

УДК 533.95:537.84:551.510.535

## ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ $NmF2$ В ГЕОМАГНИТО-СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ ПО ДАННЫМ ИОНОЗОНДА МОСКВА

© 2022 г. А. В. Павлов<sup>1</sup>, \*, Н. М. Павлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

\*e-mail: pavlov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 30.10.2021 г.

После доработки 21.12.2021 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Выполнено исследование суточных вариаций статистических характеристик изменчивости электронной концентрации  $NmF2$  максимума слоя  $F2$  ионосферы для каждого месяца  $M$  года в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности по данным часовых наземных ионозондовых измерений критической частоты слоя  $F2$  ионосферы с 1957 по 2019 г. над Москвой. В работе вычислялись математическое ожидание  $NmF2_E$ , наиболее вероятное значение  $NmF2_{MP}$ , арифметически средняя месячная медиана  $NmF2_{MED}$ , стандартные отклонения  $\sigma_E$ ,  $\sigma_{MP}$  и  $\sigma_{MED}$  величины  $NmF2$  от  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$  и коэффициенты вариаций  $CV_E$ ,  $CV_{MP}$  и  $CV_{MED}$  значения  $NmF2$  относительно  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$  соответственно. Показано, что  $NmF2_E$  или арифметически среднее значение  $NmF2_A$  обеспечивает наилучшее описание множества измерений  $NmF2$  одним единственным статистическим параметром  $NmF2$ . Использование  $\sigma_{MED}$  и  $CV_{MED}$  или  $\sigma_{MP}$  и  $CV_{MP}$  вместо  $\sigma_E$  и  $CV_E$  приводит к ошибочным выводам об изменчивости  $NmF2$ . Выполнены расчеты изменения величины коэффициента  $CV_E$  при переходе от низкой к средней солнечной активности, определяющее влияние солнечной активности на изменчивость  $NmF2$ . Показано, что рассматриваемая вариация солнечной активности приводит к увеличению или уменьшению изменчивости  $NmF2$  в диапазоне изменения коэффициента  $CV_E$  от  $-8.2\%$  в апреле до  $12.2\%$  в сентябре. Получено, что при возрастании солнечной активности наибольшая продолжительность периодов увеличения и уменьшения изменчивости  $NmF2$  реализуется в сентябре и в феврале, соответственно. Продолжительность периодов уменьшения изменчивости  $NmF2$  при возрастании солнечной активности наибольшая в зимних условиях и наименьшая в летних условиях в сравнении с каждым из других сезонов года.

DOI: 10.31857/S0016794022030142

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Электронная концентрация  $NmF2$  максимума слоя  $F2$  ионосферы, измеренная в геомагнито-спокойных условиях примерно над одной и той же точкой поверхности Земли при одних и тех же или при близких значениях местного времени, номера дня в году и уровне солнечной активности, значительно изменяется от одного дня к другому дню и рассматриваемая (day-to-day) изменчивость  $NmF2$  и ее источники обсуждались, например, в обзорах [Forbes et al., 2000; Rishbeth and Mendillo, 2001; Fang et al., 2018]. Если рассматривать  $NmF2$  как случайный параметр, то для изучения его вариаций можно применять статистические методы, описанные, например, в монографиях [Кремер, 2012; Ross, 2004; Gatti, 2005]. Такой статистический подход был использован авторами работ [Павлов и Павлова, 2012; Pavlov

et al., 2010; Pavlov, 2012; Pavlov and Pavlova, 2013, 2014, 2021] для исследования зимней и полугодовой аномалий  $NmF2$  и аномального явления весенне-осенней асимметрии  $NmF2$  вблизи полдня. В работах [Павлов и Павлова, 2015, 2019; Pavlov and Pavlova, 2016, 2021] были вычислены математическое ожидание  $NmF2_E$ , арифметически среднее  $NmF2_A$ , наиболее вероятное (мода)  $NmF2_{MP}$  и арифметически средняя месячная медиана  $NmF2_{MED}$  электронной концентрации максимума слоя  $F2$  ионосферы для геомагнито-спокойных условий каждого месяца года вблизи полдня при низкой солнечной активности по данным измерений критической частоты  $foF2$  слоя  $F2$  ионосферы средних широт с помощью ионозондов северного географического полушария за период с 1957 по 2017 г. В этих исследованиях было впервые показано, что для каждого ионозонда значе-

ния  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$  могут заметно отличаться друг от друга при фиксированных значениях месяца года  $M$  и момента мирового времени  $UT$ .

Стандартные (среднеквадратичные) отклонения  $\sigma_E(UT, M)$ ,  $\sigma_{MED}(UT, M)$  и  $\sigma_{MP}(UT, M)$  величины  $NmF2$  соответственно от  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$  и коэффициенты  $CV_E(UT, M)$ ,  $CV_{MED}(UT, M)$  и  $CV_{MP}(UT, M)$  вариации значения  $NmF2$  относительно  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$  соответственно характеризуют изменчивость  $NmF2$  ото дня к другому дню для выбранных  $M$  и  $UT$  над одной и той же точкой поверхности Земли в геомагнитно-спокойных условиях и примерно одинаковом уровне солнечной активности. Суточные вариации вышеуказанных статистических характеристик изменчивости  $NmF2$  были рассчитаны по данным ионозондов Москвы, Dourbes и Juliusruh за период 1957–2017 гг. для условий низкой солнечной активности в работах [Павлов и Павлова, 2019; Pavlov and Pavlova, 2021]. В этих исследованиях впервые показано, что математическое ожидание  $NmF2$  следует использовать в качестве количественной характеристики, обеспечивающей наилучшее описание множества измерений  $NmF2$  одним единственным статистическим параметром  $NmF2$  в геомагнитно-спокойных условиях при низкой солнечной активности для выбранного месяца года и момента времени, а величины  $\sigma_E(UT, M)$  и  $CV_E(UT, M)$  – характеристики абсолютной и относительной изменчивости  $NmF2$ , соответственно.

Цель настоящей работы – рассчитать для каждого месяца года суточные вариации вышеуказанных статистических характеристик изменчивости  $NmF2$  в геомагнитно-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности над Москвой по данным часовых измерений  $foF2$  наземного ионозонда с 1957 по 2000 г. и изучить влияние вариаций солнечной активности на рассматриваемые статистические характеристики изменчивости  $NmF2$ .

