
ВОЗДЕЙСТВИЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА НИЖНЮЮ ИОНОСФЕРУ В АВРОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ

IMPACT OF MAGNETIC STORMS ON THE LOWER IONOSPHERE WITHIN THE AURORAL ZONE

Д.В. Благовещенский

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия, donatbl@mail.ru

М.А. Сергеева

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия, maria.a.sergeeva@gmail.com

D.V. Blagoveshchensky

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia, donatbl@mail.ru

M.A. Sergeeva

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia, maria.a.sergeeva@gmail.com

Аннотация. В данной работе исследуется поведение параметров нижней ионосферы, влияющих на распространение декаметровых радиоволн, в периоды магнитных бурь. Рассматривались магнитные бури за пятилетний период (с 2008 по 2012 г.). Основой изучения служили данные вертикального зондирования, данные магнитометра и риометра обсерватории Соданкюля, а также спутниковые данные. Главное внимание было уделено выявлению связи между уровнем поглощения в D-области ионосферы и интенсивностью магнитного поля в бухте возмущения. Обнаружены пороги в уровнях поглощения для случаев, когда при вертикальном зондировании отсутствовали отраженные от ионосферы сигналы. Рассмотрена зависимость предельных частот спорадических E_s-слоев от интенсивности магнитного поля в период протекания магнитной бури. Найдены различия в указанных закономерностях для дневных и ночных условий.

Ключевые слова: поглощение, ионосфера, спорадический слой E_s, D-область, магнитные бури.

Abstract. The results of the paper were based upon data on magnetic storms for a five-year period (2008–2012) such as vertical sounding data, magnetometer and riometer data from the Sodankylä station, and satellite data. The main efforts were directed to reveal the relationship between the level of absorption in the ionospheric D-region and magnetic field intensity in a disturbance bay. We detected thresholds in the level of absorption when ionospherically reflected signals were absent in the vertical sounding. Another task of the study was to reveal the relationship between maximum frequencies of E_s layers and magnetic field intensity for the magnetic storm period. We established differences between the mentioned regularities for daytime and nighttime periods.

Keywords: absorption, ionosphere, D-region, sporadic E_s, magnetic storms.

ВВЕДЕНИЕ

В программах «Космическая погода», «Солнечно-земные связи», CEDAR и других подобных, как известно, большое внимание уделяется вопросам влияния магнитосферных бурь/суббурь на ионосферу Земли. Ранее в работе [Благовещенский, 2011] изучались закономерности вариаций параметров верхней ионосферы во время геомагнитных возмущений типа бурь и суббурь. В настоящем исследовании рассматривается поведение параметров нижней ионосферы, существенно влияющих, в частности, на распространение декаметровых волн, в периоды магнитных бурь. К числу этих параметров относятся поглощение в D-области и спорадические слои в E-области. Анализ проводился на основе данных вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, магнитных и риометрических измерений, полученных в обс. Соданкюля (Финляндия) [www.sgo.fi]. Необходимость комплексного анализа обусловлена недостаточностью статистических и физических

сведений о характере вариаций параметров авроральной ионосферы во время магнитных возмущений, которые часто случаются в высоких широтах.

В работах [Дриацкий, 1974; Hunsucker, Hargreaves, 2003] представлены многолетние исследования характера риометрического поглощения на полярных станциях Арктики и Антарктики. Основные результаты, касающиеся геомагнитных широт, где расположена обс. Соданкюля (64.1°), сводятся к следующему.

1. В отличие от полярных сияний, авроральное поглощение (АА) наблюдается в кольцевой зоне с максимумом на геомагнитной широте 67°. С ростом магнитной активности зона АА смещается к югу.

2. В течение суток АА имеет два максимума — в околополуденное и предполуденное время, минимум в 19–20 ч местного геомагнитного времени (МГВ).

3. Характер АА и геомагнитная возмущенность находятся в сложной взаимосвязи. АА ночью сопровождается отрицательными бухтами магнитного поля. Вечером АА сопровождается положительными

бухтами. В дневное время АА наблюдается преимущественно при спокойном магнитном поле. АА появляются чаще в период фазы восстановления магнитной бури.

4. В ночное время более энергичная часть вторгающихся потоков ответственна за АА, а менее энергичная часть — за появление полярных магнитных возмущений. В дневное время имеют место лишь энергичные потоки, приводящие к АА.

Главное внимание будет уделено сложным взаимосвязям во время магнитных бурь между АА и магнитной активностью. Представляется интересным установить, например, зависимость уровня поглощения (в дБ) от интенсивности магнитного поля (X -компоненты) в ночных и дневных условиях. Другой интересный вопрос — каковы пороги поглощения, после которых E_s - и F2-отражения при ВЗ ионосферы исчезают и отсутствуют полностью. Анализ поведения уровня поглощения во время магнитных бурь проводился с привлечением спутниковых данных.

Известно, что для высоких широт характерно частое появление спорадических слоев E_s , особенно в ночные часы зимнего периода. Изучению поведения E_s -слоев в высоких широтах посвящен ряд работ [Разуваев, 1991; Hunsucker, Hargreaves, 2003; Hunsucker et al., 1996; Pirog et al., 2000; Rodger et al., 1983]. В них рассмотрен широкий спектр вопросов — от морфологической картины образования слоев E_s , их структуры, основных параметров и до статистических особенностей появления в различных условиях. Однако поведение E_s -слоев в периоды магнитных бурь изучено явно недостаточно, остается еще ряд нерешенных вопросов, например, как изменяются значения максимальных частот f_oE_s в зависимости от интенсивности магнитного поля в бухте возмущения соответственно в ночных и дневных условиях. Этот вопрос также будет затронут в настоящей работе.

