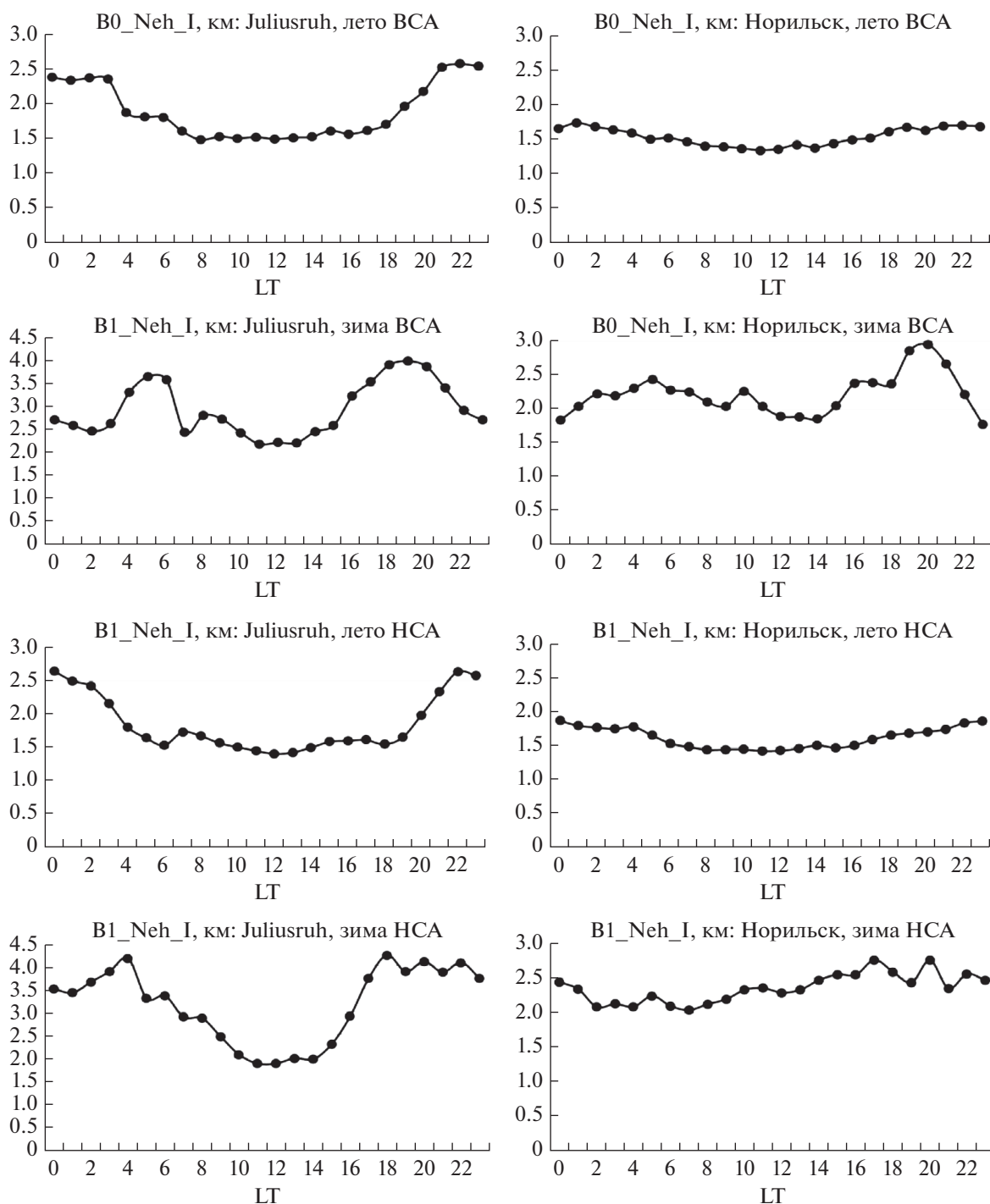


Рис. 7. Суточные вариации $B1_Neh_I$ для различных сезонов и уровней солнечной активности для двух станций.

кой активности. Таким образом, модельные значения более сглаженные за счет статистики, но значения для ст. Juliusruh лежат в пределах вариаций. Особенности поведения параметров $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ в высокоширотной зоне отличаются, что связано с меньшей освещенностью.

Некоторые работы посвящены исследованию корреляции между параметрами, поскольку в

случае отсутствия данных можно было бы использовать регрессионные соотношения для заполнения пробелов.

Результаты расчетов коэффициентов корреляции $\rho(hmF2, B0_Neh_I)$, $\rho(\tau, B0_Neh_I)$, $\rho(\tau, hmF2)$ между различными параметрами для двух станций для дневных и ночных условий при низкой

(НА) и высокой (ВА) активности сводятся к следующему.

