

ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИОНОСФЕРНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ МАГНИТНЫХ БУРЬ

© 2022 г. А. Д. Данилов*

Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова Роскомгидромета (ИПГ),
г. Москва, Россия

*e-mail: adanilov99@mail.ru

Поступила в редакцию 12.08.2021 г.

После доработки 20.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Проблема возмущений параметров слоя $F2$ и верхней ионосферы в течение дней, предшествующих началу магнитной бури, известна уже несколько десятилетий. Анализу этих возмущений как в критической частоте и высоте слоя, так и в полном содержании электронов было посвящено много публикаций. Большинство исследователей пришли к выводу, что такие возмущения наблюдаются практически перед каждой бурей, причем положительные возмущения (превышение величин в предбуревой период над соответствующей величиной в геомагнитно спокойный день) преобладают. Ряд исследователей считают даже, что указанные возмущения можно рассматривать как предвестники предстоящей магнитной бури. Альтернативой концепции предвестников является концепция так называемых Q -возмущений, согласно которой возмущения в предбуревые дни никак не связаны с предстоящей бурей, а являются результатом нескольких процессов (метеорологическое влияние на ионосферу, изменение плазмасферо-ионосферного взаимодействия), которые время от времени вызывают отклонения ионосферных параметров. Подробно рассматриваются обе концепции. Приводятся аргументы в пользу концепции предвестников. Эти аргументы связаны, прежде всего, с существованием зависимости параметров предбуревых ионосферных возмущений от параметров предстоящей магнитной бури (ее интенсивности, местного времени начала бури и т.д.). Приводятся примеры таких зависимостей. Кратко рассматриваются работы последних двух лет, в которых представлены новые экспериментальные данные о поведении $foF2$ и ТЕС в предбуревой период.

DOI: 10.31857/S0016794022010047

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема возмущений в ионосферном слое $F2$ известна уже в течение почти 40 лет. Kane [1973a, b; 1975] был первым, кто указал на то, что иногда наблюдается положительная фаза ионосферной бури до SC магнитной бури. Примеры сильных положительных отклонений $foF2$ в предбуревые дни и предположения о возможных механизмах этого явления были приведены в работах [Данилов и др., 1985; Danilov and Belik, 1992].

В дальнейшем указанной проблеме было посвящено достаточно много работ. При этом анализировались не только отклонения от спокойных условий параметров слоя $F2$, но и полного содержания электронов (ТЕС). Подробный анализ этих работ можно найти в обзорах Данилова и Константиновой [2019] и Danilov and Konstantinova [2019]. Здесь приведем лишь основной вывод указанных обзоров. Он состоит в том, что наблюдаются как положительные, так и отрицательные отклонения указанных параметров с амплитудой

от десятков процентов до фактора 1.5–2 в течение двух-трех дней до начала магнитного возмущения (в большинстве случаев – бури), при этом положительные отклонения наблюдаются чаще. Ряд исследователей (см., например, Благовещенский и Калишин, [2009]; Blagoveshchensky et al., [2017]), считают, что указанные отклонения могут использоваться как предвестники предстоящей магнитной бури. Учитывая прикладную важность возможности предсказания магнитных возмущений, обсуждаемая проблема представляет большой интерес.

Основной альтернативой концепции ионосферных предвестников является концепция так называемых Q -возмущений. Эти возмущения были рассмотрены в работе Mikhailov et al. [2004]. Mikhailov and Perrone [2009] высказали предположение, что возмущения ионосферных параметров в дни, предшествующие магнитным бурям, являются именно Q -возмущениями и не связаны с предстоящей бурей.

Однако, после указанной публикации Mikhailov and Perrone [2009] появился целый ряд новых публикаций, посвященных ионосферным эффектам, наблюдаемым в предбуревые дни. Большинство из них подробно рассмотрены в указанных выше обзорах. Кроме того, была опубликована серия работ Данилова и Константиновой (см. ниже секцию 2.2) с детальным анализом предбуревых отклонений $foF2$ по данным станций Slough и Juliusruh во время нескольких сотен бурь с 1976 по 2010 гг. Представляется, что они содержат важные аргументы в пользу концепции ионосферных предвестников.

Относительно недавно появилась еще одна статья Mikhailov and Perrone [2020], в которой отрицается концепция предвестников и приводятся новые аргументы в пользу концепции Q-возмущений.

Цель данной работы – обсудить проблему природы отклонений $foF2$ в предбуревые дни с учетом указанных публикаций Mikhailov and Perrone [2009, 2020], результатов указанной выше серии работ Данилова и Константиновой и работ по изучению поведения ионосферы до и в течение магнитных бурь, появившихся после выхода в свет упоминавшихся выше обзоров.

2. ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Q-возмущения

В работе Mikhailov and Perrone [2020] выполнен анализ отклонений критической частоты слоя $F2$, $foF2$, с амплитудой выше 30% и длительностью два часа и более по данным наблюдений методом ВЗ на трех станциях: Slough, Juliusruh и Rome. При этом принимались меры к тому, чтобы избежать периодов, когда магнитное поле было возмущенным, а также периодов, в которые было возможно влияние предшествовавших магнитных бурь.

Анализ бы направлен на сравнение количества рассмотренных возмущений $foF2$ в периоды, после которых следовали магнитные бури, и в периоды без последующих магнитных бурь. Работа Mikhailov and Perrone [2020] на мой взгляд очень полезна, поскольку она содержит большую выборку экспериментальных данных и ее статистическую обработку, однако эта работа не может служить опровержением концепции предвестников по причинам, обсуждаемым ниже.