ПОГЛОЩЕНИЕ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Поглощение и магнитная активность

Авроральное поглощение радиоволн в нижней ионосфере, согласно работам [Дриацкий, 1974; Hunsucker, Hargreaves, 2003], является следствием вторжения в верхние слои атмосферы корпускул высоких энергий. За АА, скорее всего, ответственны потоки электронов с энергиями по крайней мере $E > 30$ кэВ. Выше 80 км ионизация в атмосфере обусловлена в основном прямыми столкновениями с электронами, а ниже 80 км — рентгеновскими лучами, хотя потоки электронов с энергиями от 100 кэВ до 3 МэВ также могут проникать на высоты 50–80 км. В дневное время поток электронов, вызывающий АА, имеет большую жесткость, чем ночью.

При рассмотрении эффектов воздействия магнитных бурь на ионосферу, несомненно, интересно сопоставить в одной географической точке (обс. Соданкюля) риометрические данные по поглощению и магнитные данные за период протекания магнитных бурь. Дело в том, что большинство исполь-

зуемых магнитных индексов, таких как ΣK_p , AE , D_{st} , имеют усредненный характер. Усреднение производится по совокупности станций. В этом случае значения индексов в заданный момент времени могут заметно отличаться от непосредственного значения магнитного поля в отдельно взятой точке.

Анализировались магнитные бури за период с 2008 по 2012 г. включительно, характеризуемые $\Sigma K_p \geq 21$, поскольку при меньших значениях ΣK_p поглощение может быть весьма мало. Общее число бурь составило 88, из них в 2008 г. наблюдалась 21 буря, в 2009 г. имели место 7, 2010 г. — 12, 2011 г. — 20 и 2012 г. — 28 бурь. Видно, что 2009 г. был годом минимальной геомагнитной активности, а 2012 г. — максимальной. Продолжительность бурь лежала в пределах от 1 до 13 дней. Все магнитные бури подразделялись на ночные и дневные возмущения. Число дней, в которые наблюдались возмущения, составило 187 (78 %) для ночных возмущений и 53 (22 %) для дневных. Данные результаты подтверждают общеизвестный факт, что магнитосферная буря, как правило, представляет собой ночное явление.

На рис. 1, а, б представлены графики изменения уровня поглощения по риометру в ночные и дневные часы в зависимости от интенсивности X -компоненты геомагнитного поля по магнитометру обс. Соданкюля для магнитных бурь за весь исследуемый период 2008–2012 гг. Следует заметить, что предварительно подобные графики строились по каждому году отдельно с целью выявить отличия, но таковых не оказалось. Поэтому был построен общий усредненный график по 187 дням. Для рис. 1, а, б тренды (полученные с помощью Matlab) показаны только для того, чтобы продемонстрировать нелинейность процесса. Например, для ночных условий при подборе линии тренда был найден полином $f(x) = 0.1765x^{0.4136}$, для дневных — $f(x) = 0.4235x^{0.316}$. Во-первых, можно видеть (рис. 1, а), что после значения магнитного поля ~150–200 нТл наблюдается близкое к насыщению поведение кривой, т. е. заметный рост интенсивности магнитного поля сопровождается незначительным ростом поглощения. Во-вторых, имеет место существенный разброс значений поглощения относительно тренда (сплошной кривой). Можно предположить, что это связано с различием в параметрах магнитных бурь, например, бури одинаковой интенсивности могут различаться по другим параметрам (продолжительности, характеру потоков, их вызывающих, и т. п.). Аналогичный график для дневных бурь (рис. 1, б) построен по 53 дням. Хотя здесь общая тенденция в ходе тренда совпадает на рис. 1, а и б, но различия в кривых очевидны. Во-первых, уровень поглощения для кривой рис. 1, б в среднем на 1 дБ выше, чем для кривой на рис. 1, а. Во-вторых, максимальные значения поглощения на рис. 1, а лежат в пределах 6–7 дБ, тогда как для рис. 1, б они лежат в пределах 8–10 дБ. Этого следовало ожидать, поскольку, как указывалось выше, жесткость высыпавшихся потоков днем выше, чем ночью. Повышенный уровень поглощения для дневных бурь, возможно, связан с проникновением потока частиц в магнитосферу Земли в областях переходного слоя и дневного каспа.

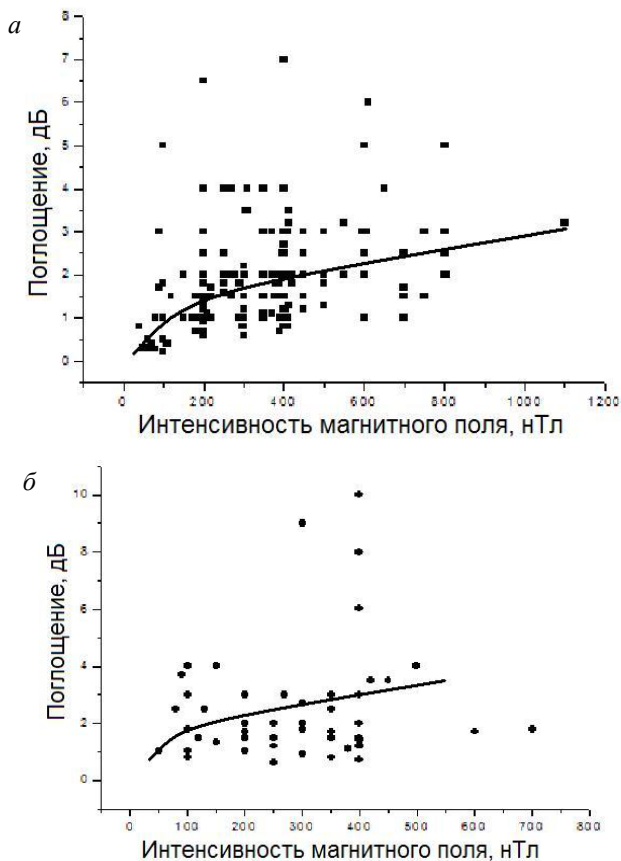


Рис. 1. Зависимость уровня поглощения по риометру от интенсивности X -компоненты геомагнитного поля по магнитометру обс. Соданкюля для магнитосферных бурь за период 2008–2012 гг.: *a* — в ночные часы; *б* — в дневные часы