Начнем с коэффициента между $hmF2$ и $B0_Neh_I$. Для Juliusruh в дневное время ($LT = 13$) зимой ВА в январе–феврале и ноябре–декабре $\rho(hmF2, B0_Neh_I) \geq 0.8$, летом $\rho(hmF2, B0_Neh_I) \sim 0.2$. При НА зимой значения ниже, летом выше (в июне $\rho(hmF2, B0_Neh_I) \sim 0.8$). У Норильска зимой ВА $\rho(hmF2, B0_Neh_I) \geq 0.6$, летом небольшие отрицательные значения. При НА зимой ситуация близка к летней, летом значения положительные. В ночное время ($LT = 01$) у Juliusruh при ВА коэффициенты $\rho(hmF2, B0_Neh_I)$ положительны с максимумом в апреле–мае и минимумом в июле. При НА в период с января по октябрь $\rho(hmF2, B0_Neh_I)$ лежит в диапазоне $0.8-1.0$, в ноябре–декабре $\rho(hmF2, B0_Neh_I) = 0.6$. У Норильска ночью ($LT = 0$) зимой, весной и осенью $\rho(hmF2, B0_Neh_I) > 0.8$, летом $\rho(hmF2, B0_Neh_I) < 0.4$. При НА поведение похожее. Таким образом, в зимнее время корреляция всегда высокая (днем и ночью). В утренние часы ($LT = 07$) у Juliusruh к месяцам с высокими коэффициентами относятся только январь–февраль и ноябрь–декабрь, зато летние значения увеличиваются до 0.7 . У Норильска ($LT = 06$) при ВА зимние значения как у Juliusruh, летние – меньше. В вечерние часы ($LT = 19$) у Juliusruh с января по март и с сентября по ноябрь $\rho(hmF2, B0_Neh_I) > 0.8$, в остальные месяцы $\rho(hmF2, B0_Neh_I) > 0.4$. При НА все коэффициенты больше 0.5 . У Норильска ($LT = 18$) при ВА высокие коэффициенты в январе–феврале и октябре–декабре. При НА кроме января, ноября–декабря корреляция отсутствует. Изучение корреляции параметра τ с $hmF2$ и $B0_Neh_I$ важно, поскольку определение τ доступнее и надежнее. Результаты приводятся для дневных и ночных условий ВА и НА в сравнении для двух станций. Днем для ст. Juliusruh при ВА $\rho(\tau, hmF2)$ имеет большие абсолютные значения при отрицательном знаке только летом (июнь–июль), $\rho(\tau, B0_Neh_I)$ имеет большие положительные значения (~ 0.8) в месяцы равноденствия. В период НА усиливается отрицательная корреляция между τ и $hmF2$ и резко ослабляется положительная корреляция между τ и $B0_Neh_I$. У Норильска днем $\rho(\tau, hmF2)$ лежит в диапазоне ($-0.6-0.4$) при любой активности, $\rho(\tau, B0_Neh_I)$ имеет большие положительные значения летом и осенью (май–август, октябрь–ноябрь) при ВА, при НА корреляция очень мала. Ночью для Juliusruh $\rho(\tau, hmF2)$ лежат в диапазоне ($-0.4-0.6$) при ВА, при НА $\rho(\tau, hmF2)$ имеют место маленькие отрицательные значения. Коэффициенты $\rho(\tau, B0_Neh_I)$ малы при НА и совпадают с $\rho(\tau, hmF2)$ при ВА. Ночные $\rho(\tau, hmF2)$ у Норильска лежат в диапазоне ($-0.4-0.6$), $\rho(\tau, B0_Neh_I)$ имеют большие значения в апреле–июле и октябре. При НА оба коэффициента положительные, но боль-

шие значения только в январе и ноябре. В утренние часы оба коэффициента малы, вечером $\rho(\tau, B0_Neh_I)$ лежат в диапазоне ($0.6-0.8$) летом при ВА, при НА $\rho(\tau, hmF2)$ летом имеет большие отрицательные значения, $\rho(\tau, B0_Neh_I)$ отрицательны и малы. Пример коэффициентов линейной корреляции $\rho(\tau, B0_Neh_I)$ и $\rho(\tau, hmF2)$ на каждый час дан на рис. 8 для нескольких лет и для двух станций (среднеширотной и высокоширотной).

Результаты для 2010 г. (минимум солнечной активности) показаны квадратами. Они близки для обеих станций, но сильно отличаются от ситуации для экваториальной станции. Коэффициенты $\rho(\tau, B0_Neh_I)$ для среднеширотной станции чуть больше, чем для высокоширотной, но все не дотягивают до уровня значимой корреляции. Коэффициенты для высокой солнечной активности в большинстве случаев выше, чем для низкой активности, но также далеки от значимых значений. Результаты для $\rho(\tau, hmF2)$ для обеих станций показывают хорошую корреляцию в зимних и осенних условиях.