Основной результат работы Mikhailov and Perrone [2020] представлен в виде таблицы. Она показывает, что число отклонений $foF2$ длительностью более 2 часов и с амплитудой $\geq 30\%$, после которых в течение 72 ч наблюдалась магнитная буря, в несколько раз меньше, чем число таких отклонений, за которыми не следовало магнитных бурь. Например, для Slough соответствующие

величины равны 41 и 188, а для Rome – 19 и 84. Эти результаты указывают на то, что рассмотренные отклонения критической частоты наблюдаются и вне близости от магнитных возмущений. Однако, поскольку периоды значительных магнитных возмущений составляют в среднем лишь очень небольшую часть года, вероятность “попасть” при анализе предбуревых дней на указанные Q-возмущения невелика. Хотя данные указанной таблицы и показывают, что такая вероятность есть. Случаи такого “попадания” создают определенный шум при анализе предбуревых периодов и, вероятно, как раз и определяют разброс точек на зависимостях параметров отклонений $foF2$ от внешних условий (см. ниже, 2.2).

К сожалению, Mikhailov and Perrone [2020] не приводят характеристику, которая на наш взгляд, была бы также уместна для анализа обсуждаемой проблемы, а именно, для скольких рассмотренных бурь указанные отклонения $foF2$ наблюдались в течение предбуревых дней и для скольких – нет.

Данилов и Константинова анализировали периоды только магнитных бурь, поэтому данных для сравнения с результатами рассмотренной выше таблицы у нас нет. Но есть статистика того, как часто в предбуревой период не наблюдаются отклонения $foF2$. Из 254 рассмотренных для ст. Slough бурь только в 2 бурях не было обнаружено отклонений $foF2$ в течение предбуревых дней и только в 17 бурях наблюдалось всего одно отклонение. Соответствующие цифры для ст. Juliusruh равны 272, 4 и 12.

Критикуя концепцию предвестников, Mikhailov and Perrone [2009, 2020] указывают на то, что во многих работах, посвященных ионосферным возмущениям в предбуревой период, не обращалось должного внимания на степень магнитной возмущенности самих предбуревых дней. Это замечание вполне справедливо в целом. И в обзоре Данилова и Константиновой [2019] также указывалось на это обстоятельство. Однако эта критика справедлива не для всех работ. В указанном обзоре приводятся результаты целого ряда исследований (см., например, Buresova and Laštovička [2007, 2008]; Blagoveshchensky et al., [2017]), в которых на этот важный факт обращалось внимание, и проанализированные предбуревые дни были заведомо магнитно спокойными. Возмущенность анализируемых предбуревых дней представляет собой первую “опасность” при анализе предвестников.

Вторую “опасность” представляют геомагнитные возмущения, которые могли происходить за несколько суток до анализируемых предбуревых дней. Если последние попадали даже на конец восстановительной фазы такого возмущения, отклонения $foF2$ или ТЕС могли оказаться следствием этого возмущения, а не предвестниками

предстоящей бури. В серии работ Данилова и Константиновой, упомянутых выше, на эту опасность обращалось особое внимание – все случаи, когда была опасность влияния более ранних магнитных возмущений, были исключены из рассмотрения.

Mikhailov and Perrone [2020] рассматривают один случай поведения $foF2$ в предбуревые дни (магнитная буря 28 января 1995 г.), приведенный в качестве примера в обзорной работе [Danilov and Konstantinova, 2019] и дают его объяснение в рамках концепции Q-возмущений. Они подчеркивают, что буря – зимняя, а по их оценкам именно зимой вероятность появления Q-возмущений наиболее высока. Однако этот случай – один из двух, приведенных в указанной обзорной работе только в качестве примера. Там же указывается, что для ст. Slough рассмотрено несколько сот бурь. В последующих работах Данилова и Константиновой (см. ниже) выполнен статистический анализ, основанный на 254 магнитных бурях для ст. Slough и 272 бурях для ст. Juliusruh. К подавляющему числу этих случаев объяснения, приведенные в работе Mikhailov and Perrone [2020], не применимы. Зимние бури составляют лишь около трети общего количества рассмотренных бурь, а две трети относятся не к зимнему, а к летнему и равноденственным периодам.

2.2. Недавние результаты работ Данилова и Константиновой

Как уже указывалось выше, в 2020 и 2021 гг. была опубликована серия работ Данилова и Константиновой с результатами детального анализа характеристик предбуревых отклонений $foF2$ по данным ст. Slough и ст. Juliusruh [Данилов и Константинова, 2020а, б, в, 2021а, б, в; Константинова и Данилов, 2021; Danilov and Konstantinova, 2021].

По данным ст. Slough были рассмотрены 254 бури за период с 1976 по 2010 гг. и найдено 1353 события (отклонения $foF2$ от спокойных условий). 996 отклонений имели положительный знак и 357 – отрицательный. По данным ст. Juliusruh были рассмотрены 272 бури за тот же период и найдено 2682 события (отклонения $foF2$ от спокойных условий). 2007 отклонений имели положительный знак и 675 – отрицательный.

