



УДК 550.388.2

ОПЫТ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ ПО ИОНОСФЕРНЫМ ДАННЫМ

А. Д. Данилов¹, А. В. Константинова¹, В. В. Михайлов¹¹Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия

Приводится описание первой попытки разработки метода прогнозирования наступления магнитной бури на основании анализа отклонения критической частоты слоя F2 $foF2$ от ее значений в спокойных условиях. Метод основан на анализе этого отклонения по данным ст. Juliusruh и Slough, выполненного авторами для нескольких сотен бурь и опубликованного в 15 статьях в отечественных и зарубежных журналах. В методе используются четыре характеристики отклонений $foF2$ от спокойных величин в течение трех дней. По каждой из характеристик дается самостоятельный прогноз, а итоговый прогноз делается на основе этих четырех прогнозов. Приводятся результаты пробного прогнозирования для 15 периодов и подробно рассматриваются их результаты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: магнитная буря, прогноз, критическая частота слоя F2

EDN: OXIVYO

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема изменения в параметрах ионосферы в период, предшествующий магнитной буре, представляет интерес как в плане изучения физики процессов в приземном пространстве при изменениях космической погоды, так и в прикладном плане, если эти изменения могут являться предвестниками предстоящей бури.

Важным моментом исследований предбуревых эффектов является то, что в дни, предшествующие магнитной буре, наблюдаются изменения в различных параметрах области F: критической частоте слоя F2 $foF2$, его высоте $hmF2$, полном содержании электронов TЕС и ряде других параметров (см. обзорные работы [Danilov and Konstantinova, 2024; Данилов и Константинова, 2023, 2024]).

При этом такие изменения обнаруживают в данных, полученных принципиально разными методами: вертикальное зондирования ионосферы, прямые спутниковые измерения электронной концентрации в области F и измерения TЕС на станциях системы GPS.

Результаты анализа поведения отклонений критической частоты слоя F2 $foF2$ от спокойных величин ($\delta foF2$) в течение трех предбуревых дней, подробно описанные в наших публикациях [Данилов и Константинова 2019, 2020 а,б,в, 2021а,б,в, 2022а,б,в,г,д; Константинова и Данилов 2019; 2021; Danilov and Konstantinova, 2021], использованы для разработки метода прогнозирования вероятности появления магнитных бурь на основании поведения критической частоты $foF2$ в предбуревые дни.

Электронная почта авторов для переписки:

Данилов Алексей Дмитриевич, e-mail: adanilov99@mail.ru
Константинова Анна Владимировна, e-mail: anna@tabulata.ru<https://elibrary.ru/oxivyo>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

Ниже приводится описание разработки метода и результатов пробного прогнозирования с его помощью.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Напомним, что в результате указанного анализа были обнаружены зависимости величин $\delta foF2$ от нескольких параметров: солнечной активности, интенсивности бури, сезона, местного времени начала бури и времени до момента начала бури (SC). Кроме того, были проанализированы зависимости этих величин от номера предбуревых дней и зависимости амплитуды и знака величин $\delta foF2$ от внешних параметров.

По понятным соображениям невозможно использовать при разработке метода прогноза полученные зависимости $\delta foF2$ от местного времени начала бури и времени до момента начала бури (SC). Оказалось, что невозможно (из-за ограниченности данных) провести работу по созданию прогноза отдельно для разных сезонов. Поэтому предлагаемый метод базируется на анализе данных для всех сезонов.

В наших публикациях по зависимости предбуревых отклонений $foF2$ от спокойных величин (см. ссылки, приведенные во Введении) мы подробно проанализировали результаты наблюдений на двух ионосферных станциях – Juliusruh и Slough. Мы подробно описываем в этом параграфе методы прогноза по четырем параметрам для ст. Juliusruh, поскольку для данных этой станции было выполнено пробное прогнозирования, описанное в следующем параграфе. В конце данного параграфа мы даем лишь краткое описание метода прогноза для ст. Slough, поскольку метод идентичен методу для ст. Juliusruh и отличается только параметрами основных формул.

В предлагаемом методе учитываются две главные зависимости $\delta foF2$ (от солнечной активности и интенсивности предстоящей бури) и отдельно рассматриваются все отклонения $\delta foF2$ за день (N), только положительные отклонения (N(+)), отношения числа отклонений с амплитудой больше 30% к общему числу отклонений (N(>30)/N) и отношения числа отрицательных отклонений к общему числу отклонений (N(-)/N).

Из-за ограниченности данных учет зависимости всех указанных параметров от солнечной активности сделан следующим образом. Все зависимости этих параметров от интенсивности бури (индекс Dst) построены по данным для интервала солнечной активности $F10.7=80-120$. Мы принимаем, что эти зависимости относятся к среднему значению $F10.7 = 100$. Для учета эффекта солнечной активности величины N, N(+), N(>30)/N и N(-)/N, полученные при конкретном значении $F10$, приводились к значениям N^* , $N(+)^*$, $N(>30)/N^*$ и $N(-)/N^*$ для $F10.7 = 100$ с помощью найденных зависимостей этих параметров от $F10.7$ (соответствующие рисунки см. ниже). Именно величины N^* , $N(+)^*$, $N(>30)/N^*$ и $N(-)/N^*$ и использовались для решения вопроса о том, ожидается буря, или нет, с помощью зависимостей этих параметров от Dst (см. ниже).

Поскольку в наших исследованиях все зависимости количества отклонений $\delta foF2$ от внешних параметров анализировались для трех предбуревых дней, описываемый метод основывается на анализе с помощью предлагаемого метода соответствующих величин для трех последовательных дней.

Для параметров N и N(+) берется сумма за три дня (анализируемый день и два предыдущих). Для параметров N(>30)/N и N(-)/N берется среднее значение за те же три дня. Если первый день анализируемого интервала приходится сразу после возмущенных условий, то для него расчетов не делается, но значения параметров в этот день используются для расчетов в следующие два дня. Но если в этот день величины N или N(+) оказываются выше граничной величины для предсказания бури (5 и 4.5, соответственно, см. ниже), то предсказывается буря.

Методы прогноза по каждому из четырех параметров несколько различаются, поэтому мы опишем их отдельно.

2.1 Прогноз по величине N

На основании детального анализа зависимостей $\delta foF2$ от интенсивности предстоящей бури, подробно описанного в наших публикациях, была построена зависимость величины N от индекса $F10.7$, приведенная на рис. 1.

Полученная линейная зависимость имеет вид:

$$N = -0.0061 \cdot F10.7 + 4.4638 \quad (1)$$

Эта зависимость используется для определения коэффициента $k(N)$ для пересчета полученных величин N в приведенные величины N^* для $F10.7 = 100$. Легко видеть, что на рисунке 1 $N(100) = 3.85$ и:

$$k = N/N^* - 1.1594 - 0.00158 \cdot F10.7 \quad (2)$$

$$N^* = N/(1.1594 - 0.00158 \cdot F10.7) \quad (3)$$

Зависимость (3) и используется для определения величины N^* , которая используется затем для определения того, ожидается буря, или нет с помощью зависимости N^* от интенсивности магнитной бури (индекс Dst). Последняя построена на основании анализа зависимости N от интенсивности магнитной бури и представлена на рисунке 2.