В дополнение к только что сказанному рассмотрим следующее явление. В процессе обработки данных обнаружены необычные случаи, когда высокий уровень поглощения наблюдается на фоне очень слабых изменений магнитного поля. На рис. 2 показано подобное поведение. Так, на рис. 2, *a* X -компонента магнитного поля с 04:00 до 14:00 UT меняется в пределах ± 50 нТл, что позволяет рассматривать эти изменения как спокойный фон. Однако в указанные часы $K_p=4\div 3-$ и отмечается весьма высокий уровень поглощения, достигающий ~ 8 дБ в промежутке с 07:00 до 08:00 UT. Аналогичную картину можно видеть на рис. 2, *б*: магнитное поле в интервале с 10:00 до 15:00 UT также изменяется в пределах ± 50 нТл, что можно принять за приблизительно спокойные условия. При этом уровень поглощения с 10:00 до 15:00 UT повышен и, в частности, в интервале с 13:00 до 14:00 UT достигает 3 дБ. Согласно работе [Дриацкий, 1974], с 05 до 20 ч МГВ поглощение иногда наблюдается при очень спокойном магнитном поле, а также при слабых его вариациях или пульсациях. В дневное время энергия электронных потоков, как отмечалось, существенно выше, чем в ночное время. Поглощение энергии частиц таких потоков днем происходит на относительно низких высотах атмосферы, что исключает возникновение токов, ответственных за геомагнитные возмущения. Однако, согласно данному эксперименту, отсутствие магнитных возмущений в

районе обс. Соданкюля вовсе не означает, что их нет к северу и к югу от Соданкюли. Данные магнитометров системы IMAGE показывают, что подобные возмущения существуют, и хотя в Соданкюле вариации магнитного поля и не наблюдаются, они тем не менее присутствуют рядом, что в итоге дает значения K_p порядка 3–4. Например, для рис. 2, *a* перепад магнитного поля с 06:00 до 07:00 UT по данным обс. Соданкюля составляет порядка 100 нТл, тогда как для более северной ст. Тромсё аналогичный перепад составляет 250 нТл. Последнее значение уже нельзя рассматривать как спокойный фон.

Спутниковые данные

Для полноты анализа сравним данные обс. Соданкюля по поглощению со спутниковыми данными по X -лучам (рентген), выпадениям протонов и электронов во время магнитных бурь. Из спутников, данные которых находятся в открытом доступе, наиболее близко к Соданкюле находился GOES-13 [<http://ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html>]. Поскольку интенсивные бури имеют глобальное проявление, то сравнение данных GOES-13, находившегося на удалении от Соданкюли (пролет возле Гренландии), с данными этой обсерватории на качественном (но не количественном) уровне может быть полезным. Для примера на рис. 3 представлены данные спутника GOES-13 за октябрь 2010 г. Этот месяц был выбран, потому что в нем имели место две магнитные бури — 10–12 октября и 22–24 октября. Первая буря характеризуется следующими параметрами: 10 октября $\Sigma K_p=6-$ и $AA_{\max}=0.9$ дБ; 11 октября $\Sigma K_p=25+$ и $AA_{\max}=1.5$ дБ; 12 октября $\Sigma K_p=18+$ и $AA_{\max}=1.7$ дБ. Вторая буря является более интенсивной: 22 октября $\Sigma K_p=11-$ и $AA_{\max}=1.1$ дБ, 23-го — $\Sigma K_p=31-$ и $AA_{\max}=3.0$ дБ и 24 октября $\Sigma K_p=25+$ и $AA_{\max}=5.2$ дБ. Таким образом первый день каждой бури является спокойным, второй — максимально возмущенным и третий день характеризуется спадом возмущения. На рис. 3 видно, что 10 октября все параметры потоков по данным GOES-13 остаются без особых изменений, тогда как днем 11 октября наблюдаются всплески в значениях XS (0.05–0.4 нм), уровнях выпадений протонов pV (>1 МэВ) и электронов $e1V$ (>1 МэВ). В это же время наблюдается рост поглощения от 0.3 до 1.5 дБ. Далее 12 октября имеют место существенный рост потоков электронов $e1V$ и $e2V$ и некоторое увеличение потоков лучей XS . Уровень поглощения в этот день увеличен по сравнению с предыдущим. Соответственно 22 октября, в магнитоспокойный день, на рис. 3 можно видеть днем небольшой всплеск XS -лучей и рост потока протонов pV (>1 МэВ). Для протонов поглощение повышается с 0.3 до 1.1 дБ. Следующий день, 23 октября, характеризуется ростом потоков XL (0.1–0.8 нм), XS , протонов pV (>1 МэВ) и электронов. Поглощение в этот день (3 дБ) больше, чем в предыдущий (1.1 дБ). И, наконец, 24 октября происходит резкое увеличение всех рассматриваемых потоков, что сопровождается ростом поглощения до 5.2 дБ. Однако, хотя два следующих дня, 25 и 26 октября характеризуются, высоким уровнем XL - и XS -лучей, имеет место спад протонных выпадений почти