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ АНАЛИЗА

В работе используются часовые измерения  $foF2$  наземным ионозондом над Москвой ( $55.5^\circ N$ ,  $37.3^\circ E$ ) в течение периода с 1957 по 2019 г., скопированные с помощью интернета из базы мирового центра данных по солнечно-земной физике (Великобритания). Для определения значений  $NmF2$ , измеренных ионозондом, используется связь между  $NmF2$  и  $foF2$  (см., например, [Пиггот и Равер, 1978]).

Следуя подходу [Павлов и Павлова, 2012, 2015, 2019; Pavlov et al., 2010; Pavlov, 2012; Pavlov and Pavlova, 2013, 2014, 2016], величина  $NmF2$  рас-

сматривается как геомагнито-спокойная электронная концентрация максимума слоя  $F2$  ионосферы, если трехчасовой индекс геомагнитной активности  $Kp \leq 3$  в течение 24-часового периода, предшествующего моменту измерения  $foF2$ , и в момент измерения  $foF2$ . Так же, как и в предшествующем исследовании изменчивости  $NmF2$  [Павлов и Павлова, 2019], зависимость  $NmF2$  от солнечной активности приближенно описывается в терминах изменений индексов  $F10.7$  (среднесуточный поток излучения Солнца на длине волны 10.7 см для рассматриваемых суток),  $F10.7p$  (величина  $F10.7$  за предшествующие сутки) и  $\langle F10.7 \rangle$  (арифметически среднее значение индекса  $F10.7$  за 81 день с центром в рассматриваемый день). Если каждый из индексов  $F10.7$ ,  $F10.7p$  и  $\langle F10.7 \rangle$  изменяется в пределах от  $65 \times 10^{-22}$  до  $85 \times 10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup>, то значения  $NmF2$  считаются измеренными при низкой солнечной активности. При изменении каждого из этих индексов солнечной активности от  $85 \times 10^{-22}$  до  $125 \times 10^{-22}$  Вт м<sup>-2</sup> Гц<sup>-1</sup> измеренные величины  $NmF2$  рассматриваются как  $NmF2$  при средней солнечной активности.

Для каждого из рассматриваемых уровней солнечной активности (низкая или средняя солнечная активность) результаты измерений геомагнитно-спокойных  $NmF2$  сортируются в соответствии с номером месяца в году и выбираются только  $NmF2$ , измеренные при  $UT = 0, 1, \dots, 23$  ч. Связь местного солнечного времени  $SLT$  с  $UT$  определяется соотношением  $SLT = UT + \lambda/15$ , где  $\lambda$  – географическая долгота в градусах, а единицы измерения  $SLT$  и  $UT$  – часы.

Для изучения изменчивости геомагнитно-спокойных значений  $NmF2(UT, M)$  используются методы математической статистики, описанные, например, в монографиях [Кремер, 2012; Ross, 2004; Gatti, 2005]. Для этого вычисляются следующие статистические параметры геомагнитно-спокойных значений  $NmF2(UT, M)$ :  $NmF2_E(UT, M)$ ,  $NmF2_{MP}(UT, M)$ ,  $NmF2_{MED}(UT, M)$ ,  $\sigma_E(UT, M)$ ,  $\sigma_{MED}(UT, M)$ ,  $\sigma_{MP}(UT, M)$ ,  $CV_E(UT, M)$ ,  $CV_{MED}(UT, M)$ ,  $CV_{MP}(UT, M)$  и  $F(UT, M)$  отдельно для условий низкой и средней солнечной активности, где  $F(UT, M)$  – число измерений  $NmF2(UT, M)$  при фиксированных  $UT$  и  $M$ . Используемая в работе методика расчета статистических параметров  $NmF2(UT, M)$  описана в работе [Pavlov and Pavlova, 2021].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для приведенных в п. 2 промежутков времени часовые измерения  $foF2$ , используемые в исследовании вариаций геомагнитно-спокойных  $NmF2$ , величина  $F(UT, M) \geq 136$  в условиях низкой солнечной активности и значение  $F(UT, M) \geq 102$  при

средней солнечной активности. Используемые величины  $F(UT, M)$  достаточно велики для выполнения закона больших чисел и корректного вычисления рассматриваемых статистических параметров  $NmF2$  [Gatti, 2005].

Статистическое исследование показало, что при фиксированном времени и месяце года математическое ожидание и арифметически среднее  $NmF2$  отличаются не более чем на 0.2% и 4.3% при низкой и средней солнечной активности соответственно.

### 3.1. Сравнение $NmF2_E(UT, M)$ , $NmF2_{MED}(UT, M)$ и $NmF2_{MP}(UT, M)$

Так же, как и в работах [Pavlov and Pavlova, 2016, 2021; Павлов и Павлова, 2019], будем вычислять выраженное в процентах отличие между двумя статистическими параметрами А и В электронной концентрации максимума слоя  $F2$  ионосферы при заданных значениях мирового времени и месяца года отдельно для низкой и средней солнечной активности:

$$Z(A, B) = 200 \times |A - B| / (A + B). \quad (1)$$

Из проведенных расчетов следует, что при фиксированных значениях  $UT$  и  $M$   $0\% \leq Z(NmF2_E, NmF2_{MED}) \leq 25\%$ ,  $0\% \leq Z(NmF2_E, NmF2_{MP}) \leq 39\%$ ,  $0\% \leq Z(NmF2_{MED}, NmF2_{MP}) \leq 40\%$  в условиях низкой солнечной активности и  $0\% \leq Z(NmF2_E, NmF2_{MED}) \leq 59\%$ ,  $0\% \leq Z(NmF2_E, NmF2_{MP}) \leq 81\%$ ,  $0\% \leq Z(NmF2_{MED}, NmF2_{MP}) \leq 66\%$  — при средней солнечной активности. Таким образом, в соответствии с выводами работ [Павлов и Павлова, 2019; Pavlov and Pavlova, 2021], использовавших результаты измерений  $foF2$  наземными ионозондами над Москвой, Dourbes и Juliusruh при низкой солнечной активности, в условиях средней солнечной активности рассматриваемые количественные статистические характеристики, каждая из которых может обеспечить описание множества наблюдений рассматриваемой случайной величины  $NmF2$ , существенно отличаются друг от друга, и результаты решения рассматриваемой задачи с участием статистической характеристики  $NmF2$  зависят от выбора между  $NmF2_E(UT, M)$ ,  $NmF2_{MED}(UT, M)$  и  $NmF2_{MP}(UT, M)$ .