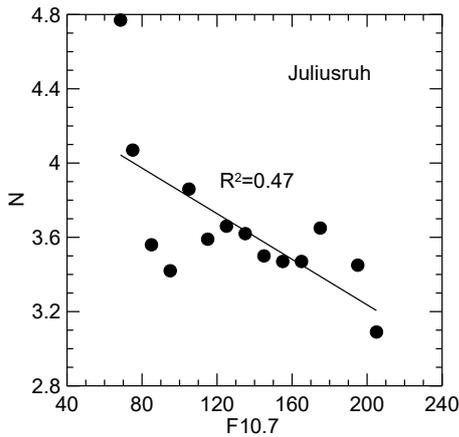


Рис. 1. Зависимость N от индекса солнечной активности $F10.7$.

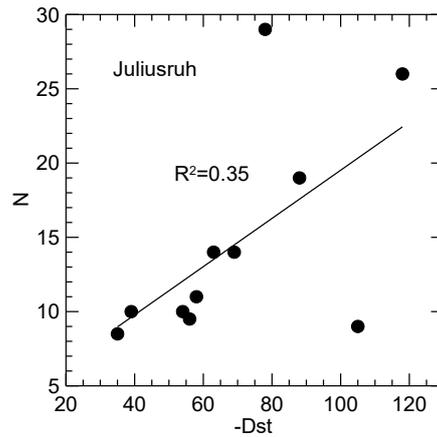


Рис. 2. Зависимость N^* от интенсивности бури (индекс Dst)

Линейная зависимость N^* от Dst дает:

$$N^* = 0.162 \cdot (-Dst) + 3.29 \quad (4)$$

и

$$-Dst = (N^* - 3.29)/0.162 \quad (5)$$

Рисунок 2 и формула (5) использовались для того, чтобы определить при каких величинах N^* должно прогнозироваться наступление, или отсутствие бури. Мы приняли на основании этих данных в качестве граничной величины $N^* = 5$. При $N^* > 5$ прогнозируется буря, при $N^* < 5$ – спокойные условия. Именно это граничное значение использовалось в следующем разделе при пробном прогнозировании в различные периоды.

2.2 Прогноз по величине $N(+)$.

На основании детального анализа зависимостей $\delta foF2$ от интенсивности предстоящей бури, подробно описанного в наших предыдущих публикациях, была построена зависимость величины $N(+)$ от индекса $F10.7$, приведенная на рисунке 3.

Полученная линейная зависимость имеет вид:

$$N(+) = -0.0367 \cdot F10.7 + 6,5793 \quad (6)$$

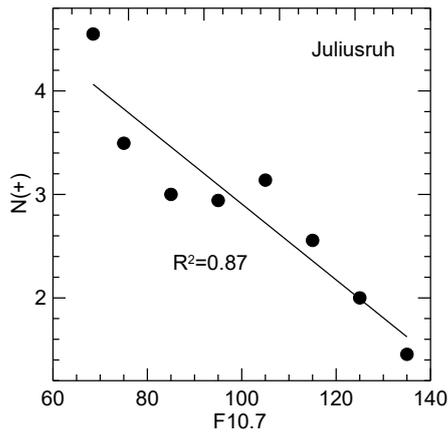


Рис. 3. Зависимость $N(+)$ от индекса солнечной активности $F10.7$

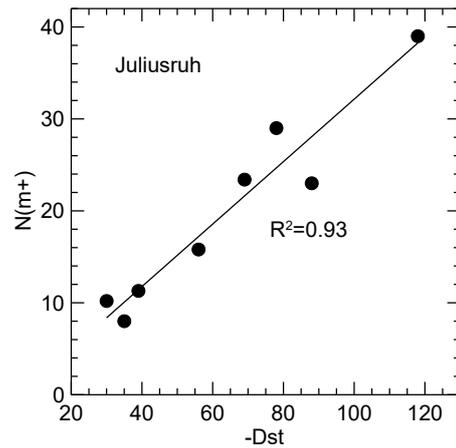


Рис. 4. Зависимость величины $N(+)^*$ индекса Dst

Эта зависимость используется для определения коэффициента $k(N(+))$ для пересчета полученных величин $N(+)$ в приведенные величины $N(+)^*$ для $F10.7 = 100$. Легко видеть, что $N(+)^* = 2.91$ и:

$$k = N(+)/N(+)^* = -(0.0367 \cdot F10.7 + 6.5793)/2.91 = -0.0126 \cdot F10.7 + 2.2609 \quad (7)$$

$$N(+)^* = N(+)/k = N(+)/(-0.0126 \cdot F10.7 + 2.2609) \quad (8)$$

С помощью формулы (8) находится величина $N(+)^*$, которая используется затем для определения того, ожидается буря, или нет с помощью зависимости $N(+)^*$ от интенсивности магнитной бури (индекс Dst). Последняя построена на основании анализа зависимостей $N(+)$ от интенсивности магнитной бури, описанных в предыдущем разделе отчета, и представлена на рис. 4.

Полученная линейная зависимость дает:

$$N(+)^* = 0.34 \cdot (-Dst) - 1.82 \quad (9)$$

$$-Dst = (N(+)^*) + 1.82/0.34 \quad (10)$$

Рисунок 4 и формула (10) использовались для того, чтобы определить при каких величинах $N(+)^*$ должно прогнозироваться наступление, или отсутствие бури. Мы приняли на основании этого рисунка в качестве граничной величины $N(+)^* = 4.5$. При $N(+)^* > 4.5$ прогнозируется буря, при $N(+)^* < 4.5$ – спокойные условия. Именно это граничное значение использовалось при пробном прогнозировании в различные периоды, описанном в следующем разделе.

2.3 Прогноз по величине отношения $N(-)/N$

Для удобства записи формул мы будем обозначать $N(-)/N$ как J .

На основании детального анализа зависимостей $\delta foF2$ от интенсивности предстоящей бури, подробно описанного в наших предыдущих публикациях, была построена зависимость величины J от индекса $F10.7$, приведенная на рисунке 5.