4. ПОВЕДЕНИЕ $B0_Neh_I$ И $B1_Neh_I$ ВО ВРЕМЯ ВОЗМУЩЕНИЙ

Периоды возмущений рассмотрены для 2003, 2009 и 2012 гг. В эти периоды, когда данные ВЗ были неполными, знак возмущения контролировался по ТЕС. Всего получилось 64 случая, из них в 55 случаях удалось отождествить вариации параметров. Случаи были сгруппированы по знакам отклонений от соответствующих медиан (положительные, отрицательные). Случаи положительных и отрицательных отклонений $\delta TЕС$ разделились почти пополам. Следующие вариации, знаки которых учитывались, относились к $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$. В группе отрицательных отклонений $\delta TЕС$ наибольшую вероятность имеют случаи увеличения $B0_Neh_I$ и уменьшения $B1_Neh_I$. Следующая подгруппа включает увеличение $B0_Neh_I$ и близость $B1_Neh_I$ к медиане. В группе положительных отклонений $\delta TЕС$ больше случаев увеличения $B0_Neh_I$ и уменьшения $B1_Neh_I$, вторая подгруппа включает уменьшение $B0_Neh_I$ и увеличение $B1_Neh_I$. Это позволило свести большинство случаев в табл. 1.

Оставшиеся случаи включают разнообразные комбинации знаков вариаций. Таким образом, в большинстве случаев реакция $B0_Neh_I$ заключается в увеличении значений, а для изменений $B1_Neh_I$ существует неопределенность. Ниже дается иллюстрация поведения параметров для конкретных случаев.

Первый случай 27–31 марта 2003 г. с минимальным $Dst = -76$ нТл приведен на рис. 9 и пока-

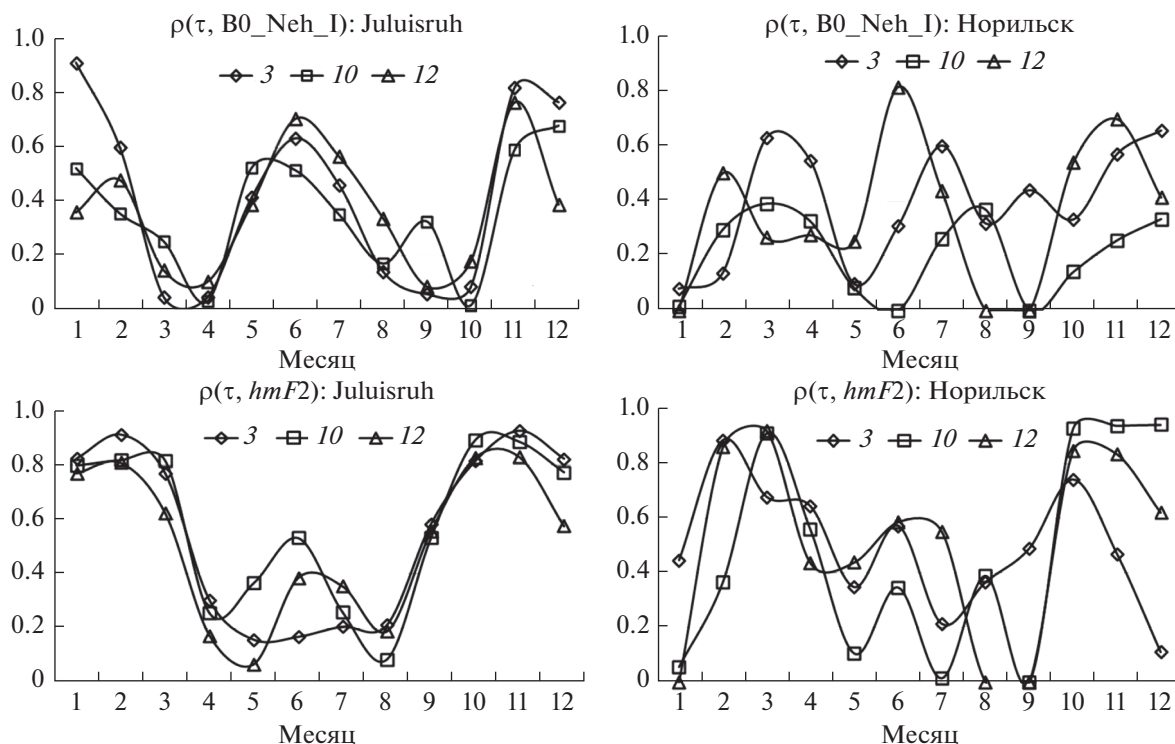


Рис. 8. Корреляция параметра τ с толщиной $B0_Neh_I$ и высотой максимума $hmF2$.

зывает отрицательные возмущения 28 и 30.03.2003 г. Квадратами показана медиана.

Вариации ТЕС соответствуют вариациям $foF2$. Вариации $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$ происходят с противоположными знаками. Июль 2003 г. представлен двумя периодами возмущений: 16–17.07 с минимальным $Dst = -90$ нТл и 27–28.07 с минимальным $Dst = -53$ нТл – рис. 10.

Как и в первом случае, видна синхронность изменений $foF2$ и ТЕС, а также наличие больших пробелов в данных ВЗ. Практически все дни охвачены отрицательным возмущением. $B0_Neh_I$ увеличивается, $B1_Neh_I$ колеблется в пределах погрешности. Следующие примеры иллюстрируют случаи положительных возмущений. На рисунке 11 показан случай 1–5 ноября 2003 г.