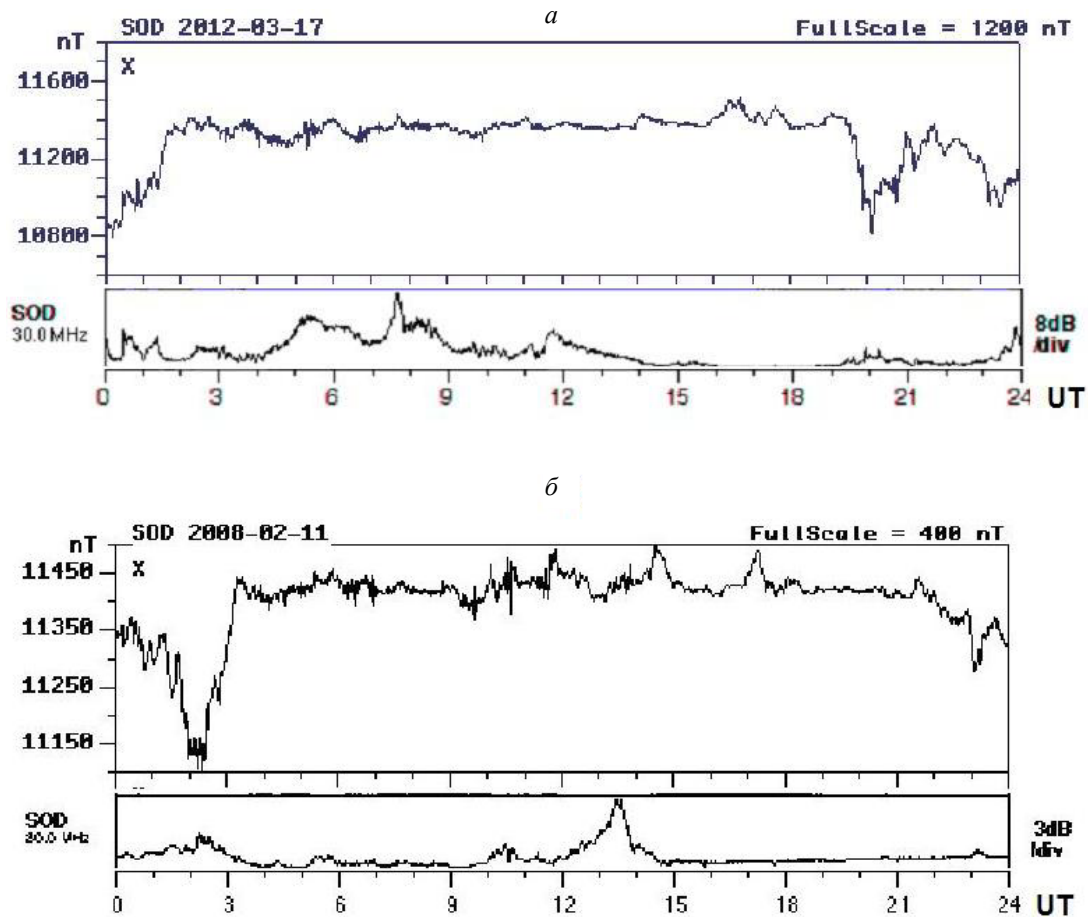


Рис. 2. Вариации магнитного поля и риометрического поглощения по данным obs. Соданкюля за 17.03.2012 г. (а) и 11.02.2008 г. (б)

до спокойного уровня. Уровень поглощения для этих двух дней составляет порядка 1 дБ. Также выяснено, что во время очень мощных магнитных бурь, например 5–7 апреля 2010 г., когда поглощение достигает 4–10 дБ, все потоки, регистрируемые спутником, возрастают на один–три порядка и поэтому крайне интенсивны. Дополнительный анализ других магнитных бурь позволил сделать следующие выводы.

Во-первых, по спутниковым данным практически невозможно выделить агент или совокупность агентов, непосредственно ответственных за поглощение. Например, потоки электронов с энергией >30 кэВ могут включать в себя потоки протонов с энергиями 100 кэВ — 3 МэВ. Но ясно одно: чем больше количество различных потоков и их интенсивность, тем больше рост поглощения.

Во-вторых, подтверждается мнение, изложенное в работе [Дриацкий, 1974], что поглощение чаще встречается на фазе восстановления бури ближе к максимуму, т. е. вторжение частиц, приводящее к АА, происходит почти одновременно с развитием главной фазы бури, но достигает наибольшей интенсивности на протяжении начального отрезка времени фазы восстановления. Скорее всего, менее энергичные частицы вторгаются в ионосферу в период главной фазы бури, а более энергичные — на фазе восстановления. Согласно данным спутника «Эксплорер-14», сначала высypяются электроны с энергией $E > 40$ кэВ, а затем с $E > 1.6$ МэВ.

Случаи отсутствия сигналов при ВЗ

Здесь подразумеваются те пороги в повышенном поглощении, выше которых отраженные от ионосферы сигналы при ВЗ полностью поглощаются во время возмущений и в месте приема отсутствуют как F2-, так и E_s-отражения. Это так называемое событие В (blackout). Например, согласно рис. 4, события В на F-графике для 23 октября 2010 г. имели место в 03:00 и 24:00 UT. Первое событие в 03:00 UT вызвано поглощением величиной ~ 1.3 дБ, которое возникло во время магнитной бухты с интенсивностью ~ 150 нТл (см. рис. 4). Второе событие В в 24:00 UT связано с околополуночной магнитной бухтой возмущения и, как следствие, с поглощением амплитудой ~ 3 дБ. На основе общего анализа, проведенного по совокупности имеющихся в нашем распоряжении данных, была получена весьма неоднозначная картина пороговых значений поглощения. Так, согласно анализу, минимальное поглощение, при котором возникает событие В, составляет 0.8 дБ в дневных условиях и 1 дБ в ночных условиях. В то же время существуют ситуации, когда поглощение достаточно велико, т. е. значительно больше 1 дБ, однако событие В при этом не наблюдается. Так, в дневные часы зафиксировано максимальное значение поглощения 2.8 дБ, но событие В не наблюдалось, для ночных часов аналогичное максимальное значение поглощения составило 3 дБ, но событие В отсутствовало.