### 3.2. Сравнение $\sigma_E(UT, M)$ , $\sigma_{MED}(UT, M)$ и $\sigma_{MP}(UT, M)$

При выполнении закона больших чисел математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины  $X$  от любой постоянной величины превосходит или совпадает с математическим ожиданием квадрата отклонения  $X$  от математического ожидания  $X$  [Кремер, 2012; Ross, 2004]. В соответствии с этим общим выводом математи-

ческой статистики вычисленные значения  $\sigma_E$ ,  $\sigma_{MED}$  и  $\sigma_{MP}$  удовлетворяют неравенствам

$$\begin{aligned} \sigma_E(UT, M) &\leq \sigma_{MED}(UT, M), \\ \sigma_E(UT, M) &\leq \sigma_{MP}(UT, M) \end{aligned} \quad (2)$$

как при низкой, так и при средней солнечной активности.

Таким образом, абсолютная величина изменчивости  $NmF2$  минимальна при использовании  $NmF2_E(UT, M)$ . Отметим, что максимальные значения  $Z(\sigma_E, \sigma_{MED})$ ,  $Z(\sigma_E, \sigma_{MP})$  и  $Z(\sigma_{MED}, \sigma_{MP})$  составляют 16, 46 и 40% при низкой солнечной активности соответственно. При средней солнечной активности эти максимальные значения равны 72, 53 и 71% соответственно.

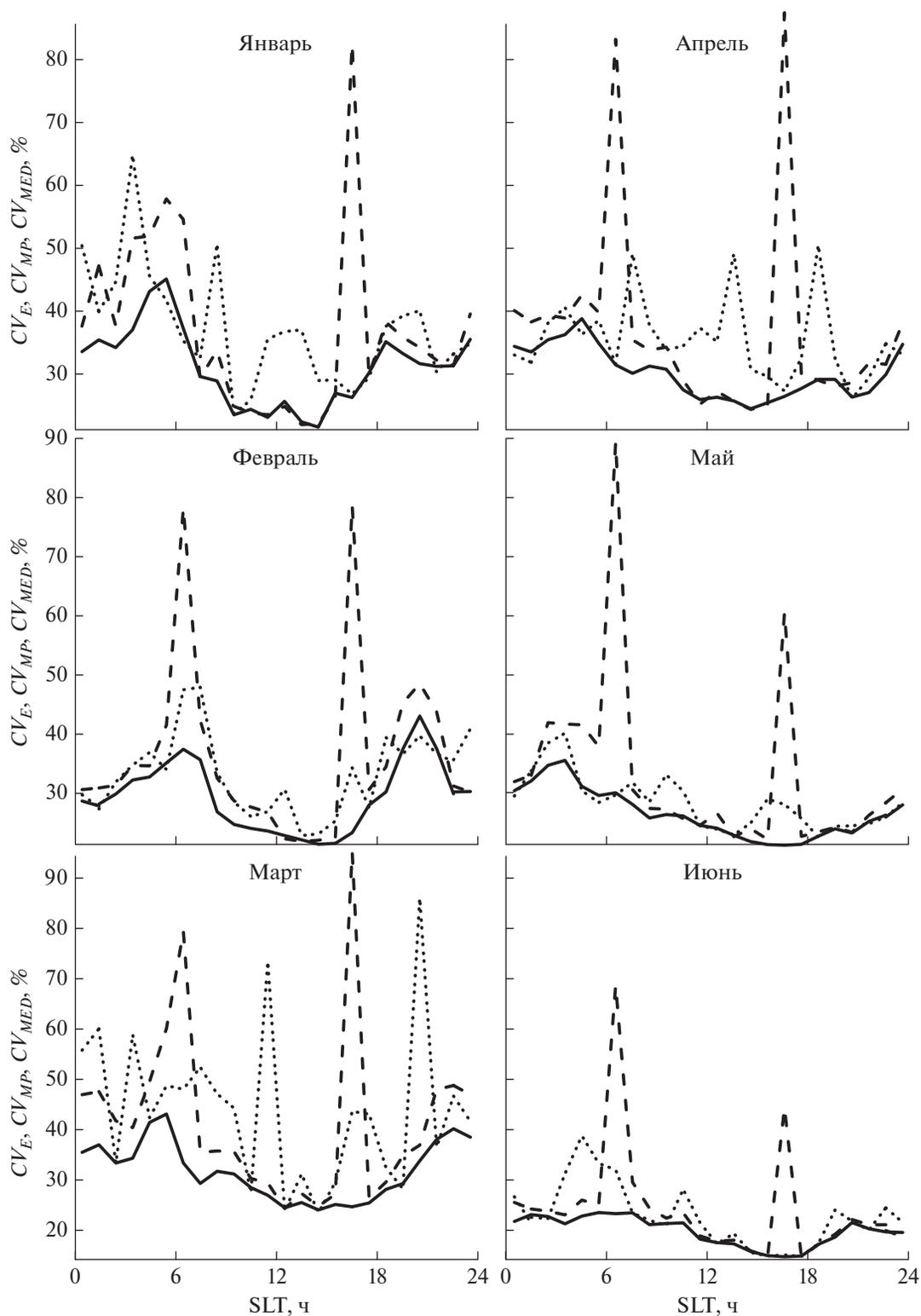
Таким образом, стандартные отклонения  $\sigma_E(UT, M)$ ,  $\sigma_{MED}(UT, M)$  и  $\sigma_{MP}(UT, M)$  существенно отличаются друг от друга как при низкой, так и при средней солнечной активности.