Полученная линейная зависимость имеет вид:

$$J = 0.0027 \cdot F10.7 - 0.0128 \quad (\text{для } F10.7 < 140) \quad (11)$$

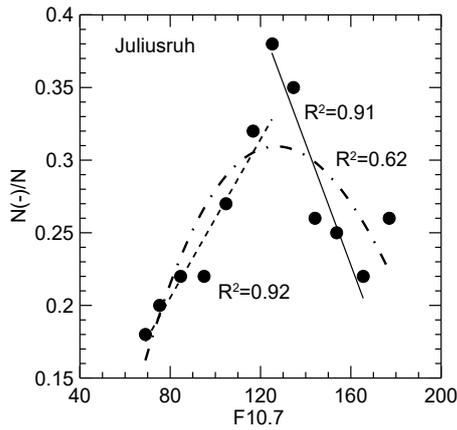


Рис. 5. Зависимость J от индекса солнечной активности $F10.7$

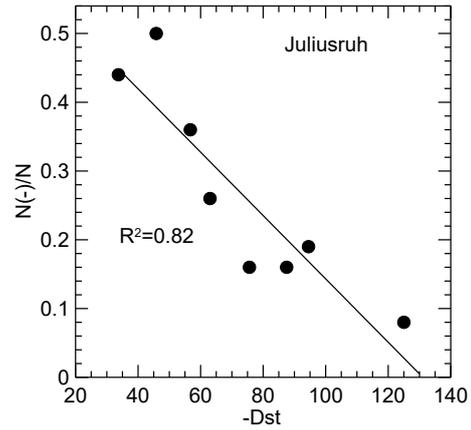


Рис. 6. Зависимость величины J^* от индекса Dst

Эта зависимость используется для определения коэффициента $k(J)$ для пересчета полученных величин J в приведенные величины J^* для $F10.7 = 100$. Легко видеть, что согласно формуле (11) величина J для $F10.7 = 100$ равна 0.26 и:

$$k(J) = J/J^* = (0.0027 \cdot F10.7 - 0.0128)/0.26 = 0.01 \cdot F10.7 - 0.049 \tag{12}$$

$$J^* = J/k(J) = J/(0.01 \cdot F10.7 - 0.049) \tag{13}$$

Эти формулы верны при $F10.7 < 140$. При $F10.7 > 140$ нужно использовать зависимость J от $F10.7$ в виде полинома третьей степени:

$$J^* = -0.492 + 0.014 \cdot F10.7 - 7.17 \cdot 10^{-5}(F10.7)^2 + 8.66 \cdot 10^{-8}(F10.7)^3 \tag{14}$$

С помощью формулы (13) или (14) находится величина J^* , которая используется затем для определения того, ожидается буря, или нет с помощью зависимости J^* от интенсивности магнитной бури (индекс Dst). Последняя построена на основании анализа зависимостей J от интенсивности магнитной бури, описанных в наших предыдущих публикациях, представлена на рисунке 6.

Линейная зависимость на рис. 6 дает:

$$J^* = 0.6037 - 0.0046 \cdot (-Dst) \tag{15}$$

Тогда:

$$-Dst = (0.6037 - J^*)/0.0046 \tag{16}$$

Рисунок 6 и формула (16) использовались для того, чтобы определить при каких величинах J^* должно прогнозироваться наступление, или отсутствие бури. Мы приняли на основании этих данных в качестве граничной величину $J^* = 0.8$. При $J^* < 0.8$ прогнозируется буря, при $J^* > 0.8$ – спокойные условия. Именно это граничное значение использовалось при пробном прогнозировании в различные периоды, описанном в следующем разделе.

2.4 Прогноз по величине отношения $N(>30)/N$

Для улучшения вида формул в этом подразделе мы обозначаем $N(>30)/N$ как R .

На основании детального анализа зависимостей $\delta foF2$ от интенсивности предстоящей бури, подробно описанного в наших предыдущих публикациях, была построена зависимость величины R от индекса $F10.7$, приведенная на рисунке 7.

Полученная линейная зависимость имеет вид:

$$R = 0.4058 - 0.00142 \cdot F10.7 \quad (17)$$

Эта зависимость используется для определения коэффициента $k(R)$ для пересчета полученных величин R в приведенные величины R^* для $F10.7 = 100$. Легко видеть, что $R(100) = 0.26$ и:

$$k = \frac{R}{R(100)} = \frac{(0.4058 - 0.00142 \cdot F10.7)}{0.26} = 1.56 - 0.0055 \cdot F10.7 \quad (18)$$

$$R^* = R / (1.56 - 0.0055 \cdot F10.7) \quad (19)$$

С помощью формулы (19) находится величина R^* , которая используется затем для определения того, ожидается буря, или нет с помощью зависимости R^* от интенсивности магнитной бури (индекс Dst). Последняя построена на основании анализа зависимостей R от интенсивности магнитной бури, описанных в предыдущих разделах отчета, и представлена на рис. 8.

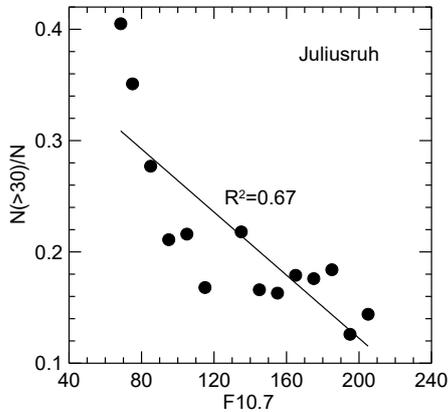


Рис. 7. Зависимость R от индекса солнечной активности $F10.7$

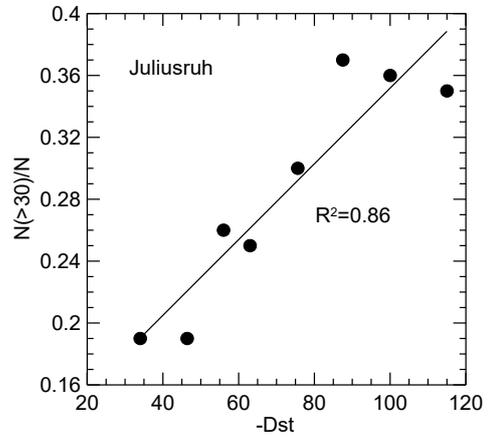


Рис. 8. Зависимость величины R от индекса Dst

Рисунок 8 и формула (19) использовались для того, чтобы определить при каких величинах R^* должно прогнозироваться наступление, или отсутствие бури. Мы приняли на основании этих данных в качестве граничной величины $R^* = 0.16$. При $R^* > 0.16$ прогнозируется буря, при $R^* < 0.16$ – спокойные условия. Именно это граничное значение использовалось при пробном прогнозировании в различные периоды, описанном в следующем разделе.

2.5. Краткое описание метода для ст. Slough

Разработанный метод прогнозирования для ст. Slough аналогичен методу для ст. Juliusruh, подробно описанному выше. Различие только в величинах конкретных параметров, поэтому мы ограничимся просто приведением соответствующих формул.