В поведении ТЕС видно длительное положительное возмущение. По-видимому, это влияние

магнитной супербури 30 октября с минимальным $Dst = -383$ нТл, хотя и весь этот период является возмущенным. Отклонения $\delta foF2$ от медианы также везде положительны и велики. Поведение вариаций $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$ аналогично первому случаю. Нужно отметить, что в ноябре 2003 г., как и в октябре, была одна из самых сильных супербурь с минимальным $Dst = -422$ нТл. Если в период октябрьской супербури данных ВЗ по ст. Норильск не было вообще, то в ноябре немного данных было доступно, однако они не попали на период сильного положительного возмущения 20.11, когда $\delta TЕС$ превышало 120%. Отрицательная фаза 21.11 показала результаты первой группы: сильное уменьшение $\delta foF2$, большое увеличение $\delta B0_Neh_I$ и уменьшение $\delta B1_Neh_I$. Результаты для 4-й группы ($\delta TЕС > 0$, $\delta B0_Neh_I < 0$, $\delta B1_Neh_I > 0$) показаны на примере 1–2 июня 2003 г. на рис. 12.

Таблица 1. Поведение отклонений параметров во время возмущений

$\delta TЕС$	$\delta B0_Neh_I, \delta B1_Neh_I$	Примеры
$\delta TЕС < 0$ (возм)	$\delta B0_Neh_I > 0, \delta B1_Neh_I < 0$ $\delta B0_Neh_I > 0, \delta B1_Neh_I \sim 0$	27–31.03.2003 г. 16–17, 27–28.07.2003 г.
$\delta TЕС > 0$ (возм)	$\delta B0_Neh_I > 0, \delta B1_Neh_I < 0$ $\delta B0_Neh_I < 0, \delta B1_Neh_I > 0$	01–05.11.2003 г. 01–02.06.2003 г.
$\delta TЕС > 0$ (спок)	$\delta B0_Neh_I \sim 0, \delta B1_Neh_I > 0$	14–17.08.2003 г.

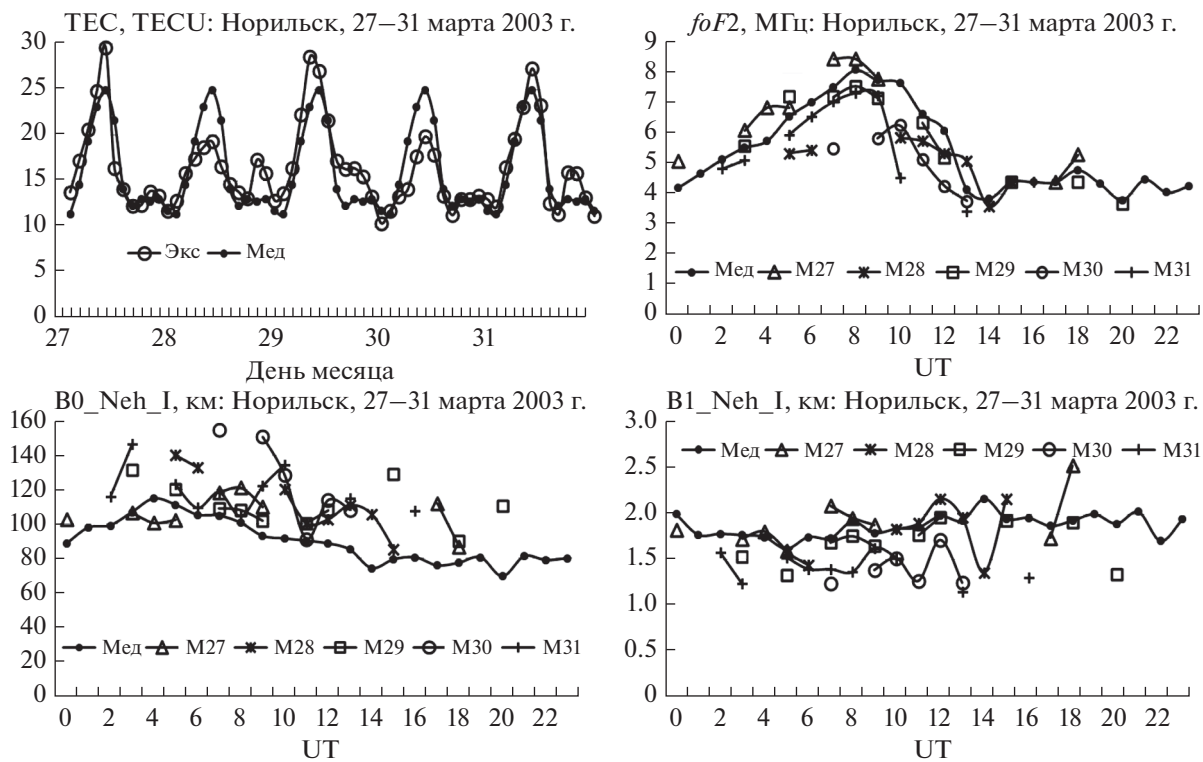


Рис. 9. Случай возмущения 27–31 марта 2003 г.