Рассматривались зависимости общего числа отклонений, а также отдельно положительных и отрицательных отклонений (с амплитудами 20–30%, 30–40% и >40%) от пяти параметров. Этими параметрами были: сезон, солнечная активность, интенсивность последующей магнитной бури (минимальное значение Dst -индекса), местное время начала бури SO и время ΔT между данным отклонением $foF2$ и SO. Ниже приводятся неко-

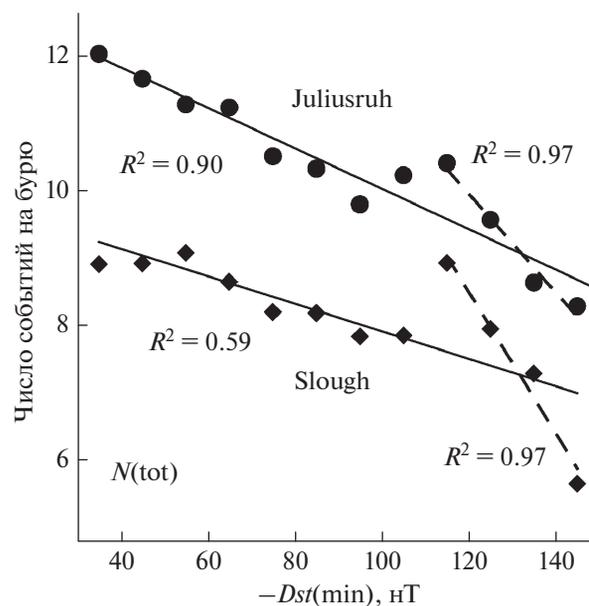


Рис. 1. Зависимость $N(\text{tot})$ от $Dst(\text{min})$ для двух станций.

торые результаты указанной серии публикаций, имеющие непосредственное отношение к обсуждению, которому посвящена данная статья.

Полученная зависимость от сезона (вероятность появления отклонений $foF2$ в предбуревые дни зимой несколько выше, чем летом) не может рассматриваться как аргумент против концепции Q-возмущений, поскольку согласно Mikhailov and Perrone [2020] вероятность появления этих возмущений также выше зимой.

Представляется, что в плане обсуждаемой в этой работе дискуссии наиболее интересны три зависимости: от интенсивности бури, от ΔT и от местного времени начала бури.

На рисунке 1 приведена зависимость общего числа событий (отклонений $foF2$) $N(\text{tot})$ от интенсивности последующей магнитной бури согласно Данилову и Константиновой [2021а]. Величины R^2 (коэффициент определенности по F-тесту Фишера) показывают, что для обеих станций полученная зависимость значима. Статистическая значимость S составляет 99% для Juliusruh и 95% для Slough. Обращает на себя внимание тот факт, что для $Dst(\text{min}) < 120$ нТл четыре последние точки рисунка для обеих станций ложатся почти точно на прямую с очень высокими величинами R^2 . Создается впечатление, что для сильных бурь зависимость от Dst выражена особенно хорошо. К сожалению, данных для очень сильных бурь мало, поэтому построить сколь-нибудь надежную зависимость $N(\text{tot})$ от $Dst(\text{min})$ для $Dst(\text{min}) > 150$ нТл не удастся.

Как указывалось во ВВЕДЕНИИ, во многих исследованиях предбуревых эффектов подчерки-

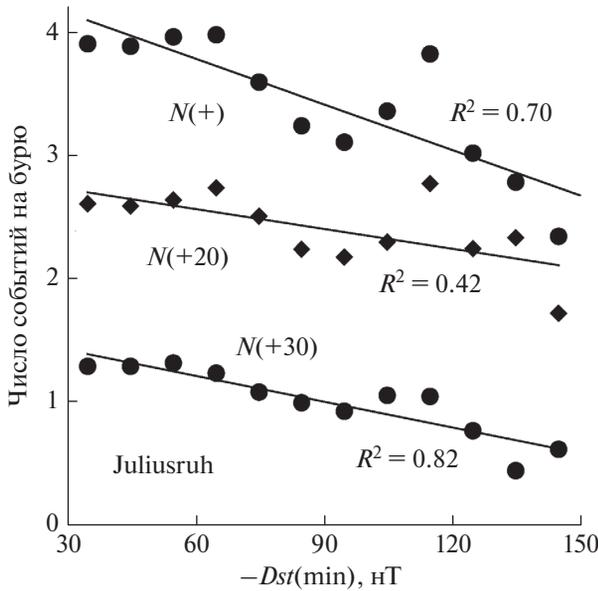


Рис. 2. Зависимость общего числа положительных отклонений $N(+)$ и числа положительных отклонений с амплитудой 20–30% $N(+20)$ и больше 30% $N(+30)$ от интенсивности бури.

валось, что в предбуревые дни доминируют положительные отклонения ионосферных параметров ($foF2$ и TEC). На рисунке 2 приведены зависимости от $Dst(\text{min})$ положительных отклонений $foF2$ с различной амплитудой для ст. Juliusruh согласно Данилову и Константиновой [2021a]. Как видно из этого рисунка, и для всех положительных отклонений $N(+)$, и отдельно для отклонений с амплитудой 20–30% $N(+20)$ и больше 30% $N(+30)$ наблюдается хорошо выраженная зависимость, аналогичная приведенной на рис. 1 зависимости $N(\text{tot})$.

Отметим, что на рис. 2 зависимость от $Dst(\text{min})$ выражена особенно хорошо ($R^2 = 0.82$) для $N(+30)$. Это важно в двух отношениях. Во-первых, в случае отклонений с амплитудой в 20–30% существует вероятность “засорения” искомой зависимости случайными небольшими отклонениями (в том числе, вероятно, и Q-возмущениями), не связанными с предстоящей магнитной бурей. В рассматриваемой серии работ Данилова и Константиновой эффект более выраженной зависимости для отклонений с амплитудой более 30%, чем для отклонений с амплитудой в 20–30%, наблюдался при анализе различных параметров на обеих станциях.