Для приведения величины N к величине N^* для $F10.7=100$ используется формула:

$$N^* = N / (-0.00375 \cdot F10.7 + 1.3842) \quad (20)$$

Так же, как и в методе для ст. Juliusruh, полученная величина N^* используется для прогноза того, будет буря или нет, и оценки возможной интенсивности бури с помощью формулы:

$$-Dst = (2.719 + N^*) / 0.127 \quad (21)$$

При прогнозировании по параметру $N(+)$ для приведения наблюдаемого при конкретной величине $F10.7$ значения $N(+)$ к значению $N(+)^*$ для $F10.7=100$ используется формула:

$$N(+)^* = N(+)/(-0.0043 \cdot F10.7 + 1.429) \quad (22)$$

Так же, как и в методе для ст. Juliusruh, полученная величина N^* используется для прогноза того, будет буря или нет, и оценки возможной интенсивности бури с помощью формулы:

$$-Dst = N(+)^* - 2.316/0.027 \quad (23)$$

При прогнозировании по параметру $N(-)/N = J$ для приведения наблюдаемого при конкретной величине $F10.7$ значения J к значению J^* для $F10.7=100$ используются формулы:

$$J^* = 0.0041 \cdot F10.7 - 0.12 \quad (24)$$

если $F10.7 < 160$, и:

$$J^* = 0.8453 - 0.0242 \cdot F10.7 + 0.000274 \cdot F10.7^2 - 8.7908 \cdot F10.7^3 \quad (25)$$

если $F10.7 > 160$. Так же, как и в методе для ст. Juliusruh, полученная величина J^* используется для прогноза того, будет буря или нет с помощью формулы:

$$-Dst = (1.08 - J^*)/0.0076 \quad (26)$$

При прогнозировании по параметру $N(>30)/N = R$ для приведения наблюдаемого при конкретной величине $F10.7$ значения R к значению R^* для $F10.7=100$ используется формула:

$$R^* = R/(-0.0116 \cdot F10.7 + 2.1554) \quad (27)$$

Так же, как и в методе для ст. Juliusruh, полученная величина R^* используется для прогноза того, будет буря или нет с помощью формулы:

$$-Dst = (R^* - 0.0101)/0.0047 \quad (28)$$

Так же, как и при прогнозировании по четырем параметрам по данным ст. Juliusruh, при прогнозировании по данным ст. Slough окончательный прогноз должен даваться по совокупности четырех прогнозов, как это подробно описывается в следующем разделе.

3. ПРОБНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

3.1. Общие замечания

С помощью метода прогноза, описанного в предыдущем параграфе, мы провели пробное прогнозирование для нескольких выбранных периодов. Поскольку указанный метод основывается на величинах $foF2$, измеренных во время магнитных бурь до 2010 г., мы выбрали интервалы для анализа в более поздний период 2010-2020 гг. (для еще более поздних лет в международном банке данных нет величин $foF2$).

Следует иметь в виду, что разработанный метод может применяться только к дням, спокойным в магнитном плане. Поэтому мы выбрали для пробного прогнозирования месяцы, в которых были как спокойные дни, так и магнитные бури. При этом соотношение спокойных и буревых дней в различные месяцы было различным.

Все прогнозирование, описанное в данном параграфе, выполнялось «вручную». Для реального прогнозирования в оперативной службе должна будет быть разработана специальная компьютерная программа. Эта программа должна в реальном времени получать текущие величины $foF2$ (наб) и вести вычисление спокойных величин $foF2$ (мод) по модели, разработанной для программы SIMP [Лещинская и Михайлов, 2016]. По ней для каждого часа вычисляется $foF2$ (мод) и сравнивается с наблюдаемой величиной $foF2$ (наб). Вычисляется отношение $foF2$ (наб)/ $foF2$ (мод) для всех часов

анализируемого дня и считается число часов, когда оно больше 1.2 (это будет N(+)) и меньше 0.8 (это будет N(-)). Сумма даст N. Кроме того, считается число часов, когда $foF2(\text{наб})/foF2(\text{мод})$ больше 1.3. Это будет N(>30). Вычисляется также отношение N(-)/N.

Как уже указывалось выше, основная задача описываемого метода дать прогноз предстоящей бури по системе «да-нет». Поэтому при описании результатов пробного прогнозирования ниже мы для каждого дня и каждого метода использовали следующие обозначения. Б – правильный прогноз предстоящей бури. Л – ложная тревога (буря прогнозировалась, но не произошла), ПР – пропуск бури (буря не прогнозируется, но происходит) и СП правильный прогноз спокойных условий, т. е. отсутствия бури в следующие три дня.

Для окончательного прогноза нужно использовать совокупность прогнозов по всем четырем параметрам, введя следующее правило: если для данного дня по двум или больше параметрам прогнозируется буря, буря указывается и в окончательном прогнозе, независимо от того, что дает прогноз по двум другим параметрам. Если прогнозируется буря только по одному параметру, но три остальные метода дают прогноз спокойных условий, то в окончательном прогнозе указывается СП. Для пяти месяцев, рассмотренных подробно, в итоговой таблице указывается результат прогнозирования отдельно с помощью каждого из методов и суммарно по совокупности всех четырех методов.

Ниже приводятся результаты пробного прогноза для всех рассмотренных месяцев. Чтобы не перегружать статью, мы даем подробное описание результатов лишь для пяти из них, а для остальных в суммарной таблице приводим лишь окончательные прогнозы для каждого месяца.

3.2. Результаты для января 2011 г.

В этом месяце произошли две магнитные бури: 6 числа ($Dst = -40$ нТл) и 13 числа ($Dst = -30$ нТл). Результаты сравнения прогнозов по каждому параметру для всех дней месяца кроме дней бурь приведены в соответствующих столбцах таблицы 1. Используются обозначения, приведенные в предыдущем подразделе.

Рассмотрим отдельно результаты прогнозы с помощью каждого из параметров. Прогноз по N дает правильный прогноз наступления бури для 5 дней (3–4 и 10–12 января) и 1 пропуск бури (5 января). В течение четырех дней (2 и 19–21 января) этот прогноз дает ложную тревогу. В остальные дни правильно прогнозируются спокойные условия (отсутствие бури). Таким образом для 17 из 22 дней прогноз по N оказался правильным (либо правильно предсказана буря, либо предсказаны спокойные условия). Для 5 дней прогноз оказался ошибочным – ложная тревога, или пропуск бури.

Прогноз по N(+) дает правильный прогноз наступления бури для 4 дней, две ложных тревоги и два пропуска бури. Таким образом, суммарный эффект чуть лучше, чем для прогноза по N – 18 дней с правильным прогнозом и 4 дня с ошибочным.

Прогнозы по отношениям N(-)/N(+) и N(>30)/N имеют худшие характеристики (см. соответствующие столбцы в таблице 1). Для обоих параметров буря предсказывается только в двух случаях, и наблюдается больше пропусков и ложных тревог, чем для прогнозов по N и N(+). Для обоих параметров суммарный результат один и тот же: 15 дней правильных прогнозов и 7 дней ошибочных прогнозов.