Величины  $\sigma_E(UT, M)$ ,  $\sigma_{MED}(UT, M)$  и  $\sigma_{MP}(UT, M)$  дают абсолютную оценку меры разброса электронной концентрации максимума слоя  $F2$  ионосферы относительно  $NmF2_E(UT, M)$ ,  $NmF2_{MED}(UT, M)$  и  $NmF2_{MP}(UT, M)$  соответственно. Чтобы определить, насколько разброс  $NmF2$  велик или мал относительно самих значений этих статистических параметров независимо от их величины, используются коэффициенты вариаций  $CV_E(UT, M)$ ,  $CV_{MED}(UT, M)$  и  $CV_{MP}(UT, M)$ . Кроме того, статистические параметры  $NmF2_E(UT, M)$ ,  $NmF2_{MED}(UT, M)$  и  $NmF2_{MP}(UT, M)$  зависят не только от  $UT$  и  $M$ , но и от уровня солнечной активности и географической широты и долготы. Поэтому коэффициенты вариаций  $NmF2$ , являющиеся относительными показателями изменчивости  $NmF2$ , также необходимы и для сопоставления степени этой изменчивости при разных значениях  $UT$ ,  $M$ , уровня солнечной активности, географической широты и долготы.

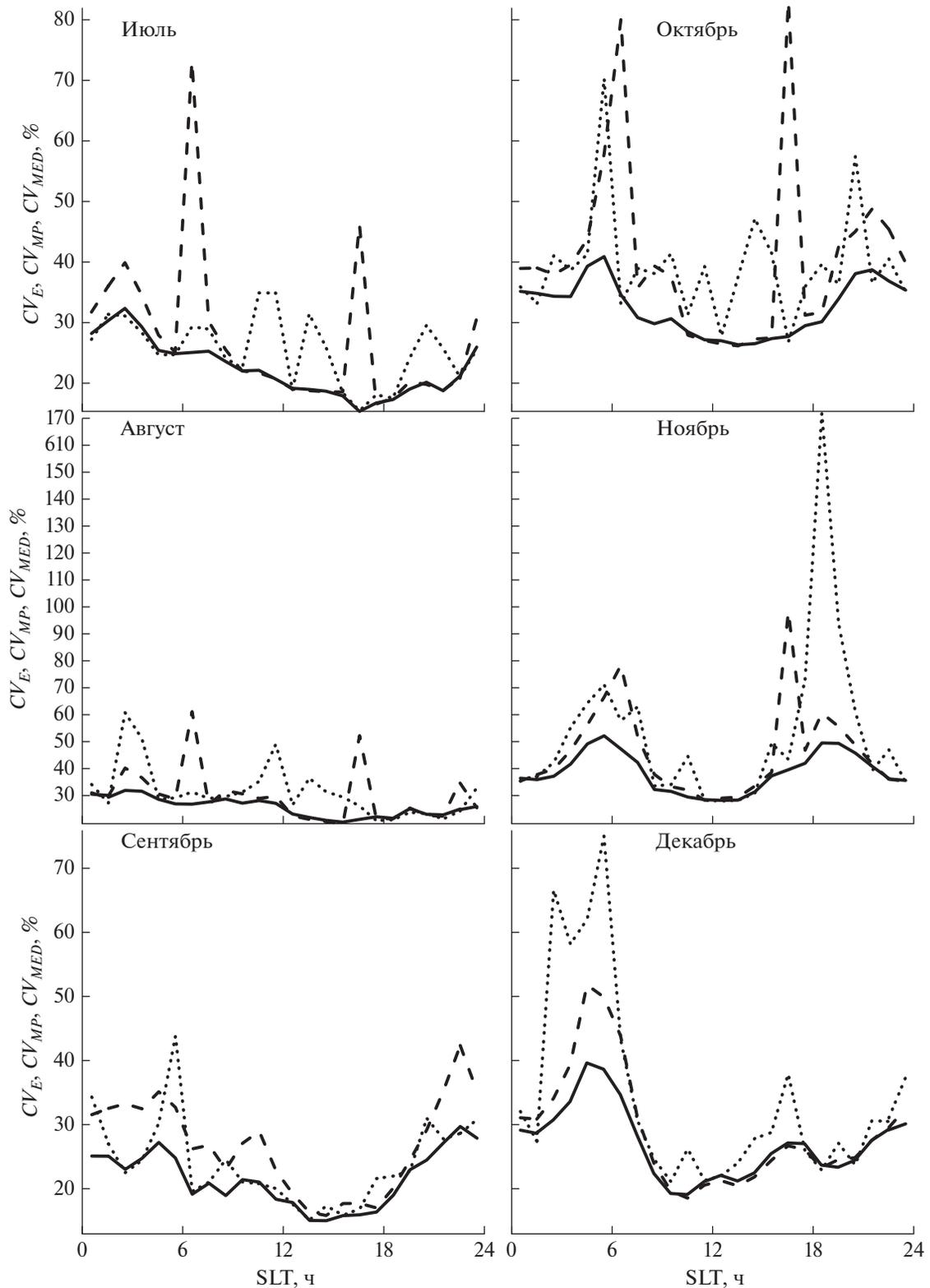
### 3.3. Сравнение $CV_E(UT, M)$ , $CV_{MED}(UT, M)$ и $CV_{MP}(UT, M)$

Результаты расчетов суточных вариаций  $CV_E(UT, M)$ ,  $CV_{MED}(UT, M)$  и  $CV_{MP}(UT, M)$  представлены на рис. 1 и 2 для условий средней солнечной активности. Рассматриваемые статистические характеристики  $NmF2$  изменяются в промежутках  $15\% \leq CV_E \leq 46\%$ ,  $15\% \leq CV_{MED} \leq 95\%$  и  $15\% \leq CV_{MP} \leq 170\%$ , а при фиксированных значениях времени и месяца года  $0\% \leq Z(CV_E, CV_{MED}) \leq 117\%$ ,  $0\% \leq Z(CV_E, CV_{MP}) \leq 118\%$  и  $0\% \leq Z(CV_{MED}, CV_{MP}) \leq 105\%$ .