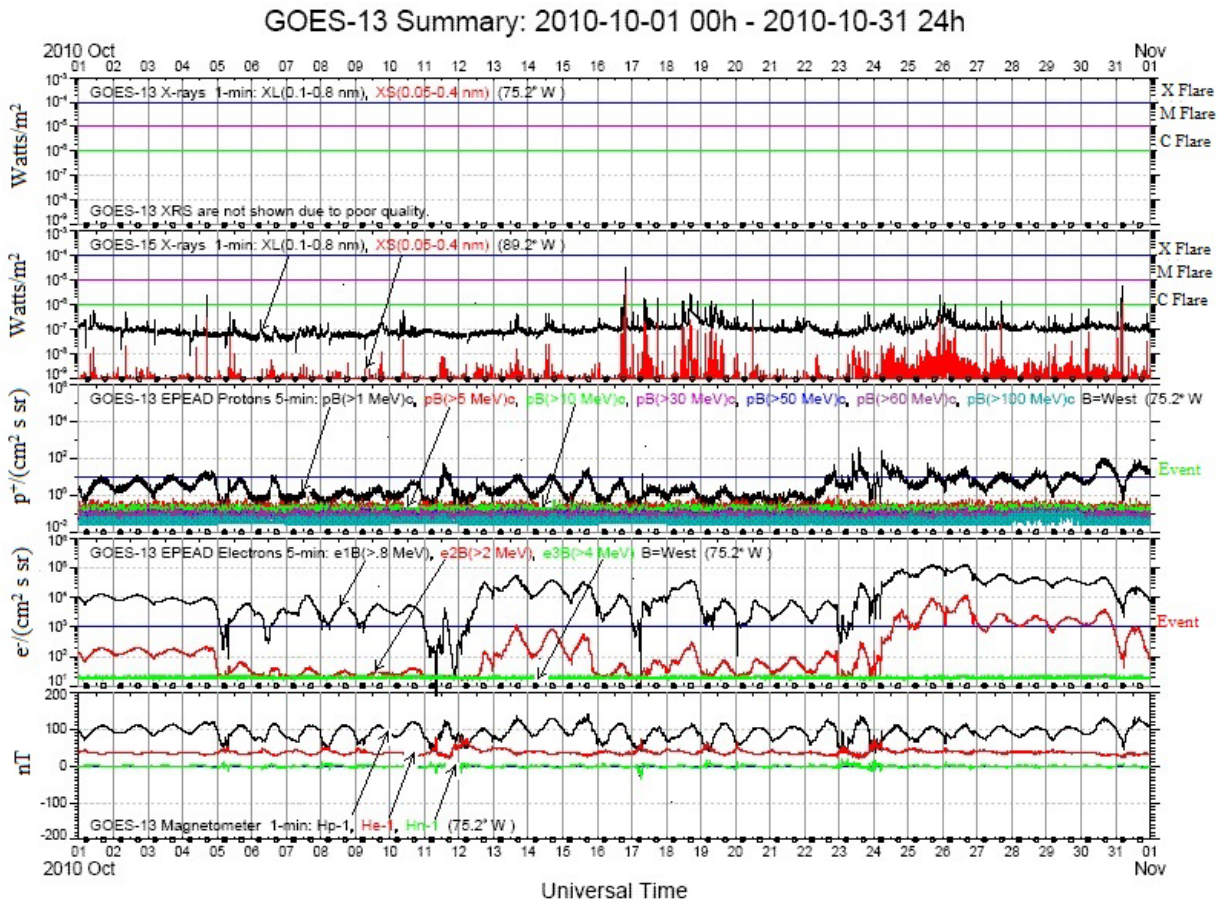


Рис. 3. Данные спутника GOES-13 за октябрь 2010 г. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

Для подобных ситуаций характерно резкое возрастание значений минимальных частот f_{min} , а именно: минимальные частоты достигают значений до 4–6 МГц вместо обычных значений 1–2 МГц в спокойных условиях. Например (рис. 4), в 11:00 UT уровень поглощения составляет 1 дБ, событие В не наблюдается, а значение f_{min} достигает 2.5 МГц, тогда как в 10:00 и 12:00 UT значения f_{min} соответственно равны 1.6 и 0.7 МГц. Следует заметить, что на F-графиках obs. Соданкюля, особенно в интервалы 00:00–06:00 UT и 19:00–21:00 UT, иногда наблюдается отсутствие отражений сигналов, которые можно принять за события В. Однако анализ показал, что подобные пробелы случаются на практически спокойном фоне — без поглощения и вариаций магнитного поля. Следовательно, такие пробелы можно рассматривать как случаи очень «слабой» ионосферы, которая не отражает радиосигнал ионозонда с минимальной частотой (0.5 МГц).

Таким образом, для большинства случаев наблюдений порогом, выше которого возможны события В на F-графиках obs. Соданкюля, является уровень поглощения порядка 1 дБ. Однако события В при этом могут быть, а могут и не быть. По нашим данным, условием, гарантирующим возникновение события В, является уровень поглощения более 3 дБ.