Во-вторых, в рассматриваемой серии работ Данилова и Константиновой анализировались все отклонения $foF2$ с амплитудой, большей 20%. В работе же Mikhailov and Perrone [2020] рассматривались только отклонения с амплитудой, большей 30%. Рисунок 2 показывает, что найденная зависимость от интенсивности магнитной бури

наблюдается в том числе и для отклонений, рассмотренных Mikhailov and Perrone [2020].

Представляется, что полученные зависимости отклонений $foF2$ в предбуревые дни от интенсивности предстоящей магнитной бури представляют собой очень сильный аргумент в пользу концепции ионосферных предвестников. Действительно, если бы наблюдаемые отклонения $foF2$ представляли собой Q-возмущения, они ничего не могли бы “знать” о предстоящей магнитной буре и статистически значимая зависимость их характеристик от интенсивности этой бури была бы невозможна.

На рисунке 3 представлена зависимость полного числа событий $N(\text{tot})$ от времени от момента события (отклонения $foF2$) до момента начала бури SO, ΔT , согласно Данилову и Константиновой [2020в]. Рисунок 3а показывает, что при линейной аппроксимации всех точек для обеих станций получается хорошо выраженная и статистически значимая зависимость: $N(\text{tot})$ падает с ростом ΔT . При этом видно, что кривая для Slough несколько сдвинута относительно кривой для Juliusruh.

Этот эффект иллюстрирует рис. 3б, где точки для Slough сдвинуты на 2 ч относительно исходных величин ΔT . Видно, что для обеих станций наблюдаются интервалы ΔT с более вероятным и менее вероятным появлением анализируемых отклонений.

Представляется, что обнаруженная зависимость отклонений $foF2$ в предбуревые дни от времени до момента SO является вторым важным аргументом в пользу концепции предвестников и против концепции Q-возмущений. Совершенно непонятно, как такие возмущения могли бы “знать” что-нибудь о моменте SO предстоящей бури, если они никак с этой бурей не связаны. С точки же зрения концепции предвестников эта зависимость вполне естественна и легко объяснима – чем ближе к началу бури, тем вероятнее появление обсуждаемых возмущений, если они являются предвестниками этой бури.

Тот факт, что для двух станций на рис. 3а получены очень близкие зависимости (а ведь банки исходных данных совершенно независимы!), также, как представляется, говорит против концепции Q-возмущений. Согласно Mikhailov and Perrone [2009] наиболее вероятным механизмом образования Q-возмущений является метеорологическое влияние на ионосферу (coupling from below). Но вероятность того, что эффекты такого влияния для двух ионосферных станций, разнесенных на несколько сотен километров и расположенных на территории с разной орографией, будут так близки друг к другу, очень мала.

Аналогичная картина наблюдается и для зависимости рассматриваемых событий от местного времени начала последующей магнитной бури SO

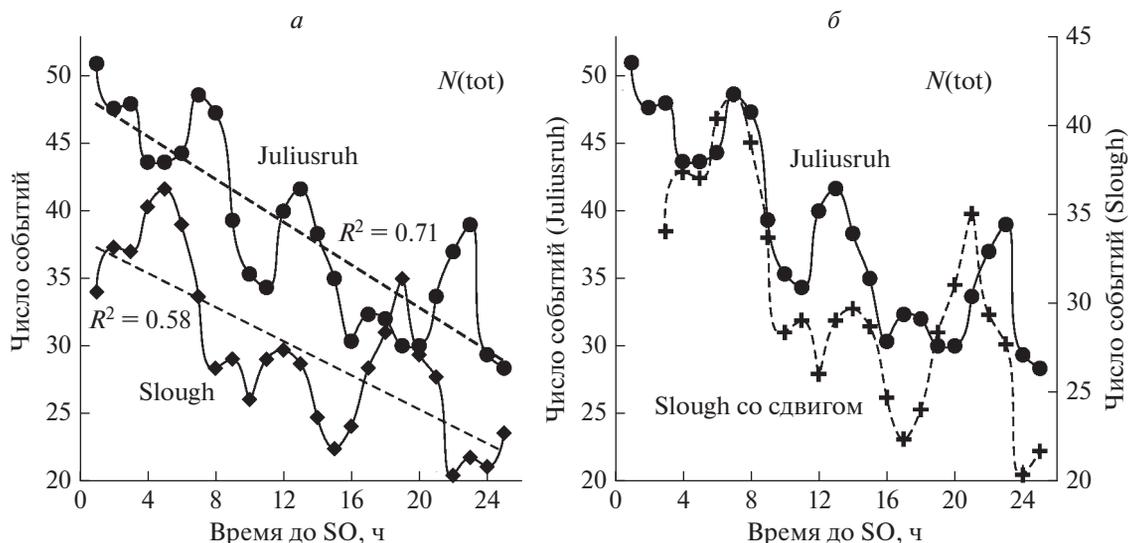


Рис. 3. Зависимость полного числа событий $N(tot)$ от времени события до начала бури SO.