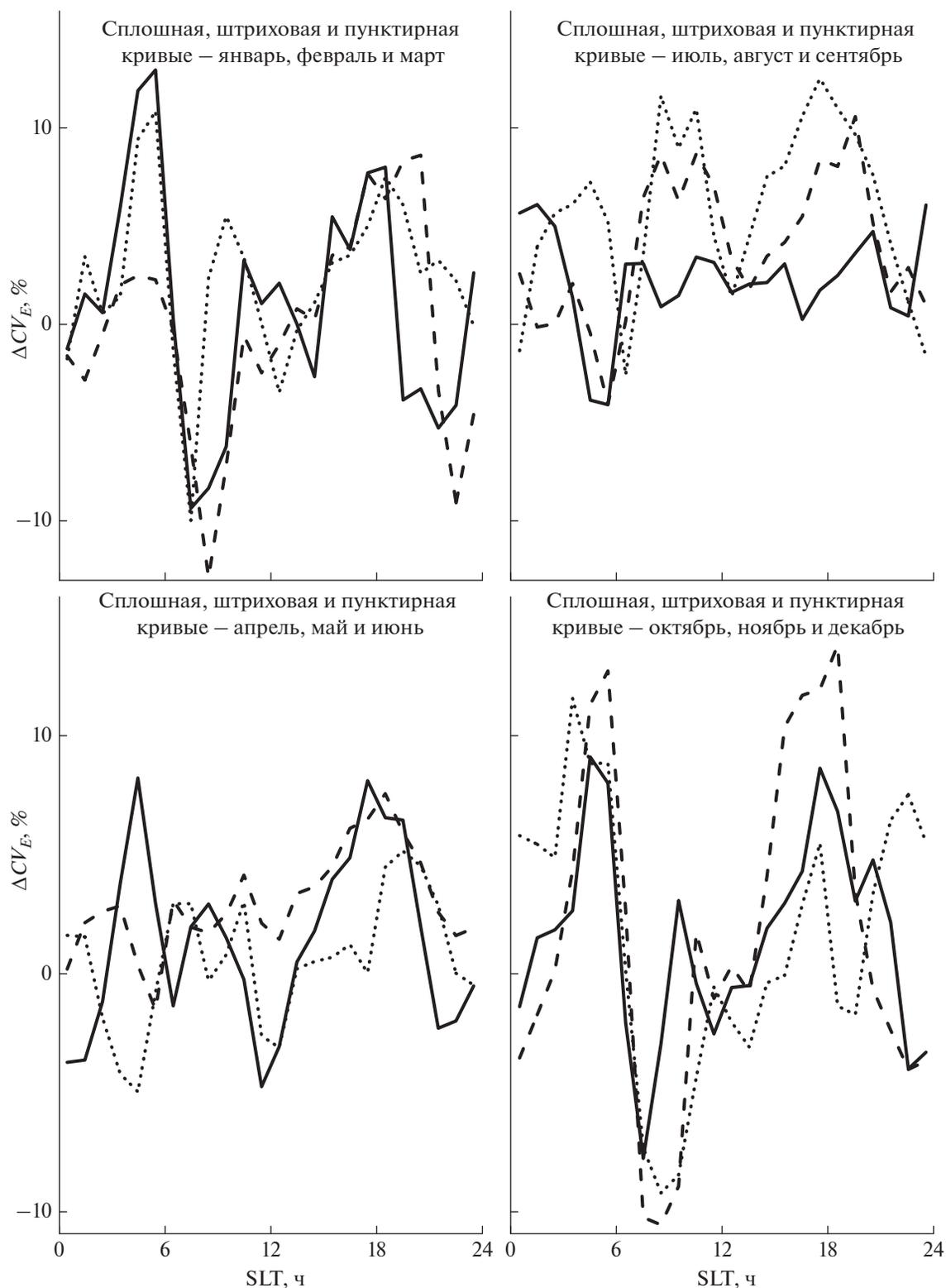
Таким образом, коэффициенты вариаций  $CV_E(UT, M)$ ,  $CV_{MED}(UT, M)$  и  $CV_{MP}(UT, M)$  существенно отличаются друг от друга как при низкой



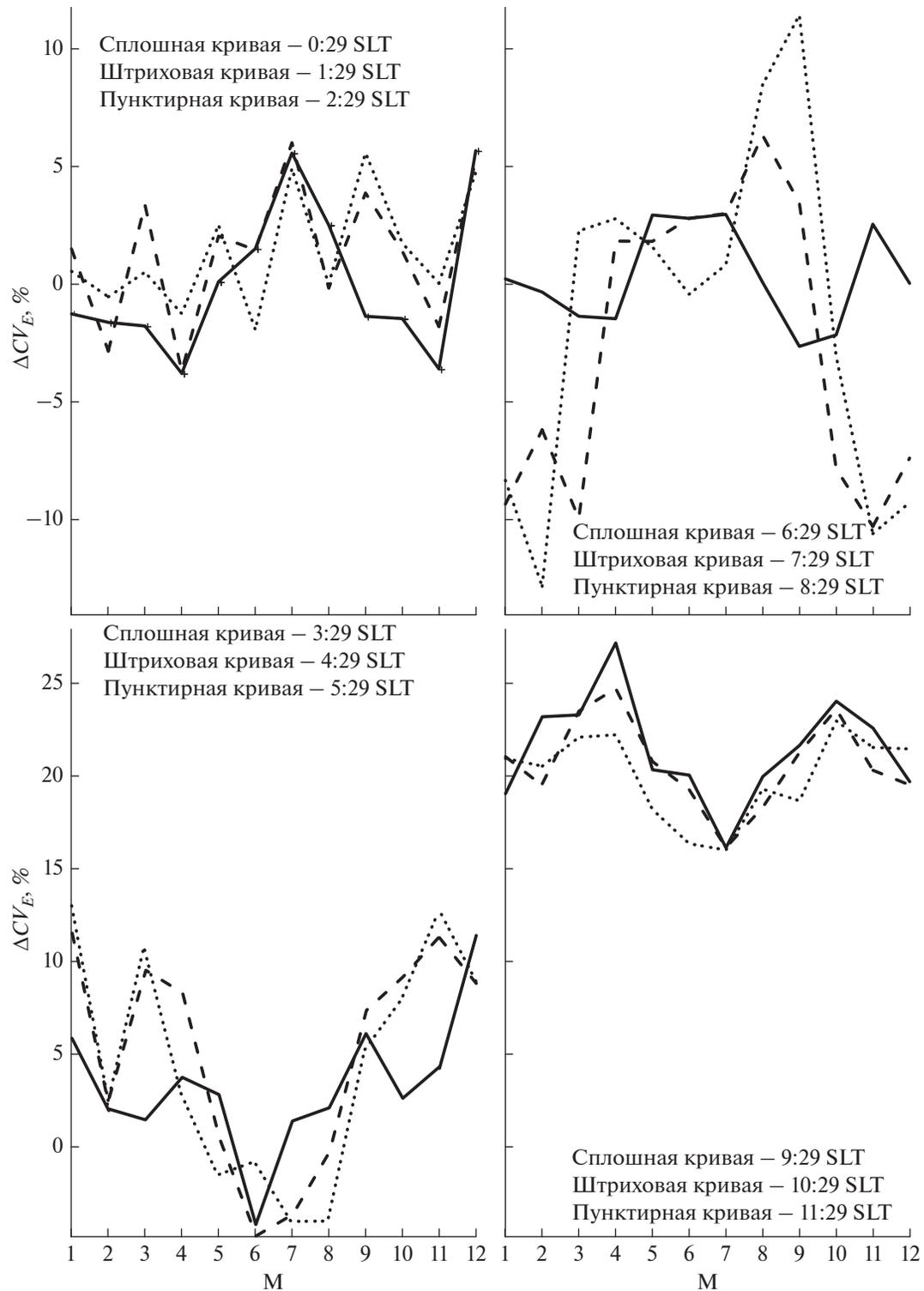
**Рис. 1.** Суточные вариации  $CV_E$  (сплошные кривые),  $CV_M$  (пунктирные кривые) и  $CV_{MED}$  (штриховые кривые) для января (верхняя левая панель), февраля (средняя левая панель), марта (нижняя левая панель), апреля (верхняя правая панель), мая (средняя правая панель) и июня (нижняя правая панель) при средней солнечной активности.