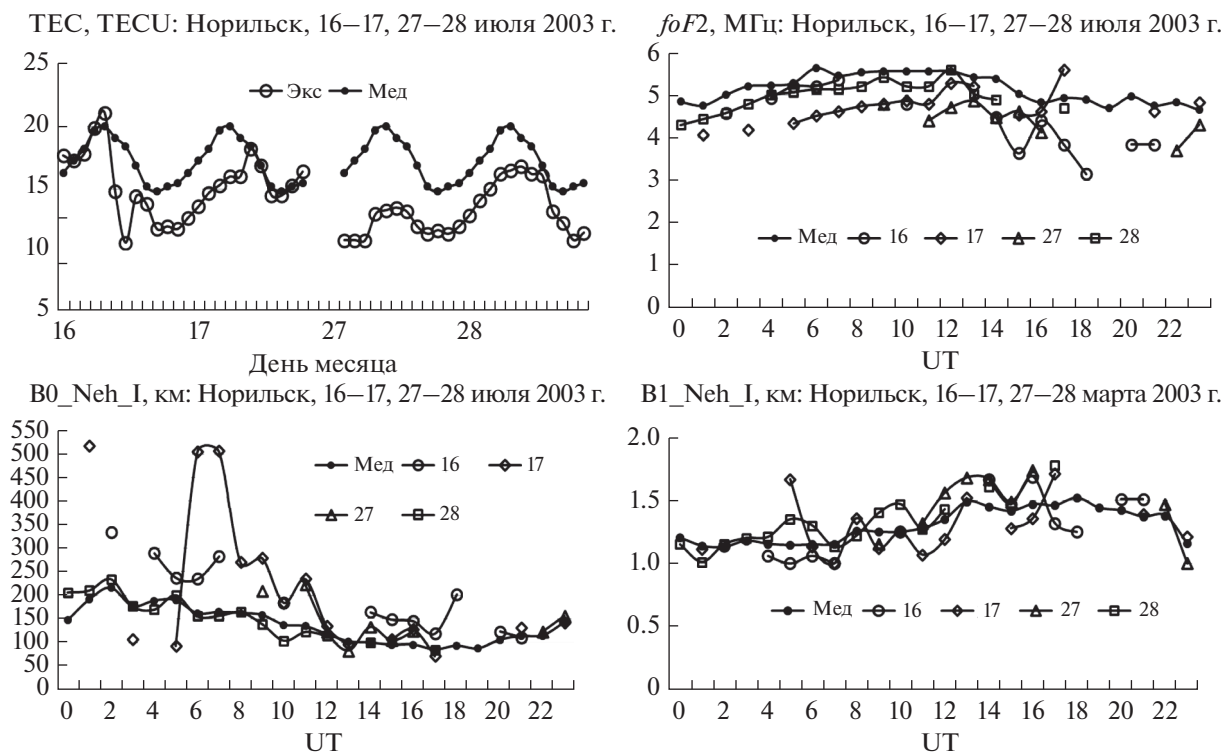


Рис. 10. Случай возмущений 16–17 и 27–28 июля 2003 г.