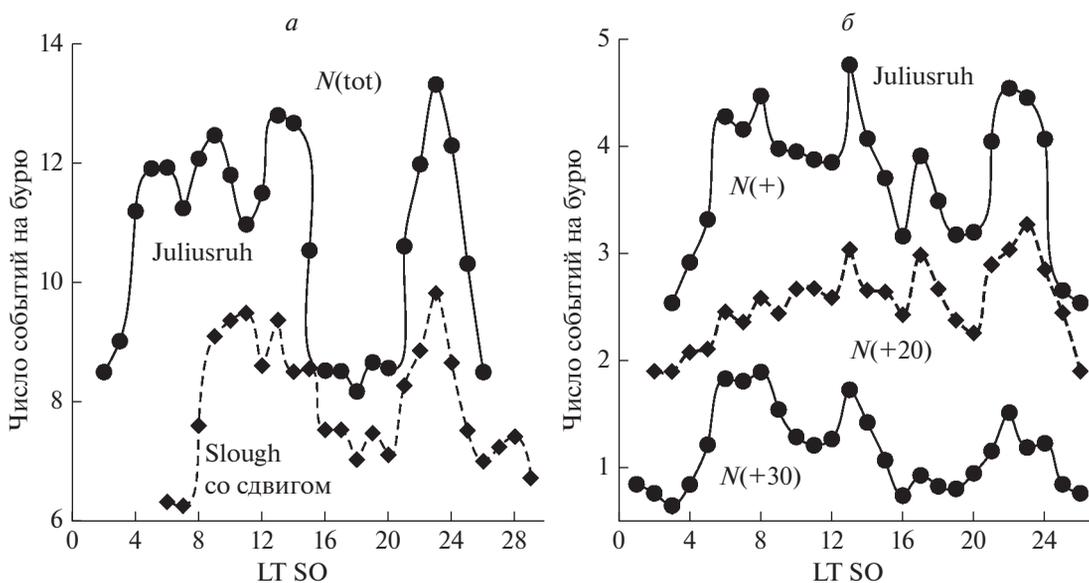


Рис. 4. Зависимость $N(tot)$, $N(+)$, $N(+20)$ и $N(+30)$ от местного времени начала бури SO.

(LT SO). Как следует из взятого из работы Данилова и Константиновой [2021в] рис. 4а, где приведена зависимость $N(tot)$ от LT SO, имеются более благоприятные и менее благоприятные для появления этих событий (отклонений $foF2$) интервалы местного времени, достаточно одинаковые для обеих станций. Например, вероятность появления отклонений $foF2$ достаточно велика в период 5–12 ч, максимальна в 23 ч и минимальна в период 16–20 часов.

Отметим, что данные для ст. Slough нанесены, как и выше на рис. 3а, со сдвигом в два часа. Природа указанных сдвигов пока непонятна, но она

может оказаться важной при дальнейшем анализе физических процессов, приводящих к анализируемым отклонениям $foF2$.

На рисунке 4б, также взятом из работы Данилова и Константиновой [2021в], приведено “препарирование” указанной выше зависимости. Приведены кривые для общего числа положительных отклонений $foF2$, а также для положительных отклонений с амплитудой 20–30% $N(+20)$ и больше 30% $N(+30)$. Как и в примере с зависимостью от интенсивности магнитной бури на рис. 2, зависимость от LT SO для $N(+30)$ выражена лучше, чем для $N(+20)$. Как указывают Дани-

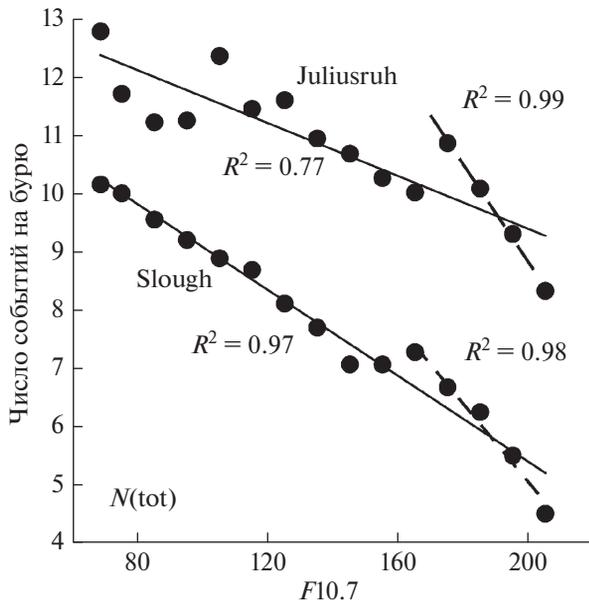


Рис. 5. Зависимость $N(\text{tot})$ от индекса солнечной активности $F10.7$.

лов и Константинова [2021в], это является еще одним подтверждением того, что данные по отклонениям в 20–30% могут быть “загрязнены” случайными (не связанными с предстоящей бурей) событиями. Такими событиями как раз и могут быть Q-возмущения.

В рассматриваемой серии работ Данилова и Константиновой была проанализирована зависимость параметров анализируемых событий (отклонений $foF2$ от спокойных значений) от солнечной активности. В качестве характеристики этой активности использовались среднемесячные значения наиболее часто используемого индекса $F10.7$.

Как видно из рис. 5 (из работы Данилова и Константиновой [2021б]), по данным обеих станций наблюдается хорошо выраженная и статистически значимая зависимость от солнечной активности. Вероятность появления анализируемых событий (отклонений $foF2$) наиболее высока при низкой активности и падает с ее ростом. Как и в случае зависимости от Dst (рис. 1) несколько точек при высоких $F10.7$ дают особенно хорошо выраженную зависимость.

Представляется, что в рамках концепции предвестников подобная зависимость может быть объяснена в рамках простого предположения. Хорошо известно, что критическая частота $foF2$ сильно зависит от солнечной активности — она минимальна при низкой активности и максимальна при высокой. Если абсолютная величина возмущений $foF2$, которые являются “предчувствием” магнитной бури, зависит главным обра-

зом от интенсивности предстоящей бури, очевидно, что эти возмущения будут лучше заметны на фоне низких спокойных величин $foF2$ (т.е. в период низкой солнечной активности), чем на фоне высоких величин в период высокой активности. Это объяснение представляется как простым, так и достаточно наглядным. И оно “льет воду” на концепцию предвестников.