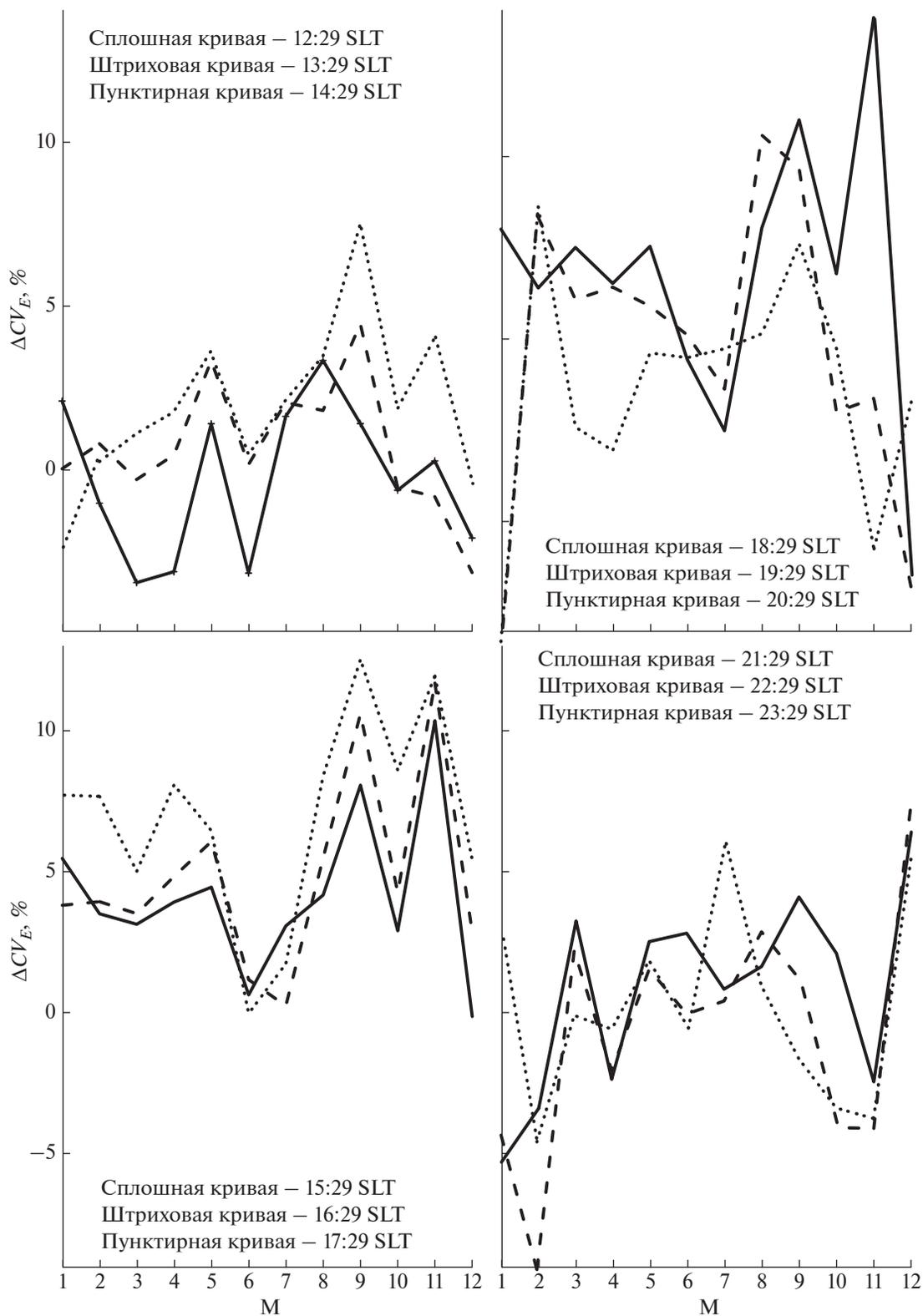
**Рис. 2.** Суточные вариации  $CV_E$  (сплошные кривые),  $CV_{MP}$  (пунктирные кривые) и  $CV_{MED}$  (штриховые кривые) для июля (верхняя левая панель), августа (средняя левая панель), сентября (нижняя левая панель), октября (верхняя правая панель), ноября (средняя правая панель) и декабря (нижняя правая панель) при средней солнечной активности.



**Рис. 3.** Суточные вариации  $\Delta CV_E$  в январе, феврале и марте (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на верхней левой панели), в апреле, мае и июне (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на нижней левой панели), в июле, августе и сентябре (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на верхней правой панели), в октябре, ноябре и декабре (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на нижней правой панели).