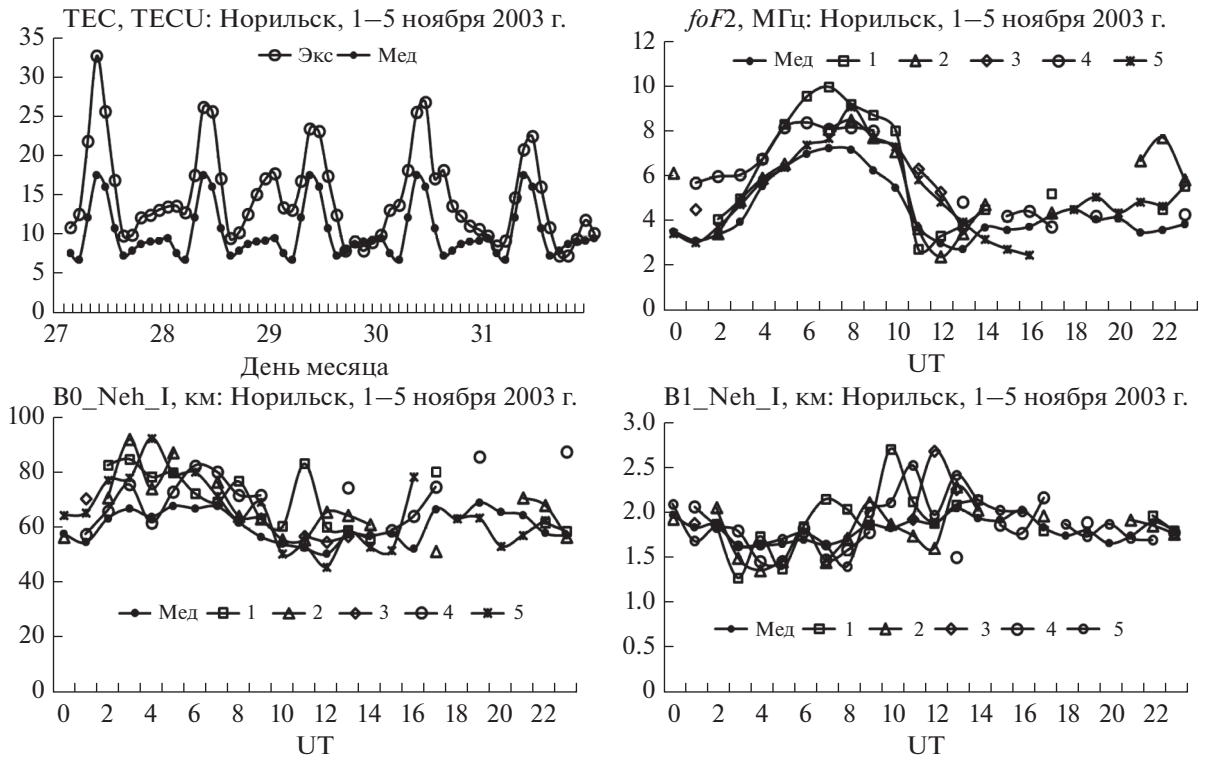


Рис. 11. Случай возмущения 1–5 ноября 2003 г.

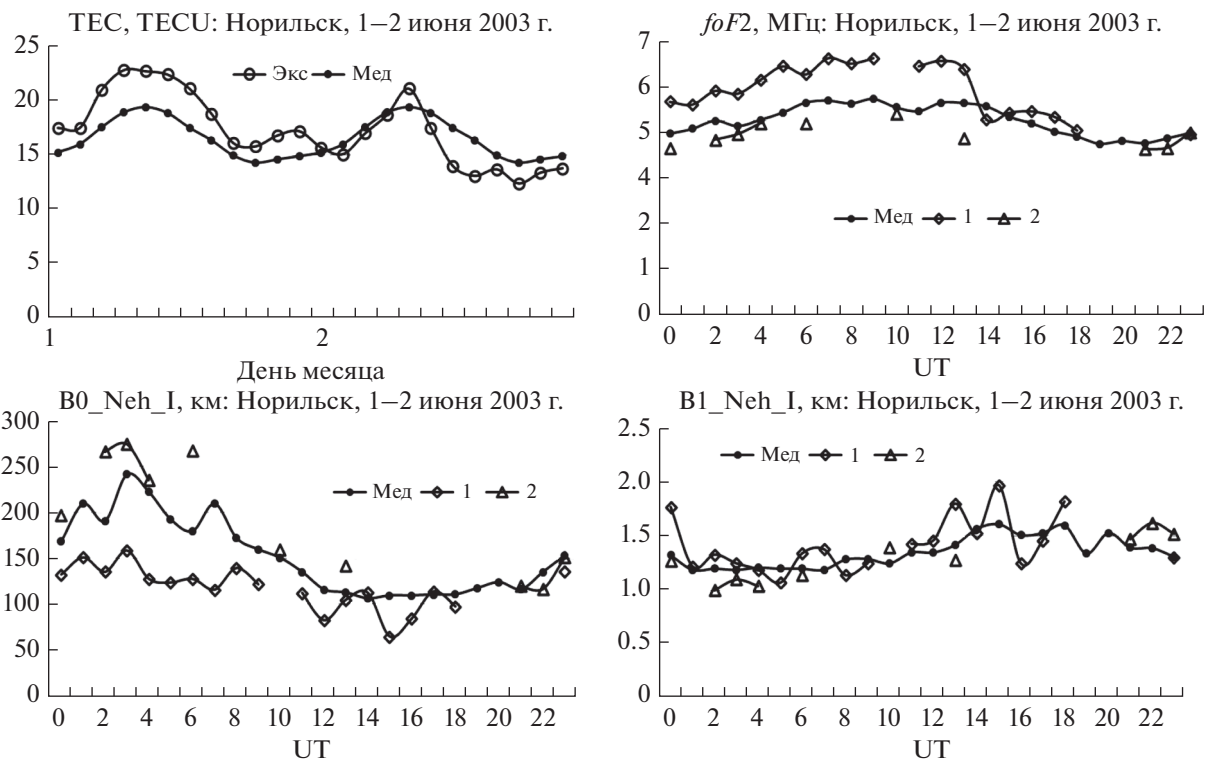


Рис. 12. Случай возмущения 1–2 июня 2003 г.