Неясно, есть ли такое же простое и наглядное объяснение зависимости от солнечной активности Q-возмущений. Влияние на ионосферу снизу, которое упоминается как главный источник Q-возмущений в работе Mikhailov and Perrone [2009], вряд ли связано с солнечной активностью. Оно контролируется в основном метеорологическими процессами в тропосфере и динамическими процессами (ветрами) в средней атмосфере, которые определяют распространение вверх атмосферных волн.

В более поздней работе Mikhailov and Perrone [2020] кратко упоминаются другие (помимо метеорологического влияния) механизмы возможного формирования Q-возмущений. Эти механизмы затрагивают сложную систему процессов магнитосферно-ионосферного взаимодействия (потоки плазмы из плазмасферы, изменение направления меридионального ветра в термосфере). Остается неясным, действительно ли эти механизмы должны ослабевать с усилением солнечной активности. Скорее наоборот: считается общепринятым, что магнитосферно-ионосферное взаимодействие наиболее сильно проявляется именно в периоды высокой солнечной активности.

2.3. Некоторые результаты работ последних лет

В течение времени, прошедшего после обзоров Данилова и Константиновой [2019] и Danilov and Konstantinova [2019] появилось несколько публикаций, имеющих прямое отношение к обсуждаемой в данной работе проблеме. Ниже рассматриваются четыре из этих работ и кратко описываются полученные в них результаты.

В статье большой группы авторов [Mosna et al., 2020] подробно исследовалось поведение ионосферы во время магнитной бури 8 сентября 2017 г. по наблюдениям методами ВЗ (ст. Pruhonice) и НЗ (сеть трасс). Хотя основной акцент в работе сделан на анализ динамических процессов непосредственно в дни магнитной бури, авторы упоминают и состояние ионосферы до начала бури (6 и 7 сентября). Авторы отмечают, что во второй половине 6 сентября и днем 7 сентября наблюдались увеличения $foF2$ по сравнению со спокойной медианой для ст. Pruhonice. На рис. 4 в указанной работе хорошо видно, что 6 сентября величина $foF2$ на несколько часов поднималась выше 6 МГц и достигала 6.5 МГц, тогда как спокойная медиан-

на составляла 5.5 МГц. 7 сентября превышение наблюдаемых величин $foF2$ (7 МГц и выше) над медианой (5.5 МГц) было еще сильнее и длилось дольше.

Mosna et al. [2020] подчеркивают, что характер изменения $foF2$ был очень близок к характеру изменений ТЕС по наблюдениям на сети трасс в северной части России во время этой же бури. Поскольку широта ст. Pruhonice равна 50° N, а указанные измерения ТЕС проводились в широтном интервале 57° – 67° N, очевидно, что обнаруженные изменения $foF2$ и ТЕС в предбуриевые дни рассмотренной бури охватывали большую территорию. Это является еще одним аргументом против метеорологической природы этих явлений.

В работе Chernigovskaya et al. [2021] рассмотрена реакция ионосферы на две очень сильных магнитных бури. Проанализированы измерения на цепочке станций ВЗ, расположенных на близких широтах, но сильно разнесенных по долготе.

Работа направлена на выяснение долготных эффектов поведения слоя $F2$ во время главной и восстановительной фаз магнитной бури, поэтому предбуриевые дни не рассматриваются. Однако на рисунках приводятся данные как для двух предбуриевых дней (15 и 16 марта 2015 г.) так и для 8 дней после начала бури (до 25 марта). Это позволяет провести оценки отклонений $foF2$ в предбуриевые дни, сравнивая их с 25 марта, когда с большой вероятностью восстановительная фаза бури уже закончилась, и этот день можно считать спокойным в геомагнитном отношении. Так, на рис. 5 в рассматриваемой статье ясно видно, что в долготном интервале 120° – 160° как 15, так и 16 марта есть периоды времени, в течение которых $foF2$ превосходит 10 МГц, тогда как в эти же периоды 25 марта величины $foF2$ составляют 7–8 МГц. Такая же картина наблюдается для ТЕС в долготном интервале 140° – 160° : в первой половине 15 и 16 марта величины ТЕС составляют 24–26 TECU, а в первой половине 25 марта – 18–20 TECU. Из рис. 3 в рассматриваемой работе следует, что дни 15 и 16 марта были абсолютно магнитно спокойными: Dst - и Ap -индексы были близки к нулю, а Kp -индекс не превышал 3+.

Еще более убедительная картина видна на рис. 6. Во всем рассмотренном долготном интервале 0° – 160° в течение ~ 35 ч перед SO магнитной бури в 18 UT 22 июня 2015 г. величины ТЕС много больше, чем 30 июня–2 июля (эти дни можно условно принять в качестве спокойных). Рисунок 3 показывает, что предбуриевые дни 20 и 21 июня были магнитно спокойными.

Swarnalingam et al. [2021] провели детальный анализ поведения ионосферы во время четырех магнитных бурь в июне и июле 2012 г., декабре и марте 2015 г. Анализировался очень большой материал спутниковых и наземных измерений ТЕС

и Ne . Работа была направлена на выявление разницы в реакции ионосферы на магнитные бури в разные сезоны в северном и южном полушариях. Поскольку в статье подробно представлены данные измерений ТЕС и Ne в течение предбуриевых дней и нескольких дней после начала бури, приведенные материалы позволяют сделать некоторые выводы, относящиеся к обсуждаемой в данной статье проблеме.