**Рис. 4.** Зависимости от месяца года  $\Delta CV_E$  в 0:29, 1:29 и 2:29 SLT (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на верхней левой панели); в 3:29, 4:29 и 5:29 SLT (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на нижней левой панели); в 6:29, 7:29 и 8:29 SLT (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на верхней правой панели); в 9:29, 10:29 и 11:29 SLT (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на нижней правой панели).



**Рис. 5.** Зависимости от месяца года  $\Delta CV_E$  в 12:29, 13:29 и 14:29 SLT (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на верхней левой панели); в 15:29, 16:29 и 17:29 SLT (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на нижней левой панели); в 18:29, 19:29 и 20:29 SLT (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на верхней правой панели); в 21:29, 22:29 и 23:29 SLT (сплошные, штриховые и пунктирные кривые соответственно на нижней правой панели).

(см. работы [Павлов и Павлова, 2019; Pavlov and Pavlova, 2021]), так и при средней солнечной активности. При этом, в преобладающем большинстве случаев значение  $CV_E(UT, M)$  меньше, чем величина  $CV_{MED}(UT, M)$  или  $CV_{MP}(UT, M)$ .

Чем меньше коэффициент вариации случайной величины  $NmF2$  относительно статистического параметра  $Y = NmF2_E, NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$ , тем более точной является оценка  $NmF2$  параметром  $Y$ . Если условия минимизации стандартного отклонения и коэффициента вариации  $NmF2$  принимаются в качестве критерия наилучшего описания множества измерений  $NmF2$  одним единственным статистическим параметром  $NmF2$ , то согласно результатам настоящей работы использование в ионосферных исследованиях математического ожидания  $NmF2$  или арифметически среднего значения  $NmF2$  в наилучшей степени обеспечивает выполнение этого критерия в геомагнито-спокойных условиях при средней солнечной активности. Таким образом, использование  $\sigma_{MED}(UT, M)$  и  $CV_{MED}(UT, M)$  или  $\sigma_{MP}(UT, M)$  и  $CV_{MP}(UT, M)$  вместо  $\sigma_E(UT, M)$  и  $CV_E(UT, M)$  приводит к ошибочным выводам об изменчивости  $NmF2$  при средней солнечной активности. Такое же заключение было сделано в работах [Павлов и Павлова, 2019; Pavlov and Pavlova, 2021], использовавших результаты измерений  $foF2$  наземными ионозондами над Москвой, Dourbes и Juliusruh при низкой солнечной активности.

### 3.4. Сравнение $CV_E(UT, M)$ при низкой и средней солнечной активности

Из проведенных расчетов следует, что при низкой солнечной активности  $12.9\% \leq CV_E(UT, M) \leq 46.4\%$ , в то время как при средней солнечной активности  $15.0\% \leq CV_E(UT, M) \leq 46.3\%$ . Таким образом, переход от низкой к средней солнечной активности не приводит к существенным изменениям как максимальной, так и минимальной изменчивости  $NmF2$ .

Исследуемое влияние солнечной активности на изменчивость  $NmF2$  определяется параметром

$$\Delta CV_E(UT, M) = CV_E^A(UT, M) - CV_E^L(UT, M), \quad (3)$$

где  $CV_E^A(UT, M)$  и  $CV_E^L(UT, M)$  — значения  $CV_E(UT, M)$  при средней и низкой солнечной активности соответственно.

На рисунке 3 представлены результаты расчетов суточных вариаций  $\Delta CV_E$  для каждого месяца года, а на рис. 4 и 5 — вычисленные зависимости от месяца года  $\Delta CV_E$  в рассматриваемые моменты времени. Можно сделать вывод, что рассматриваемое в работе изменение солнечной активности приводит к увеличению или уменьшению изменчивости  $NmF2$  в диапазоне изменения  $\Delta CV_E$  от —

8.2% в апреле в 0:29 SLT до 12.2% в сентябре в 19:29 SLT.

Из рисунков 3–5 видно, что при возрастании солнечной активности наибольшая продолжительность периодов увеличения изменчивости  $NmF2$  (т.е. при  $\Delta CV_E > 0$ ) реализуется в сентябре, а периодов уменьшения изменчивости  $NmF2$  (т.е. при  $\Delta CV_E < 0$ ) — в феврале. Продолжительность периодов уменьшения изменчивости  $NmF2$  при возрастании солнечной активности наибольшая в зимних условиях (декабрь, январь и февраль) и наименьшая в летних условиях (июнь, июль и август) в сравнении с каждым из других сезонов года.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено исследование суточных вариаций статистических характеристик  $NmF2$  для каждого месяца года в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности над Москвой по данным часовых ( $UT = 0, 1, \dots, 23$  ч) измерений  $foF2$  наземным ионозондом с 1957 по 2017 г. Выполнены расчеты следующих статистических параметров  $NmF2$ : математическое ожидание  $NmF2_E$ , арифметически среднее  $NmF2_A$ , наиболее вероятное  $NmF2_{MP}$ , арифметически средняя месячная медиана  $NmF2_{MED}$ , стандартные отклонения  $\sigma_E(UT, M)$ ,  $\sigma_{MP}(UT, M)$  и  $\sigma_{MED}(UT, M)$  величины  $NmF2$  от  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$  и коэффициенты вариаций  $CV_E(UT, M)$ ,  $CV_{MP}(UT, M)$  и  $CV_{MED}(UT, M)$  значения  $NmF2$  относительно  $NmF2_E$ ,  $NmF2_{MP}$  и  $NmF2_{MED}$  соответственно.

Найдено, что арифметически среднее  $NmF2$  отличается от математического ожидания не более, чем на 0.2% и 4.3% при низкой и средней солнечной активности соответственно.

Как при низкой, так и при средней солнечной активности величины  $NmF2_E(UT, M)$ ,  $NmF2_{MED}(UT, M)$  и  $NmF2_{MP}(UT, M)$ , каждая из которых может обеспечить описание множества наблюдений рассматриваемой случайной величины  $NmF2$ , существенно отличаются друг от друга, и результаты решения задачи с участием статистической характеристики  $NmF2$  зависят от выбора между  $NmF2_E(UT, M)$ ,  $NmF2_{MED}(UT, M)$  и  $NmF2_{MP}(UT, M)$ .