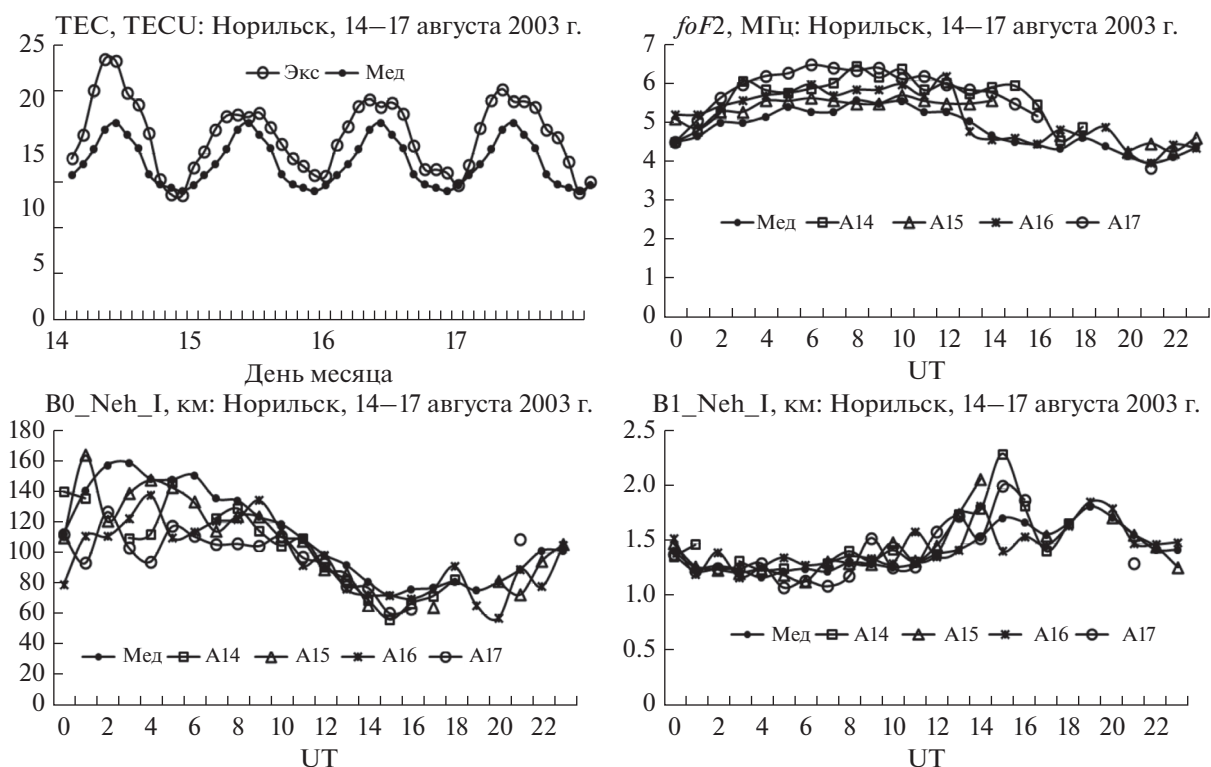


Рис. 13. Случай возмущения 14–17 августа 2003 г.

В этом случае наиболее четко проявляется синхронность вариаций в TEC, $foF2$, $B0_Neh_I$. Последняя группа включает случаи, когда положительные всплески TEC происходят без изменений Dst . В этих случаях было доступно больше данных по $foF2$, соответственно, по $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ и видны четкие вариации: $B0_Neh_I$ намного ниже медианы, $B1_Neh_I$ выше своей медианы. Пример дается для 14–17 августа 2003 г. В этом случае период спокойных дней продолжался с 9 по 16.08. Результаты приведены на рис. 13.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы сводятся к следующему: оценены климатологические особенности поведения параметров $B0_Neh_I$ и $B1_Neh_I$, определяющих форму профиля ионосферы, по данным высокоширотной станции в форме, позволяющей сравнивать полученные результаты с результатами Altadill et al. [2009] в других широтных зонах (рис. 6, 7). Получено, что средние значения $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ не являются надежными, что создает трудности при разработке модели $B0$, $B1$. Сравнение с моделью IRI показало большие расхождения. Исследовано поведение $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ во время геомагнитных возмущений. Показано, что существуют несколько типов реак-

ции параметров TEC, $foF2$, $B0_Neh_I$, $B1_Neh_I$ на возмущения, которые в первом приближении можно представить в виде таблицы из 5 групп. В большинстве случаев $B0_Neh_I$ растет во время возмущений, а $B1_Neh_I$ падает. Не обнаружено зависимости результатов от уровня возмущений. Более того, “возмущенные” вариации всех параметров могут иметь место и в спокойных условиях. Эти случаи наиболее трудны для прогнозирования. Во время возмущений и не только имеются большие пробелы в данных. Полное электронное содержание TEC правильно отражает состояние ионосферы и может служить для определения знака возмущения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта БЧНЗ.9696.2017/8.9 Минобрнауки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alagbe G.A. Quiet- and storm-time correlation of F2-layer slab thickness and B0 at an equatorial station // Int. J. Res. Rev. Appl. Sci. V. 13. № 1. P. 133–138. 2012.
- Altadill D., Torta J.M., Blanch E. Proposal of new models of the bottom-side B0 and B1 parameters for IRI // Adv. Space Res. V. 43. P. 1825–1834. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.08.014>