Как видно из последнего столбца таблицы 1, при одновременном использовании прогноза по всем четырем параметрам число дней с ошибочным прогнозом оказывается таким же, как и при прогнозе по N (пять) и чуть больше, чем по прогнозу по N(+). Однако, окончательный прогноз представляется более надежным, поскольку он базируется на анализе большего числа параметров.

Таблица 1. Результаты для января 2011 г.

Дни	параметры				По всем
	N	N(+)	N(-)/N(+)	N(>30)/N	
1	2	3	4	5	6
1					
2	Л	Л	СП	СП	Л
3	Б	Б	ПР	ПР	Б

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6
4	Б	ПР	Б	ПР	Б
5	ПР	ПР	Б	ПР	ПР
6-9			Буря $Dst = -40$ нТл		
10	Б	Б	ПР	ПР	Б
11	Б	Б	ПР	Б	Б
12	Б	Б	ПР	Б	Б
13-16			Буря $Dst = -30$ нТл		
17	СП	СП	СП	СП	СП
18	СП	СП	Л	СП	СП
19	Л	СП	Л	СП	Л
20	Л	СП	Л	Л	Л
21	Л	Л	СП	Л	Л
22	СП	СП	СП	СП	СП
23	СП	СП	СП	СП	СП
24	СП	СП	СП	СП	СП
25	СП	СП	СП	СП	СП
26	СП	СП	СП	Л	СП
27	СП	СП	СП	СП	СП
28	СП	СП	СП	СП	СП
29	СП	СП	СП	СП	СП
30	СП	СП	СП	СП	СП
31	СП	СП	СП	СП	СП

3.3. Результаты для февраля 2014 г.

В этом месяце произошли три магнитные бури: 6 числа ($Dst = -39$ нТл), 18 числа ($Dst = -119$ нТл) и 27 числа ($Dst = -57$ нТл). Мы применили все 4 предлагаемых подхода к оценке ситуации. Результаты сравнения прогнозов по каждому параметру для всех дней месяца кроме дней бурь приведены в соответствующих столбцах таблицы 2.

Рассмотрим результаты прогноза отдельно с помощью каждого из параметров.

Таблица 2. Результаты для февраля 2014 г.,

Дни	параметры				По всем
	N	N(+)	N(-)/N	N(>30)/N	
1	2	3	4	5	6
1					
2	Л	Л	Л	СП	Л
3	Б	Б	Б	ПР	Б
4	Б	Б	Б	ПР	Б
5	Б	Б	Б	Б	Б
6-10			Буря $Dst = -39$ нТл		
11			СП	СП	СП
12	Л	СП	СП	СП	СП
13	Л	СП	СП	СП	СП
14	Л	СП	СП	СП	СП
15	ПР	ПР	Б	ПР	ПР
16	Б	Б	Б	Б	Б
17	Б	Б	Б	Б	Б
18-24			Буря $Dst = -119$ нТл		
25	Б	Б	Б	Б	Б
26	Б	Б	Б	Б	Б
27			Буря $Dst = -97$ нТл		

Прогноз по N дает правильный прогноз наступления бури для 7 дней, один пропуск бури и 4 ложных тревоги.

Прогноз по $N(+)$ также дает правильный прогноз для 7 предбуревых дней. При этом правильно предсказаны спокойные условия для 3 дней, но есть одна ложная тревога и один пропуск бури.

Прогноз по отношению $N(-)/N(+)$ дал правильный прогноз для всех 8 предбуревых дней и 4 спокойных дней, но дал два пропуска бури.

Прогноз по $N(>30)/N$ дает правильный прогноз для 5 предбуревых дней и четырех спокойных дней с одним днем пропуска бури.

Как видно из последнего столбца таблицы 2, при одновременном использовании прогноза по всем четырем параметрам число дней с правильным прогнозом становится равно 11, а с ошибочным прогнозом – 2. Окончательный прогноз представляется более надежным, поскольку он базируется на анализе большего числа параметров.

3.4. Результаты для февраля 2015 г.

В этом месяце произошли три магнитные бури: 7 числа ($Dst = -44$ нТл), 17 числа ($Dst = -69$ нТл) и 23 числа ($Dst = -58$ нТл). Кроме того, 1 марта произошла буря с $Dst = -56$ нТл, поэтому три последних дня месяца были предбуревыми.

Результаты сравнения прогнозов по каждому параметру для всех дней месяца кроме дней бурь приведены в соответствующих столбцах таблицы 3.

Рассмотрим отдельно результаты прогноза с помощью каждого из параметров.

Таблица 3. Результаты для февраля 2015 г.

Дни	параметры				по всем
	N	$N(+)$	$N(-)/N$	$N(>30)/N$	
1-4	Возмущенные по Dst				
5					
6	ПР	ПР	Б	ПР	ПР
7-9	Буря $Dst = -44$ нТл				
10					
11	СП	СП	Л	СП	СП
12	СП	СП	Л	СП	СП
13	Л	Л	Л	Л	Л
14	Б	Б	Б	Б	Б
15	Б	Б	Б	Б	Б
16	Б	Б	Б	Б	Б
17-19	Буря $Dst = -69$ нТл				
20	Б				Б
21	Б	ПР	Б	ПР	Б
22	Б	ПР	Б	ПР	Б
23	Буря $Dst = -58$ нТл				
26					
27	Б	Б	Б	Б	Б
28	Б	Б	Б	Б	Б
1 марта	Буря $Dst = -56$ нТл				

Прогноз по N дает правильный прогноз наступления бури для 8 дней, один пропуск бури и одну ложную тревогу. В остальные 2 дня правильно прогнозируются спокойные условия (отсутствие бури). Таким образом для 10 дней из 12 прогноз по N оказался правильным (либо правильно предсказана буря, либо предсказаны спокойные условия). Ошибочных прогнозов только два: один пропуск бури и одна ложная тревога.

Прогноз по $N(+)$ дал правильный прогноз для 7 предбуревых дней, но дал 3 ложных тревоги и один пропуск бури.

Прогноз по отношению $N(-)/N(+)$ дал правильный прогноз для 8 предбуревых дней, но дал 3 пропуска бури.

Прогноз по $N(>30)/N$ дал правильный прогноз для 7 предбуревых дней и 2 спокойных дней, но дал один пропуск бури и одну ложную тревогу.

Как видно из последнего столбца таблицы 3, при одновременном использовании прогноза по всем четырем параметрам число дней с правильным прогнозом становится равно 10, а с ошибочным прогнозом – 2. Результат такой же, как и для прогноза по N , однако, окончательный прогноз представляется более надежным, поскольку он базируется на анализе большего числа параметров.

Одно замечание по результатам сравнения для февраля 2015 г. Вызывает удивление тот факт, что прогнозы по всем четырем параметрам дали пропуск бури для предбуревых дней 6 февраля. Мы предполагаем, что это может быть связано с наличием в этот день возмущений не геомагнитного (метеорологического) плана.