СПОРАДИЧЕСКИЕ Е-СЛОИ

В данном разделе представлен анализ поведения E_s-слоев во время магнитных бурь над obs. Содан-

кюля. Рассматриваются статистические особенности появления E_s-слоев и их характеристик по данным ВЗ ионосферы. Анализ проводился по F-графикам obs. Соданкюля (см. рис. 4). К анализу привлекалась только часть из 88 магнитных бурь, использованных выше. Дело в том, что необходимо было сравнить F-графики для спокойных и возмущенных условий, чтобы выявить изменения, наблюдаемые в ионосфере во время возмущений, относительно спокойного фона. Поэтому для каждой бури выбирались три дня — первый, перед бурей, спокойный день с ΣK_p не более 10, второй день описывал начало бури, и третий день характеризовал максимум ее развития. Последующие дни (четвертый, пятый и т. д.) анализировать нецелесообразно, поскольку, как правило, F-графики для них резко отличаются от F-графиков для спокойных дней и содержат крайне мало информации из-за высокого уровня поглощения. К тому же возмущенные четвертый, пятый и т. д. дни не позволяют выявить устойчивые закономерности в поведении ионосферы. Таким образом, в нашем распоряжении имелось 114 F-графиков, удовлетворяющих поставленным требованиям, что соответствовало 38 магнитным бурям.

Общей особенностью всех спокойных дней перед магнитными бурями, согласно F-графикам, являлось то, что в районе для Соданкюли в дневное время имеют место, как правило, спорадические E_s-образования (треугольники на F-графике), которые экранируют регулярный E-слой. Для ночного времени характерно, что даже очень малая магнитная возмущенность

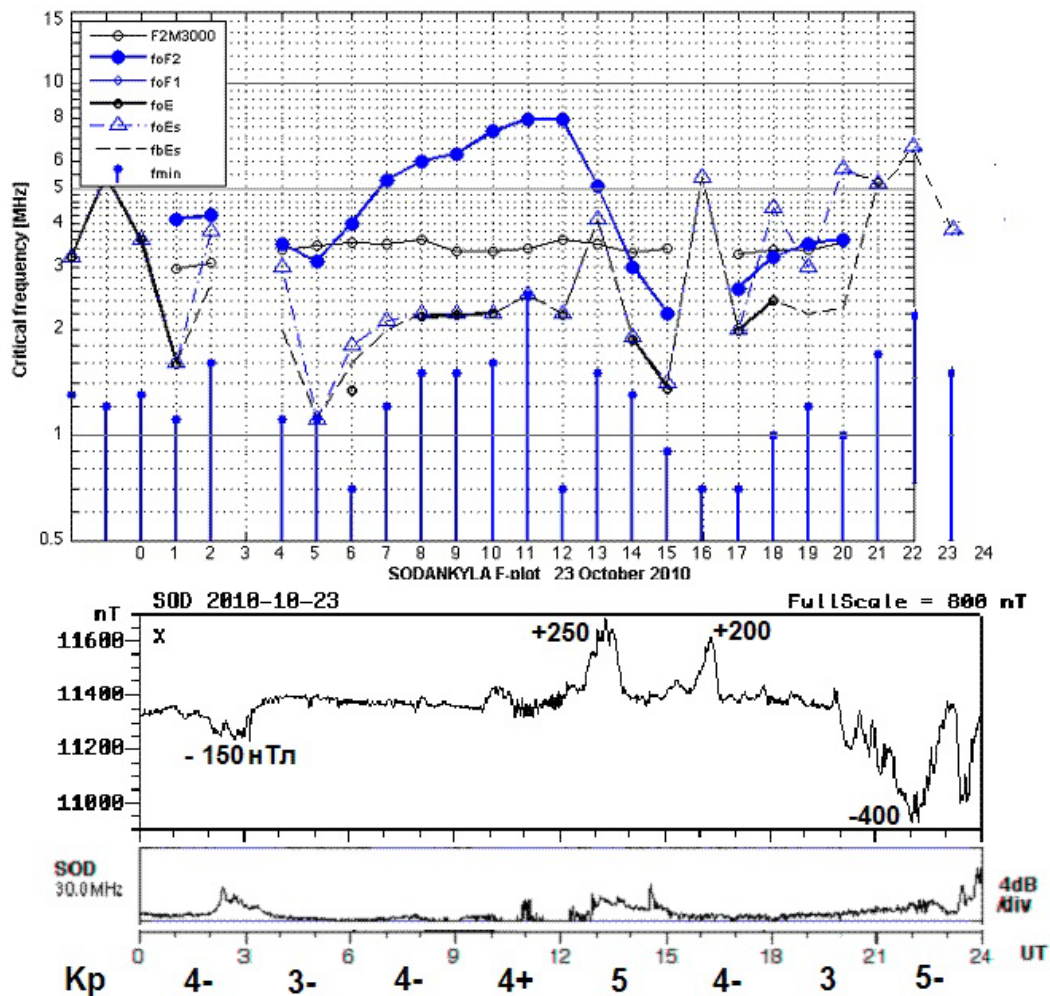


Рис. 4. F-графики, X-компонента магнитного поля и риометрическое поглощение по данным обс. Соданкюля, а также K_p -индекс магнитной активности для 23 октября 2010 г. Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

(K_p от 0+ до 1-) вызывает появление спорадических слоев. Однако значения максимальных частот f_oE_s в этом случае низки и в среднем не превышают 2 МГц.

Для 38 дней с началом магнитной бури (второй день из трех) на F-графиках отмечается ряд закономерностей. Днем в спокойное время значения предельных частот f_oE_s практически совпадают со значениями критических частот регулярного E-слоя (рис. 4). Положительные бухты магнитного поля днем вызывают резкий рост значений f_oE_s . Например, из рис. 4 следует, что бухты в 13:00 и 16:00 UT со значениями +250 и +200 нТл сопровождаются ростом f_oE_s до 4.2 и 5.4 МГц. Эти две бухты привели к резкому спаду значений f_oF2 в интервале 13:00–17:00 UT, чего и следовало ожидать [Благовещенский, 2011]. В 16:00 UT происходит блокировка отражения от F-слоя E_s -слоем. Ночные бухты магнитного поля всегда вызывают образование E_s -слоев с высокими значениями предельных частот. Так, в интервалах 00:00–04:00 UT и 20:00–24:00 UT бухты (соответственно –150 и –400 нТл на рис. 4) вызывают значительный рост значений f_oE_s до 4–6 МГц. Еще один экспериментальный факт — вечером и ночью во время магнитных возмущений иногда наблюдаются повышенные значения f_oF2 , которые в спокойное время отсутствуют. Подобные значения (рис. 4) имеют