На верхней панели рис. 4 в указанной статье приведены измеренные абсолютные величины ТЕС в течение трех предбуриевых дней и 6 дней после начала бури 14 июля 2012 г. Хорошо видно, что в течение предбуриевых дней в широтном поясе $\pm(30$ – $40)^\circ$ имеются три интервала времени, когда величина ТЕС составляет 10 TECU (единица измерения ТЕС) и более. В работе не приводятся данные измерений для магнитно спокойных дней, но на шестой день после SO, когда, судя по приведенным на этом же рисунке данным магнитных измерений, восстановительная фаза бури уже давно закончилась, величина ТЕС не превышает 6–7 TECU. Отметим очень важное обстоятельство – в работе приводится изменение в течение анализируемых дней нескольких индексов, характеризующих магнитную активность, и согласно всем этим индексам предбуриевые дни были абсолютно спокойными.

Аналогичная картина наблюдается и для бури 16 июня 2021 г. (рис. 8 в рассматриваемой статье). Здесь величины ТЕС много раз за три предбуриевых дня (абсолютно спокойные согласно многим магнитным индексам) поднимаются значительно выше 10 TECU, тогда как, начиная с третьего дня после SO, величина ТЕС не превышает 4–6 TECU.

Эффект возрастания электронной концентрации в предбуриевый день бури 14 июля 2015 г. можно видеть и на высотных профилях Ne на широте 60° N (верхняя панель рис. 6 указанной статьи). На высотах слоя $F2$ в течение 18 часов до SO величины Ne составляют $(4$ – $5) \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$, тогда как, начиная со второго дня после SO, величина Ne на этих высотах равна $(2$ – $3) \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Обратим внимание на то, что обе рассмотренные бури летние.

Работы Joshua et al. [2021a, b] посвящены исследованию именно предбуриевых эффектов (pre-magnetic storm signatures, PMS). Авторы проанализировали критические частоты слоя $F2$, $foF2$, измеренные на 12 ионосферных станциях, расположенных в широком диапазоне широт и долгот. Были рассмотрены 17 магнитных бурь 2010–2012 гг. Использовался обычный метод пересчета $foF2$ в $NmF2$ и вычисления возмущенных величин $\Delta NmF2$ путем сравнения наблюдаемых в предбуриевые дни значений со значениями в магнитно спокойные дни. При этом в качестве PMS рассматривались только события с $\Delta NmF2$, превышающими по абсолютной величине 44%. Чтобы

избежать влияния предшествующих магнитных возмущений, рассматривалось поведение нескольких магнитных индексов в течение 6 предыдущих дней.

Основные выводы Joshua et al. [2021a] состоят в том, что

1. PMS наблюдаются при спокойном кольцевом токе ($Dst > -25$ нТл).
2. PMS наблюдаются при умеренной авроральной активности ($AE > 100$).
3. PMS наблюдаются при слабой геомагнитной активности ($Ap < 7$; $Kp < 3$).
4. В среднем на экваториальных и низкоширотных станциях отклонения $NmF2$ от спокойных условий сильнее, чем на среднеширотных.

Главный для обсуждаемой в данной работе проблемы результат Joshua et al. [2021a] состоит в том, что явления PMS в ионосфере не являются результатом более ранних геомагнитных бурь, а являются независимыми событиями, которые прокладывают дорогу (pave way) последующей геомагнитной буре.

Joshua et al. [2021a, b] обнаружили, что явления PMS часто наблюдаются при южной компоненте межпланетного магнитного поля и иногда при умеренной авроральной активности. Это, по их мнению, может указывать на то, что эти явления (хотя они и наблюдаются в спокойные в магнитном отношении дни) могут быть связаны с давлением солнечного ветра. А вот метеорологический источник PMS по мнению Joshua et al. [2021a] маловероятен, хотя и не может быть исключен полностью.

Возвращаясь к проблеме PMS как предвестников, Joshua et al. [2021a] высказывают предположение, что комбинация изменений нескольких параметров солнечного ветра, ММП и магнитосферы может приводить к ситуации, когда магнитная буря еще не наступила, а определенные изменения в ионосфере уже наблюдаются, предвещающая магнитную бурю. Авторы полагают, что “PMS, если их правильно понять, весьма вероятно могут служить как указатель (pointer) появления магнитной бури”. Авторы подчеркивают важность этой проблемы с учетом важности предсказания явлений космической погоды и, прежде всего, магнитных бурь.

Возражая выводам Mikhailov and Perrone [2009; 2020], которые объясняют предбуревые эффекты Q-возмущениями, Joshua et al. [2021a] заявляют: “очевидно, что после каждого PMS геомагнитная буря начинается либо немедленно, либо в пределах 24–48 ч”. Понятно, что в случае Q-возмущений это не так.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что проблема поведения параметров ионосферы ($foF2$, $hmF2$, TEC) в дни, предшествующие магнитной буре, представляет большой интерес из-за предполагаемой возможности использовать это поведение для прогнозирования наступления и/или характеристик этой бури.

Имеется большое количество публикаций, посвященных анализу отклонений параметров слоя $F2$ (главным образом $foF2$) и полного содержания электронов TEC в течение двух-трех дней, предшествующих магнитной буре. Подробный анализ этих публикаций был выполнен в обзорных работах Данилова и Константиновой [2019] и Danilov and Konstantinova [2019]. Было показано, что наблюдения различными методами, в разных регионах, для различных бурь, выполненные различными группами исследователей, приводят к одному и тому же выводу: в предбуревые дни наблюдаются существенные отклонения параметров слоя $F2$ и верхней ионосферы от их значений в магнитно спокойные дни. Некоторые авторы высказывают предположение, что указанные отклонения могут рассматриваться как предвестники предстоящей магнитной бури.