3.5. Результаты для мая-июня 2015 г.

Выбран длинный период магнито-спокойных дней, после которого 7 июня произошла буря с $Dst = -67$ нТл. В остальные дни мая и июня наблюдались возмущения по Dst и Kp , которые не позволяли выделить спокойный период для анализа.

Таблица 4. Результаты для мая-июня 2015 г.

Дни	параметры				по всем
	N	$N(+)$	$N(-)/N$	$N(>+30)/N$	
24 мая					
25	СП	СП	Л	СП	СП
26	СП	СП	Л	СП	СП
27	СП	СП	Л	СП	СП
28	СП	СП	Л	СП	СП
29	СП	СП	Л	СП	СП
30	СП	СП	Л	СП	СП
31	СП	СП	Л	СП	СП
1 июня	СП	СП	Л	СП	СП
2	СП	СП	Л	СП	СП
3	СП	СП	Л	СП	СП
4	Б	Б	Б	Б	Б
5	Б	Б	Б	Б	Б
6	Б	Б	Б	Б	Б
7					

Буря $Dst = -67$ нТл

Результаты сравнения прогнозов по каждому параметру для всех проанализированных дней приведены в соответствующих столбцах таблицы 4. Используются те же обозначения, что и в предыдущих подразделах.

Рассмотрим результаты прогноза с помощью каждого из параметров. Прогноз по N , $N(+)$ и $N(>30)/N$ дает правильный прогноз для всех дней: спокойные условия 25 мая – 3 июня и предсказание бури 4–6 июня.

Прогноз по отношению $N(-)/N(+)$ правильно предсказывает предстоящую бурю в предбуревые дни 4–6 июня, но дает ложные тревоги в остальные дни.

Как видно из последнего столбца таблицы 4, при одновременном использовании прогноза по всем четырем параметрам получается правильный прогноз для всех проанализированных дней. Это – лучший результат из всех пробных прогнозов.

3.6. Результаты для декабря 2015 г.

В этом месяце было много возмущенных дней и мало дней, претендующих на название спокойных. Произошли 5 магнитных бурь: 6 числа ($Dst = -39$ нТл), 14 числа ($Dst = -54$ нТл), 20 числа ($Dst = -161$ нТл), 27 числа ($Dst = -35$ нТл) и 31 числа ($Dst = -105$ нТл). Кроме того, 30 ноября произошла буря с $Dst = -42$ нТл, и ее восстановительная фаза занимала два первых дня месяца.

Результаты сравнения прогнозов по каждому параметру для всех дней месяца кроме дней бурь приведены в соответствующих столбцах таблицы 5.

Таблица 5. Результаты для декабря 2015 г.

Дни	параметры				по всем
	N	N(+)	N(-)/N	N(>30)/N	
30-2	Буря $Dst = -42$ нТл				
3	Б	Б		Б	Б
4	Б	Б	Б	Б	Б
5	Б	Б	Б	Б	Б
6-7	Буря $Dst = -39$ нТл				
8			СП		СП
9	Л	СП	СП	СП	СП
10	Л	СП	СП	СП	СП
11	Б	ПР	ПР	ПР	ПР
12	Б	ПР	ПР	ПР	ПР
13	Б	ПР	Б	ПР	Б
14-16	Буря $Dst = -54$ нТл				
17					
18	ПР	ПР	Б	Б	Б
19	ПР	ПР	Б	Б	Б
20-23	Буря $Dst = -161$ нТл				
24				Б	Б
25	Б	Б	Б	Б	Б
26	Б	Б	Б	Б	Б
27	Буря $Dst = -35$ нТл				
28		Б		Б	Б
29	ПР	Б	Б	Б	Б
30	Б	Б	Б	Б	Б
31	Буря $Dst = -105$ нТл				

Рассмотрим результаты прогноза отдельно с помощью каждого из параметров.

Прогноз по N дает правильный прогноз наступления бури для 9 дней, три пропуска бури и две ложные тревоги. Таким образом, для 9 дней из 14 прогноз по N оказался правильным (правильно предсказана буря). Ошибочных прогнозов пять.

Прогноз по N(+) дал правильный прогноз бури для 8 предбуревых дней и двух спокойных дней, но пять пропусков бури.

Прогноз по отношению N(-)/N(+) дал правильный прогноз для 9 предбуревых дней и 3 спокойных дня и всего два пропуска бури.

Прогноз по N(>30)/N дал правильный прогноз для 11 предбуревых дней и 2 спокойных дня, но дал три пропуска бури.

Как видно из последнего столбца таблицы 5, при одновременном использовании прогноза по всем четырем параметрам прогноз оказывается правильным (правильно прогнозируется буря, или спокойные условия) для 15 из 17 рассмотренных дней.

Одно замечание по результатам сравнения для декабря 2015 г. Был сознательно выбран месяц с большим количеством бурь и малым числом спокойных дней. При этом диапазон интенсивностей бурь был достаточно широким – от слабых бурь с $Dst = -35$ и -39 нТл до достаточно сильных бурь с $Dst < -100$ нТл. Оказалось, что метод хорошо предсказывает все бури этого возмущенного периода и правильно характеризует два спокойных дня.

3.7. Результаты для 10 периодов

Выше рассмотрены подробно результаты пробного прогнозирования для пяти периодов с показом отдельно прогнозов по каждому из параметров и суммарного прогноза. Чтобы не перегружать отчет, мы даем сводную таблицу 6 с результатами только суммарного прогноза еще для десяти проанализированных периодов. Для экономии места в таблице опущено слово «буря». Указанные величины в нТл означают, что в эти дни была буря с такой интенсивностью.