место в интервалах 01:00–02:00 и 17:00–20:00 UT. Одна из возможных причин образования повышенных значений f_oF2 перед магнитной бурей — главный эффект в ионосфере во время магнитных возмущений [Благовещенский, 2011]. Он проявляется в том, что критическая частота и высота F-области во время возмущения изменяются следующим специфическим образом. Сначала происходит рост критической частоты перед активной фазой бури/суббури, затем ее спад во время активной фазы и снова рост после активной фазы. Высота F-области, наоборот, увеличивается во время активной фазы и уменьшается после ее окончания [Благовещенский, 2013]. На рис. 4 повышенные значения f_oF2 также наблюдаются в интервале 10:00–12:00 UT, перед возмущением за счет положительных бухт магнитного поля с 13:00 до 17:00 UT.

Во время развитого возмущения (последний день из трех) картина поведения параметров ионосферы на F-графиках сильно искажена. Как отмечалось выше, возросшее поглощение приводит к событиям V, значения f_oF2 низки. Что касается E_s -слоев, то они появляются, как правило, во время магнитных бухт и характеризуются большими значениями предельных частот.

Интересно выяснить зависимость значений f_oE_s от интенсивности магнитного поля в бухте возмуще-

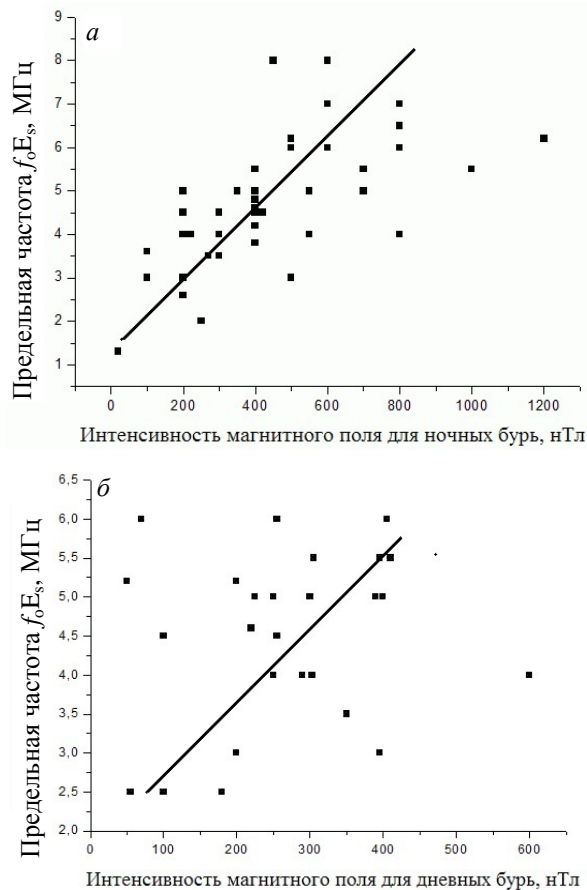


Рис. 5. Зависимость предельных частот f_oE_s от интенсивности магнитного поля по данным обс. Соданкюля для ночных (а) и дневных (б) магнитных бурь

ния ночью и днем. С помощью стандартной техники пакета Matlab, как и выше, был найден полином, описывающий линейные зависимости, представленные на рис. 5, а, б. Коэффициент корреляции данных наблюдений и линейной зависимости составил 0.58 для ночных условий и 0.4 для дневных. Корреляция заметно меньше для дневных условий, чем для ночных. На рис. 5, а, б представлены результаты, полученные по всем F-графикам. Ночью преобладают отрицательные бухты возмущения, а днем — положительные. Из сравнения рисунков можно видеть следующее. Во-первых, разброс значений f_oE_s днем выше, чем ночью. Во-вторых, построенная линия для дневных условий лежит выше аналогичной линии для ночных условий на примерно 0.8 МГц. В общем картина различий напоминает различия в кривых на рис. 1, а, б и, скорее всего, отражает тот факт, что в дневных условиях жесткость высыпавшихся потоков выше, чем ночью. Очевидно, днем следует ожидать более высокую степень ионизации в нижней ионосфере, чем ночью, поэтому дневные значения f_oE_s выше ночных. В-третьих, максимальная интенсивность магнитного поля в бухте возмущения ночью (1200 нТл) в два раза выше, чем днем (600 нТл), поскольку магнитные возмущения чаще возникают в ночных условиях.

Таким образом, из рис. 5, а, б следует, что за период магнитного возмущения типа бури степень ионизации на уровне E-слоя ионосферы значительно выше, чем в спокойных условиях. Аналогичная ситуация, по

данным работы [Благовещенский, 2011], согласно общей физике явлений имеет место также для суббурь.

ВЫВОДЫ

1. Выявлены зависимости изменения уровня поглощения по риометру в ночные и дневные часы от интенсивности X-компоненты геомагнитного поля по магнитометру обс. Соданкюля для магнитных бурь за весь исследуемый период 2008–2012 гг.

1.1. Получено, что, во-первых, линейная связь между уровнем поглощения и интенсивностью X-компоненты отсутствует. Во-вторых, имеет место существенный разброс значений поглощения относительно построенной сплошной кривой. Можно предположить, что это связано с различием в параметрах магнитных бурь. Имеются различия в кривых для дня и ночи. Это объясняется тем, что жесткость высыпавшихся потоков днем выше, чем ночью. Обнаружены необычные случаи, когда уровень поглощения достигает больших значений на фоне очень слабых изменений магнитного поля.