Проведенное исследование показало, что в преобладающем большинстве случаев коэффициент вариации  $NmF2$  относительно математического ожидания  $NmF2$  меньше коэффициентов вариации  $NmF2$  относительно арифметически средней месячной медианы  $NmF2$  или наиболее вероятного значения  $NmF2$ . Если величина  $CV_E(UT, M)$  больше, чем значение  $CV_{MED}(UT, M)$  или  $CV_{MP}(UT, M)$ , то отличие между коэффициентами  $CV_E(UT, M)$  и  $CV_{MED}(UT, M)$  или между зна-

чениями  $CV_E(UT, M)$  и  $CV_{MP}(UT, M)$  не значительно в сравнении с их величинами.

Кроме того, величина  $\sigma_E(UT, M)$  меньше, чем  $\sigma_{MP}(UT, M)$  или  $\sigma_{MED}(UT, M)$  при низкой и средней солнечной активности. Таким образом, в геомагнито-спокойных условиях при низкой и средней солнечной активности следует использовать математическое ожидание  $NmF2$  или арифметически среднее значение  $NmF2$  в качестве количественной характеристики, обеспечивающей наилучшее описание множества измерений  $NmF2$  одним статистическим параметром  $NmF2$ . Проведенные ранее исследования [Павлов и Павлова, 2019; Pavlov and Pavlova, 2021] и результаты настоящей работы показывают, что использование  $\sigma_{MED}(UT, M)$  и  $CV_{MED}(UT, M)$  или  $\sigma_{MP}(UT, M)$  и  $CV_{MP}(UT, M)$  вместо  $\sigma_E(UT, M)$  и  $CV_E(UT, M)$  приводит к ошибочным выводам об изменчивости  $NmF2$  при низкой и средней солнечной активности.

Расчеты показали, что при низкой солнечной активности  $12.9\% \leq CV_E(UT, M) \leq 46.4\%$ , в то время как при средней солнечной активности  $15.0\% \leq CV_E(UT, M) \leq 46.3\%$ . Таким образом, переход от низкой к средней солнечной активности не приводит к существенным изменениям как максимальной, так и минимальной изменчивости  $NmF2$ .

Выполнены расчеты изменения величины коэффициента  $CV_E(UT, M)$  при переходе от низкой к средней солнечной активности, определяющего влияние солнечной активности на изменчивость  $NmF2$ . Показано, что рассматриваемая вариация солнечной активности приводит к увеличению или уменьшению изменчивости  $NmF2$  в диапазоне изменения коэффициента  $CV_E(UT, M)$  от  $-8.2\%$  в апреле в 0:29 SLT до  $12.2\%$  в сентябре в 19:29 SLT. Найдено, что при возрастании солнечной активности наибольшая продолжительность периодов увеличения и уменьшения изменчивости  $NmF2$  реализуется в сентябре и в феврале соответственно. Продолжительность периодов уменьшения изменчивости  $NmF2$  при возрастании солнечной активности наибольшая в зимних условиях (декабрь, январь и февраль) и наименьшая — в летних условиях (июнь, июль и август) в сравнении с каждым из других сезонов года.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 551 с. 2012.
- Павлов А.В., Павлова Н.М. Вариации статистических параметров зимней аномалии  $NmF2$  с широтой и солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 52. № 3. С. 335–343. 2012.
- Павлов А.В., Павлова Н.М. Зависимости от месяца года статистических характеристик  $NmF2$  средних широт в геомагнито-спокойных условиях вблизи полдня при низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 55. № 4. С. 504–510. 2015.
- Павлов А.В., Павлова Н.М. Суточные вариации статистических характеристик изменчивости  $NmF2$ , измеренной ионозондом над Москвой в геомагнито-спокойных условиях при низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 5. С. 635–648. 2019.  
<https://doi.org/10.1134/S0016794019040138>
- Пузгом В.П., Павер К. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. М.: Наука, 342 с. 1978.
- Fang T.-W., Fuller-Rowell T., Yudin V., Matsuo T., Viereck R. Quantifying the sources of ionospheric day-to-day variability // J. Geophys. Res. V. 123. № 11. P. 9682–9696. 2018.  
<https://doi.org/10.1029/2018JA025525>
- Forbes J.M., Palo S.E., Zhang X. Variability of the ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 62. № 8. P. 685–693. 2000.  
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00029-8)
- Gatti P.L. Probability theory and mathematical statistics for engineers. London, N.Y.: Spon Press of Taylor&Francis Group, 356 p. 2005.  
<https://doi.org/10.1201/9781482267761>
- Pavlov A.V. The low and middle latitude semi-annual anomaly in  $NmF2$  near noon: a statistical study // Adv. Space Res. V. 49. № 5. P. 922–936. 2012.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.12.024>
- Pavlov A.V., Pavlova N.M., Makarenko S.F. A statistical study of the mid-latitude  $NmF2$  winter anomaly // Adv. Space Res. V. 45. № 3. P. 374–385. 2010.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.09.003>
- Pavlov A.V., Pavlova N.M. Variations in statistical parameters of the  $NmF2$  equinoctial asymmetry with latitude and solar activity near noon // Adv. Space Res. V. 51. № 11. P. 2018–2034. 2013.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.01.007>
- Pavlov A.V., Pavlova N.M. Influence of the equinoctial asymmetry on the semi-annual anomaly in  $NmF2$  near noon in the northern geographic hemisphere: a statistical study // Adv. Space Res. V. 53. № 4. P. 619–634. 2014.  
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.014>
- Pavlov A.V., Pavlova N.M. Long-term monthly statistics of mid-latitude  $NmF2$  in the northern geographic hemisphere during geomagnetically quiet and steadily low solar activity conditions // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 142. № 5. P. 83–97. 2016.  
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.03.001>
- Pavlov A.V., Pavlova N.M. Statistical characteristics of the mid-latitude  $NmF2$  day-to-day Variability during geomagnetically quiet conditions at low solar activity obtained from the Dourbes and Juliusruh ionosonde observations // Pure Appl. Geophys. V. 178. № 10. P. 3887–3907. 2021.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-021-02859-z>
- Ross S.M. Introduction to probability and statistics for engineers and scientists. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 624 p. 2004.
- Rishbeth H., Mendillo M. Patterns of  $F2$ -layer variability // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 15. P. 1661–1680. 2001.  
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(01\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(01)00036-0)