Таблица 6. Результаты суммарного прогноза для разных периодов

Октябрь		Февраль		Март		Июль		Март		Февраль		август		апрель		январь		март	
2010		2011		2011		2012		2013		2014		2014		2015		2016		2017	
День	рез	День	рез	День	рез	День	рез	День	рез	День	рез	День	рез	День	рез	День	рез	День	рез
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
				26.02	Б	1–4	Возм	5	СП	2	Л	1	Л	22	СП	31.12	–42 нТл	25.02	
1		2	ПР	27	Б	5		6	СП	3	Б	2	Л	23	СП	1–2	Возм	26	Б
2	Л	3	ПР	28	Б	6	Б	7	СП	4	Б	3	СП	24	Б	3	Б	27	Б
3	Л	4–7	–63 нТл	1–3	–64 нТл	7	Б	8	Л	5	Б	4	СП	25	Б	4	Б	28	Б
4	Л	8		4		8	Б	9	Л	6–10	–39 нТл	5	СП	26	Б	5	Б	1	–62 нТл
5	Л	9	СП	5	СП	9–11	–78 нТл	10	Л	11	СП	6	СП	27	–36 нТл	6–7	–31 нТл	16	
6	Л	10	СП	6	СП	12		11	Л	12	СП	7	СП			8	Л	17	Л
7	Л	11	ПР	7	Б	13	М	12	Л	13	СП	8	СП			9	Б	18	Л
8	Б	12	ПР	8	Б	14	М	13	Л	14	СП	9	СП			10	Б	19	Л
9	Б	13	Б	9	Б	15–20	–139 нТл	14	Б	15	ПР	10	СП	11	Б	20	Б		
10	ПР	14	–40 нТл	10–13	–83 нТл	21		15	Б	16	Б	11	Л			12–14	–36 нТл	21	Б
11–13	–75 нТл	15–21	Возм	14		22	СП	16	Б	17	Б	12	Л			15	СП	22	Б
14		22	15	СП		23	СП	21	–132 нТл	18–24	–119 нТл	13	Л			16	ПР	23	–38 нТл
15	СП	23	СП	16	СП	24	СП	22		25	Б	14	Л			17	Б	24	Б
16	СП	24	СП	17	СП	25	ПР	23	Л	26	Б	15	Л	18	Б	25	ПР		
17	Возм	25	Л	18	СП	26	ПР	24	Л	27	–97 нТл	16	СП			19–23	–101 нТл	26	Б
18	СП	26	Б	19	СП	27	Возм	25	Л			17	СП			24		27	–71 нТл

Представляет интерес статистика по всем 15 проанализированным периодам (таблицы 1–6). Вот суммарные результаты:

Дней с правильным прогнозом бури (Б) 93

Дней с правильным прогнозом спокойных условий (СП) 78

Дней с пропуском бури (ПР) 13

Дней с ложными тревогами (Л) 49

Таким образом, пробный прогноз правильно предсказал предстоящую бурю или ее отсутствие (Б+СП) для 171 дня. Ошибочных прогнозов (ПР+Л) оказалось 62. Это означает, что в среднем прогноз оказался правильным в 73% случаев.

Следует обратить внимание на одно важное обстоятельство. Подавляющую часть ошибочных прогнозов составляют ложные тревоги, а пропусков бурь мало. При использовании такого метода прогнозирования в реальной службе, это может оказаться положительным фактором, т. к. ложные тревоги менее неприятны для некоторых проблем распространения радиоволн, чем пропуски.

3.8. Оценки интенсивности предстоящей бури

Все сказанное выше в данном параграфе касается проверки с помощью пробного прогнозирования основной задачи разработанного метода – определения того, ожидается буря, или нет. Возникает естественный вопрос о том, может ли этот метод сказать нам что-либо об интенсивности бури, если она ожидается.

Можно пытаться предсказать интенсивность бури по наблюдаемым величинам N и $N(+)$, используя формулы (5) и (10). Мы попытались это сделать для всех прогнозов, описанных в этом подразделе. Результаты приведены в таблице 7.

Таблица 7. Реальные и прогнозируемые величины Dst в нТл

Дата бури	Реальный Dst	прогноз по		
		N	$N(+)$	$(N+N(+))/2$
1	2	3	4	5
11 октября 2010 г.	-75	-22	-27	-24.5
23 октября 2010 г.	-41	-35	-32	-34
6 января 2011 г.	-40	-18	-19	-18.5
13 января. 2011 г.	-30	-48	-35	-42
4 февраля 2011 г.	-63	-66		-66
1 марта 2011 г.	-88	-97	-73	-85
26 сентября 2011 г.	-118	-130	-120	-125
9 июля 2012 г.	-78	-130	-91	-111
17 марта 2013 г.	-132	-130		-130
29 марта 2013 г.	-59	-51	-39	-45
6 февраля 2014 г.	-39	-55	-44	-49
18 февраля 2014 г.	-119	-26	-27	-27
27 февраля 2014 г.	-97	-97	-67	-82
17 февраля 2015 г.	-69	-66	-74	-70
23 февраля 2015 г.	-58	-48		-48
1 марта 2015 г.	-56	-38	-52	-45
27 апреля 2015 г.	-36	-22	-26	-24
7 июня 2015 г.	-67	-38	-32	-35
6 декабря 2015 г.	-39	-41	-39	-40
14 декабря 2015 г.	-54	-41		-41

Продолжение таблицы 7.

1			2	3	4	5
27	декабря	2015 г.	-35	-32	-29	-31
31	декабря	2015 г.	-105	-35	-29	-32
6	января	2016 г.	-31	-38	-23	-31
12	января	2016 г.	-36	-37	-23	-30
19	января	2016 г.	-101	-35	-25	-30
31	января	2016 г.	-53	-68	-47	-58
1	марта	2017 г.	-62	-130	-65	-98
23	марта	2017 г.	-38	-130	-75	-102
27	марта	2017 г.	-71	-40		-40

Отметим сразу, что при прогнозировании по параметру N в четырех случаях (бури 26 сентября 2011 г., 9 июля 2012 г. и марта 2017 г.) в результате расчета по формуле (5) получились нереально высокие величины Dst больше 130 нТл. Мы условно обозначили их в таблице 7 как -130 нТл.

Из таблицы 7 следует, что прогнозы по N и $N(+)$ несколько отличаются. Если использовать как окончательный прогноз среднее значение между прогнозами по N и $N(+)$, то получатся величины, приведенные в последнем столбце таблицы.

Чтобы было легче сравнивать прогнозируемые значения с интенсивностью реально произошедших бурь, мы в последнем столбце таблицы (7) выделили жирным шрифтом случаи, когда прогнозируемое значение отличалось от реального не более, чем на 15 нТл. Видно, что для 18 бурь из 28 окончательный прогноз давал величину, отличающуюся от реальной не более, чем на 15 нТл. Это означает, что вероятность успешного прогноза с такой ошибкой равна 64%.

Конечно, точность «попадания», которую мы приняли для оценки успешности прогноза невелика. Но, поскольку до сих пор, насколько нам известно, ионосферные данные вообще не применялись для прогнозирования магнитных бурь, и поскольку надежных методов прогноза бурь не существует, даже прогноз с такой точностью может в определенных ситуациях быть весьма полезен.

3.9. Пробное прогнозирование для с. Moscow

Хотя описанный в предыдущем подразделе метод прогнозирования основан на опубликованных в наших статьях детальных исследованиях предбуревых эффектов в $\delta foF2$ по данным ст. Juliusruh, представляла интерес попытка использовать этот метод для пробного прогноза по данным ст. Moscow, для которой есть данные в банке ионосферных данных.

Мы выбрали для такого пробного прогнозирования два месяца (февраль 2014 г. и декабрь 2015 г.), для которых проводилось пробное прогнозирование и по данным ст. Juliusruh (см. выше). Результаты суммарного прогноза по всем четырем параметрам приведены в табл. 8.

Таблица 8. Результаты пробного прогнозирования для с. Moscow.