Альтернативой концепции предвестников является концепция Q-возмущений, сформулированная и развитая в работах Mikhailov and Perrone [2009, 2020]. Согласно этой концепции, указанные выше возмущения представляют собой проявления ионосферных возмущений, которые время от времени наблюдаются в магнитно спокойных условиях и могут случайным образом попадать и на предбуревые дни, хотя к предстоящей буре никакого отношения не имеют.

Выше подробно рассмотрены указанная концепция Q-возмущений и результаты детального анализа предбуревых эффектов по данным наблюдений нескольких сот бурь на станциях Slough и Juliusruh в серии публикаций Данилова и Константиновой. Основным аргументом против этой концепции является тот факт, что наблюдаются хорошо выраженные и статистически значимые зависимости характеристик отклонений $foF2$ в предбуревой период от параметров предстоящей магнитной бури. Очевидно, что для Q-возмущений такой зависимости быть не может.

Рассмотрены также несколько недавних работ по анализу поведения ионосферы во время магнитных бурь. Показано, что в этих работах можно найти новые примеры значительных возмущений $foF2$ и TEC в предбуревые дни, а также прямые указания на то, что эти возмущения связаны с предстоящей магнитной бурей.

Основным заключением данной работы является то, что на взгляд автора возмущения ионосферных параметров в предбуревой период несомненно связаны с последующей магнитной бурей,

т.е. являются ее предвестниками. Очень вероятно, что их можно будет использовать для прогнозирования наступления и характеристик предстоящей магнитной бури. Поэтому дальнейшее изучение этой проблемы представляется очень важным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Благовещенский Д.В., Калишин А.С. Механизм возрастания критической частоты ионосферы до начала суббури // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 3. С. 213–223. 2009.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 1. Обзор проблемы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 5. С. 594–606. 2019.
- Данилов А.Д., Константинова А.В. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 2. Анализ данных ст. Slough // Геомагнетизм и аэрномия. 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., Морозова Л.Д., Мирмович Э.Г. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 25. № 5. С. 768–772. 1985.
- Константинова А.В., Данилов А.Д. Ионосферные предвестники геомагнитных бурь. 3. Анализ данных ст. Juliusruh // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 61. № 3. С. 341–348. 2021.
- Blagoveshchensky D.V., Sergeeva M.A., Kozlovsky A. Ionospheric parameters as the precursors of disturbed geomagnetic conditions // Adv. Space Res. V. 60. № 11. P. 2437–2451. 2017.
- Buresova D., Laštovička J. Pre-storm enhancements of foF2 above Europe // Adv. Space Res. V. 39. P. 1298–1303. 2007.
- Buresova D., Laštovička J. Pre-storm electron density enhancements at middle latitudes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 70. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.014>
- Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S. et al. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations // Adv. Space Res. V. 67. № 2. P. 772–776. 2021.
- Danilov A.D., Belik L.D. Thermospheric composition and the positive phase of an ionospheric storm // Adv. Space Res. V. 12. N 10. P. 257–260. 1992.
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Behavior of the ionospheric F region prior to geomagnetic storms // Adv. Space Res. V. 64. P. 1375–1387. 2019.
- Danilov A.D., Konstantinova A.V. Behavior of foF2 prior to geomagnetic storms according to Slough and Juliusruh data // Adv. Space Res. V. 67. № 12. P. 4066–4077. 2021.
- Joshua B.W., Adeniyi J.O., Amory-Mazaudier C., Adebisi S.J. On the pre-magnetic storm signatures in NmF2 in some equatorial, low and mid-latitude stations // J. Geophys. Res.—Space. V. 126. № 8. P. 137–146. 2021a.
- Joshua B.W., Adeniyi J.O., Olawepo A.O. et al. Latitudinal dependence of ionospheric responses to some geomagnetic storms during low solar activity // Geomagn. Aeron. V. 61. № 3. P. 418–437. 2021b.
- Kane R.P. Storm-time variations of F2 // Ann. Geophysicae. V. 29. № 1. P. 25–42. 1973a.
- Kane R.P. Global evolution of F2-region storms // J. Atmos. Terr. Phys. V. 35. P. 1953–1966. 1973b.
- Kane R.P. Global evolution of the ionospheric electron content during some geomagnetic storms // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. P. 601–611. 1975.
- Mikhailov A.V., L. Perrone L. Pre-storm NmF2 enhancements at middle latitudes: Delusion or reality? // Ann. Geophysicae. V. 27. № 3. P. 1321–1330. 2009.
- Mikhailov A.V., Perrone L. Pre-storm F2-layer Q-disturbances at middle latitudes: Do they exist? // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105473>
- Mikhailov A.V., Depueva A.Kh., Leschinskaya T.Yu. Morphology of quiet time F2-layer disturbances: High and lower latitudes // Int. J. Geomag. Aeron. V. 5. P. 1–14. GI1006. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003GI000058>
- Mosna Z., Kouba D., Knizova P.K. et al. Ionospheric storm of September 2017 observed at ionospheric station Pruhonice, the Czech Republic // Adv. Space Res. V. 65. P. 115–128. 2020.
- Swarnalingam N., Wu D.L., Gopalswamy N. Inter-hemispherical Asymmetries in Ionospheric Electron Density Responses During Geomagnetic Storms – A Study Using Space and Ground Based GNSS-TEC and GNSS-RO Measurements // J. Geophys. Res.—Space. V. 126. P. 137–145. 2021.