- *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 1990. National Space Science Data Center, Report 90-22. Greenbelt, Maryland. 1990.
- *Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X.* International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // *Space Weather*. V. 15. P. 418–429. <https://doi.org/10.1002/2016SW001593>. 2017.
- *Bilitza D., Radicella S.M., Reinisch B.W., Adeniyi J.O., Mosert Gonzalez M.E., Zhang S.R., Obrou O.* New B0 and B1 models for IRI // *Adv. Space Res.* V. 5. № 1. P. 89–95. 2000.
- *Chuo Y.J.* Variations of ionospheric profile parameters during solar maximum and comparison with IRI-2007 over Chung-Li, Taiwan // *Ann. Geophysicae*. V. 30. № 8. P. 1249–1257. 2012. <https://doi.org/10.5194/angeo-30-1249-2012>.
- *Chuo Y.J., Lee C.C., Chen W.S.* Comparison of ionospheric equivalent slab thickness with bottomside digisonde profile over Wuhan // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 72. P. 528–533. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.02.003>
- *Gulyaeva T.L.* Progress in ionospheric informatics based on electron density profile analysis of ionograms // *Adv. Space Res.* V. 17. № 6. P. 39–48. 1987.
- *Gulyaeva T.L.* Variable coupling between the bottomside and topside thickness of the ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. P. 528–536. doi . 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.10.015>
- *Huang X., Reinisch B.W.* Vertical electron density profiles from the digisonde network // *Adv. Space Res.* V. 18. P. 121–129. 1996.
- *Lei J., Liu L., Wan W., Zhang S.-R., J. M. Holt* A statistical study of ionospheric profile parameters derived from Millstone Hill incoherent scatter radar measurements // *Geophys. Res. Lett.* V. 31. L14804. 2004. <https://doi.org/10.1029/2004GL020578>
- *Liu L., Wan W., Ning B., Zhang M.-L., He M., Yue X.* Longitudinal behaviors of the IRI-B parameters of the equatorial electron density profiles retrieved from FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation measurements // *Adv. Space Res.* V. 46. P. 1064–1069. doi . 2010. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.005>
- *Maltseva O.A., Mozhaeva N.S., Nikitenko T.V.* Comparison of model and experimental ionospheric parameters at high latitudes // *Adv. Space Res.* V. 51. № 4. P. 599–609. 2013.
- *Odeyemi O.O., Adeniyi J.O., Oladipo O.A., Olawepo A.O., Adimula I.A., Oyeyemi E.O.* Investigation on slab-thickness and B0 over an equatorial station in Africa and comparison with IRI model // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 179. P. 293–306. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.08.002>
- *Oinats A.V., Ratovsky K.G., Kotovich G.V.* Comparison of the Irkutsk digisonde data with the IRI model predictions for quiet and disturbed geomagnetic conditions in 2003 and 2004 / XXVIII GA URSI New Delhi, India, October 23–29, 2005. Programme, Oral Presentations, New Delhi. P. 156. 2005.
- *Perna L., Venkatesh K., Pillat V.G., Pezzopane M., Fagundes P.R., Ezquerd R.G., Cabrera M.A.* Bottom side profiles for two close stations at the southern crest of the EIA: Differences and comparison with IRI-2012 and NeQuick2 for low and high solar activity // *Adv. Space Res.* V. 61. P. 295–315. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.007>
- *Ramakrishnan S., Rawer K.* Model electron density profiles obtained by empirical procedures / Space Research XII. Proc. Fourteen Plenary Meeting, Seattle, Wash; German Democratic Republic; 18 June–2 July 1971. P. 1253–1259. Berlin: Akademie. 1972.
- *Reinisch B.W., Huang X., Galkin I.A., Paznukhov V., Kozlov A.* Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionosond drift measurements with digisondes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 67. P. 1054–1062. 2005.
- *Sethi N., Dabas R.S., Das R.D.* Diurnal and seasonal variation of B0, B1 parameters during high solar activity period at low mid-latitude and their comparisons with IRI-2001 model // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 69. P. 767–774. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.01.008>
- *Sethi N., Dabas R.S., Upadhyaya A.* Midday bottomside electron density profiles during moderate solar activity and comparison with IRI-2001 // *Adv. Space Res.* V. 43. P. 973–983. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.08.007>
- *Themens D.R., Jayachandran T., Nicolls M.J., MacDougall J.W.* A top to bottom evaluation of IRI 2007 within the polar cap // *J. Geophys. Res. Space* V. 119. P. 6689–6703. 2014. <https://doi.org/10.1002/2014JA020052>
- *Zaalov N.Y., Moskaleva E.V., Burmakina T.S.* Application of the IRI model to the HF propagation model with optimization of the ionosphere parameters to day-to-day variation // *Adv. Space Res.* V. 60. P. 2252–2267. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.018>
- *Zhang M.-L., Wan W., Liu L., Shi J.K.* Variability of the behavior of the bottomside (B0, B1) parameters obtained from the ground-based ionograms at China's low latitude station // *Adv. Space Res.* V. 42. P. 695–702. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.022>