Февраль 2014	дата	2	3	4	5	6-10	11	12	13	14	15	16	
	результат	Л	Б	Б	Б	Буря		Л	Л	Л	Б	Б	
	дата	17	18-24	25	26	27							
Декабрь 2015	результат	Б	Буря	Б	Б	Буря							
	дата	1-2	3	4	5	6-8	9	10	11	12	13	14-16	
	результат	Post storm	ПР	Б		Буря	СП	СП	Б	Б	Б	Буря	
	дата	17	18	19	20-23	24	25	26	27	28	29	30	31
	результат	Б	Б	Б	Буря	Б	Б	Б	Буря	ПР	ПР	ПР	Буря

Мы использовали точно тот метод, который описан в предыдущем разделе и использован для пробных прогнозов для ст. Juliusruh. Единственное исключение состоит в том, что мы для декабря

2015 г. приняли несколько более высокое пороговое значение $N(-)/N^*$, равное 1.0, чем использовалось для данных ст. Juliusruh (0.8).

Как видно из таблицы 8, результаты пробного прогнозирования для двух месяцев по ст. Moscow можно считать вполне удовлетворительными. Для февраля 2014 г. правильно предсказана буря для 8 дней при 4 ложных тревогах. Для декабря 2015 г. правильно предсказаны буря для 10 дней и спокойные условия для двух дней при 4 пропусках бури. Таким образом, суммарно по двум месяцам получено 20 дней правильных прогнозов и 8 дней ошибочных. При этом важно, что оказались предсказанными все 8 бурь.

Полученные результаты показывают, что разработанный и описанный в данной статье метод прогнозирования магнитных бурь на основании ионосферных данных можно (вероятно, с небольшой модификацией) применять к данным других станций, а не только ст. Juliusruh, на данных которой он основан.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами был выполнен большой цикл работ [Danilov, Konstantinova, 2019; Данилов, Константинова, 2019; 2020 а,б,в; 2021 а,б,в; 2022 а,б,в,г,д; Константинова, Данилов, 2019; 2021] по исследованию различных характеристик поведения $foF2$ в течение трех предбуревых дней. Были найдены зависимости этих характеристик от различных внешних параметров, прежде всего от солнечной активности и интенсивности предстоящей магнитной бури.

На основании этих исследований был разработан метод прогнозирования факта наступления магнитной бури. Описание метода приводится в параграфе 2. Для прогнозирования бури по системе «да-нет» используются четыре параметра предбуревых изменений критической частоты $foF2$.

Было проведено пробное прогнозирование для 15 месячных периодов. Результаты этого прогнозирования подробно обсуждаются в параграфе 3. Получено, что из 232 дней прогноз оказался правильным (правильно предсказывается буря, или ее отсутствие) для 171 дня, т. е. в 73% случаев.

Хотя метод прогноза основан на данных ст. Juliusruh, и для данных этой станции проводилось пробное прогнозирование, была сделана попытка применить этот метод к данным двух месяцев для ст. Moscow (см. 3.9). Результаты оказались удовлетворительными, что позволяет надеяться на то, что метод может применяться к анализу данных и других ионосферных станций.

Хотя, как уже указывалось, основная цель разработанного метода состоит в том, чтобы дать ответ на вопрос ожидается магнитная буря, или нет, была рассмотрена возможность прогнозирования также и интенсивности этой бури. Было получено, что оценка интенсивности бури с точностью 15 нТл оказывается правильной в 63% случаев.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках НИТР Росгидромета 2020–2024 гг. (тема 6.1).
Регистрационный номер АААА-А20-1200112390082-9

ЛИТЕРАТУРА

- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Behavior of $foF2$ prior to geomagnetic storms according to Slough and Juliusruh data // Adv. Space Res. V. 67. P. 4066-4077/ 2021.
- Danilov D., Konstantinova A. V. F-region variations prior to magnetic storms (a review). Adv. Space Res. V.73. N. 5. P. 2323-2337. 2024.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 1. Обзор проблемы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 5. С. 594–606. 2019.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 2. Анализ данных ст. Slough // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 3. С. 329–336. 2020а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 1. Сезонные вариации // Гелиогеофизические исследования. Вып. 28. С. 13–12. 2020б.

- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 2. Зависимость от времени до начала бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 28. С. 13–21. 2020в.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 3. Зависимость от интенсивности бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 29 с. 24–29. 2021а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 4. Зависимость от солнечной активности // Гелиогеофизические исследования. Вып. 30. С. 3–8. 2021б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 5. Зависимость от местного времени начала бури // Гелиогеофизические исследования. Вып. 30. С. 15–21. 2021в.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 6. Разделение эффектов интенсивности бури и солнечной активности (ст. Juliusruh) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 33. С. 3–11. 2022а.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 7. Разделение эффектов интенсивности бури и солнечной активности (ст. Slough) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 33. С. 12–23. 2022б.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 8. Интенсивность предвестников // Гелиогеофизические исследования. Вып. 34. С. 3–12. 2022в.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 9. Зависимость от интенсивности бури для различных предбуревых дней // Гелиогеофизические исследования. Вып. 34. С. 13–24. 2022г.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Детальный анализ поведения критической частоты слоя $F2$ перед магнитными бурями. 10. Соотношение между отрицательными и положительными событиями // Гелиогеофизические исследования. Вып. 35. С. 3–11. 2022д.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Изменения в области F ионосферы перед магнитными бурями (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия Т. 63. №6. С. 671–685. 2023.
- Данилов А. Д., Константинова А. В. Изменения в области F ионосферы перед магнитными бурями (статьи последних двух лет) // Гелиогеофизические исследования. Вып. 45. С. 15–27. 2024.
- Константинова А. В., Данилов А. Д. Поведение ионосферной области $F2$ перед геомагнитной бурей // Гелиогеофизические исследования. Вып. 22. С. 13–51. 2019.
- Константинова А. В., Данилов А. Д. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 3. Анализ данных ст. Juliusruh // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 3. С. 341–348. 2021.
- Лецинская Т. Ю., Михайлов В. В. Модель SIMP-1: картирование месячных медиан f_oF2 по северному полушарию // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 6. С. 772–780. 2016.

AN EXPERIENCE IN FORECASTING MAGNETIC STORMS BASED ON IONOSPHERIC DATA

Danilov A. D., Konstantinova A. V.

A first attempt to develop a method of forecasting magnetic storm occurrence based on analysis of the critical frequency of the $F2$ layer f_oF2 deviations from its values in quiet condition is described. The method is based on analysis of that deviation according to the Juliusruh и Slough stations data performed by the authors for several hundred storms and published in 15 papers in Russian and international journals. Four characteristics of the f_oF2 values from quiet conditions during three days are used in the method. A separate forecast is made for every characteristic, and a final forecast is issued based on these four forecasts. Results of a test forecasting for 15 periods are presented and their results are considered in detail.

KEYWORDS: MAGNETIC STORMS, IONOSPHERIC F-REGION, PRESTORM IONOSPHERIC DISTURBANCES