1.2. Сопоставление данных обс. Соданкюля по поглощению с данными спутника GOES-13 по X-лучам, высыпаниям протонов и электронов во время магнитных бурь показало следующее. Во-первых, по спутниковым данным практически невозможно выделить агент или совокупность агентов, непосредственно ответственных за поглощение, однако понятно, что рост поглощения тем больше, чем больше количество различных потоков и их интенсивность. Во-вторых, поглощение чаще встречается на фазе восстановления бури ближе к максимуму, т. е. вторжение частиц, приводящее к АА, происходит почти одновременно с развитием главной фазы бури, но достигает наибольшей величины на протяжении начального отрезка времени фазы восстановления.

1.3. Обнаружены пороги в повышенном поглощении, выше которых отраженные от ионосферы ВЗ-сигналы полностью поглощаются во время возмущений и в месте приема отсутствуют как F2-, так и E_s-отражения. Это так называемое событие В (blackout). Для большинства случаев наблюдений порогом, выше которого возможны события В, на F-графиках обс. Соданкюля является уровень поглощения порядка 1 дБ. Однако события В при этом могут быть, а могут и не быть. По нашим данным, условием, гарантирующим возникновение события В, является уровень поглощения более 3 дБ.

2. Изучено поведение спорадических E-слоев во время магнитных бурь над обс. Соданкюля. Рассмотрены статистические особенности появления E_s-слоев и их характеристик по данным ВЗ ионосферы.

2.1. Общей особенностью спокойных дней перед магнитными бурями согласно F-графикам являлось то, что для Соданкюля в дневное время имеют место, как правило, E_s-образования, экранирующие регулярный E-слой. В ночное время характерно, что даже очень слабая магнитная возмущенность (K_p от 0+ до 1-) вызывает появление спорадических слоев. Однако значения предельных частот f_oE_s здесь низки и в среднем не превышают 2 МГц.

2.2. С развитием бури бухты магнитного поля днем и ночью вызывают образование E_s -слоев с высокими значениями предельных частот. Во время развитого возмущения возросшее поглощение приводит к событиям В, E_s -слои появляются, как правило, во время магнитных бухт и характеризуются большими значениями предельных частот.

2.3. Построены зависимости значений f_oE_s от интенсивности магнитного поля в бухте возмущения ночью и днем. Ночью преобладают отрицательные бухты возмущения, а днем — положительные. Установлено, что зависимость значений f_oE_s от интенсивности магнитного поля (X -компоненты) в бухте возмущения линейная. Имеются различия в дневных и ночных данных. Во-первых, разброс значений f_oE_s днем выше, чем ночью. Во-вторых, сплошная линия для дневных условий лежит выше аналогичной линии для ночных условий примерно на 0.8 МГц. Это, скорее всего, вызвано тем, что жесткость высыпающихся потоков в дневных условиях выше, чем в ночных. Поэтому днем следует ожидать более высокую степень ионизации в нижней ионосфере по сравнению с ночью.

Авторы выражают глубокую признательность службам obs. Соданколя за возможность использования интернет-данных наблюдений.

Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-05-00856.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Благовещенский Д.В. Короткие волны в аномальных радиоканалах. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co., 2011. 422 с.

Благовещенский Д.В. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на ионосферу. Ч. 1. (обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. 2013. Т. 53, № 3. С. 291–307.

Дриацкий В.М. Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере высоких широт. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 224 с.

Разуваев О.И. Спорадическая ионизация в высокоширотных геофизических исследованиях // Исслед. по геомагнетизму, аэрномии и физике Солнца. М.: Наука, 1991. Вып. 93. С. 3–16.

Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. Cambridge University Press, 2003. P. 477–482.

Hunsucker R.D., Rose R.B., Adler R.W., Lott G.K. Auroral-E mode oblique HF propagation and its dependence on auroral oval position // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1996. V. 44, N 3. P. 383–388.

Pirog O.M., Urbanovich V.D., Zherebtsov G.A. Effects of substorms in the night auroral E-region // 5th International Conference on Substorms: Abstr. St.-Petersburg, 2000. P. 545–547.

Rodger A.S., Morrell C., Dudley J.R. Studies of sporadic E (Es) associated with the main ionospheric trough // Radio Sci. 1983. V. 18, N 6. P. 937–946.

REFERENCES

Blagoveshchensky D.V. *Korotkie volny v anomal'nyh radiokanalakh* [Short waves in the anomalous radio channels]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co., 2011, 422 p. (in Russian).

Blagoveshchenskii D.V. Effects of geomagnetic storms (substorms) on the ionosphere: 1. A review. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2013, vol. 53, no. 3, pp. 275–290.

Driatsky V.M., *Priroda anomal'nogo pogloshcheniya kosmicheskogo radioizlucheniya v nizhnei ionosfere vysokih shirot* [The nature of anomalous absorption of cosmic radiation in the lower ionosphere at high latitudes], Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1974, 224 p. (in Russian).

Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. *The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation*. Cambridge University Press, 2003, pp. 477–482.

Hunsucker R.D., Rose R.B., Adler R.W., Lott G.K. Auroral-E mode oblique HF propagation and its dependence on auroral oval position. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1996, vol. 44, no. 3, pp. 383–388.

Pirog O.M., Urbanovich V.D., Zherebtsov G.A. Effects of substorms in the night auroral E-region. *5th International Conference on Substorms: Abstr.* St.-Petersburg, 2000, pp. 545–547.

Razuvaev O.I. Sporadic ionization in high-latitude geophysical studies. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics Research], Moscow, Nauka Publ., 1991, iss. 93, pp. 3–16 (in Russian).

Rodger A.S., Morrell C., Dudley J.R. Studies of sporadic E (Es) associated with the main ionospheric trough. *Radio Sci.* 1983, vol. 18, no. 6, pp. 937–946.