

УДК 523.9-7 + 537.877 + 551.510.535

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЙ СОЛНЦА НА ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ И ДРУГИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОСФЕРАХ.

ЧАСТЬ I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Ю.А. Корсунская

В работе выполнен анализ данных по потокам жесткого рентгеновского и гамма-излучений Солнца, измеренных на спутниках GOES и RHESSI, а также данных о распространении радиоволн в СДВ и КВ диапазонов. Проведен их сравнительный анализ и сделано заключение о сильном влиянии жесткой части солнечного спектра, относящейся к области энергий квантов более 10кэВ, на формирование ионосферы Земли.

Введение

Согласно устоявшимся представлениям основной вклад в создание ионосферы Земли вносит электромагнитное излучение Солнца, относящееся к диапазонам ультрафиолета и рентгена с энергиями квантов от 9,6 эВ до ~10 кэВ. Эта часть излучения формирует ионосферу выше ~60 км на дневной части Земли. В ночном секторе основным источником является рассеянное геокоороной излучение линии Лайманальфа (L_{α}) 10,2 эВ (1216Å), а также нескольких линий в солнечном спектре, относящихся к области ультрафиолета. Корпускулярное излучение Солнца, взаимодействуя с магнитным полем Земли, оказывает влияние на ионосферу в области полярных овалов и проявляется в виде магнитных бурь. Очень жесткие корпускулярные частицы, относящиеся к категории солнечных космических лучей (энергии более 1 ГэВ), а также галактические космические лучи ответственны за ионизацию атмосферы ниже 60 км.

Электромагнитная часть излучения Солнца генерируется в его атмосфере, состоящей из фотосферы, хромосферы и короны. Указанная выше часть рентгена и очень жесткий ультрафиолет генерируются в короне. Генерация излучения с меньшей энергией квантов происходит и в других областях атмосферы Солнца. Так, поток, соответствующий линии L_{α} , складывается как из непрерывного излучения коронарной области, так и собственно излучения возбужденного атомарного нейтрального водорода, который сосредоточен в фотосфере и нижней хромосфере.

На сегодняшний день основным источником информации о потоках мягкого рентгеновского излучения Солнца являются спутники серии GOES, расположенные на геостационарной орбите. Информация выдается в виде интегральных энер-

гетических значений потоков в двух интервалах: длинноволновом – XL 0,1–0,8 нм (1,5–12,4 кэВ) и коротковолновом – XS 0,05–0,4 нм (3–24,8 кэВ). Данные доступны в режиме реального времени в графическом виде на сайте [SWPC], а с задержкой на сутки – в цифровом виде на [GOES]. Помимо этого там имеется информация о корпускулярных частицах, магнитном поле и др. В архиве представлены данные с 1974 г. С 2006 г. на спутниках измеряется также ультрафиолет в пяти каналах, однако корректными являются три. Эти данные также доступны в цифровом виде в архиве с 2006 г. до мая–октября 2014 г. Более поздние данные имеются только в графическом варианте. Дополнительная информация об ультрафиолетовом излучении может быть получена на сайте [LISIRD].

Коронарное излучение неустойчиво, поэтому возникают события, называемые солнечными рентгеновскими вспышками. Вспышки длятся от нескольких минут до нескольких часов. Разработанный принцип их систематизации основан на величине потока в канале XL. Событие, в котором максимум потока, усредненного по 1 мин, достигает 10^{-4} Вт/м², относится к классу X и является самым высоким. Ниже располагаются классы M, C, B и A, на каждый из которых отведен один порядок величины потока. К вспышкам относят события, сопровождающиеся достаточно быстрым увеличением потока. Как следует из спутниковых данных, его максимальное изменение не превышает 10^3 по отношению к фону, на котором шло развитие события. Вспышки вызывают увеличение потока ультрафиолета только при классах X или M. Значительные вариации потока в канале XS наблюдаются как во время вспышек, так и без них. Хотя во всех случаях (другого не зарегистрировано) его величина ниже величины потока в канале XL. Их отношение, которое отражает жесткость спектра (чем отношение больше, тем жестче спектр) [Culhane and Acton, 1970], может варьироваться от 10^{-3} до $\sim 0,5$. При этом большие значения достигаются на начальной фазе развития вспышки.

Традиционным источником информации о состоянии ионосферы являются радиоволны, излучаемые как специально для получения этой информации (вертикальные и наклонные ионозонды), так и те, что используются в целях радиовещания. К последней группе относятся сигналы спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС. Их обработка позволяет получить характеристику, которая называется полное электронное содержание и используется далее, в том числе, при томографировании ионосферы. В то же время, большой объем информации о нижней ионосфере, относящейся к E- и D-слоям, может быть получен из сигналов низкочастотного диапазона (СДВ–ДВ). О процессах в атмосфере и ионосфере говорят данные магнетометров, а также измерения в оптическом и инфракрасном диапазонах, проводимые как на земле, так и на спутниках. Многие из этих данных доступны в интернете.

Последние годы сбор статистической информации об ионосфере ведется большей частью путем уязывания радиофизических событий и классов вспышек. В то же время, большое разнообразие откликов измеряемых величин на, казалось бы, однотипные возмущения, идущие от Солнца, говорит о недостаточности этого критерия и необходимости поиска реальных причин столь сильных различий. Таким неучтенным источником может быть электромагнитное излучение Солнца, относящееся к диапазону жесткого рентгена и γ -излучения. Исследование этого диапазона было начато еще в 1980-е годы спутником SMM, продолжено в 1990-е спутником CGRO, каждый из которых функционировал по 9 лет. С 2002 года и по настоящее время на околоземной орбите находится и функционирует спутник RHESSI. Все они относятся к ведению США. В середине 1990-х действовали два российских спутника серии КОРОНАС. Третий спутник этой серии был запущен в феврале 2009

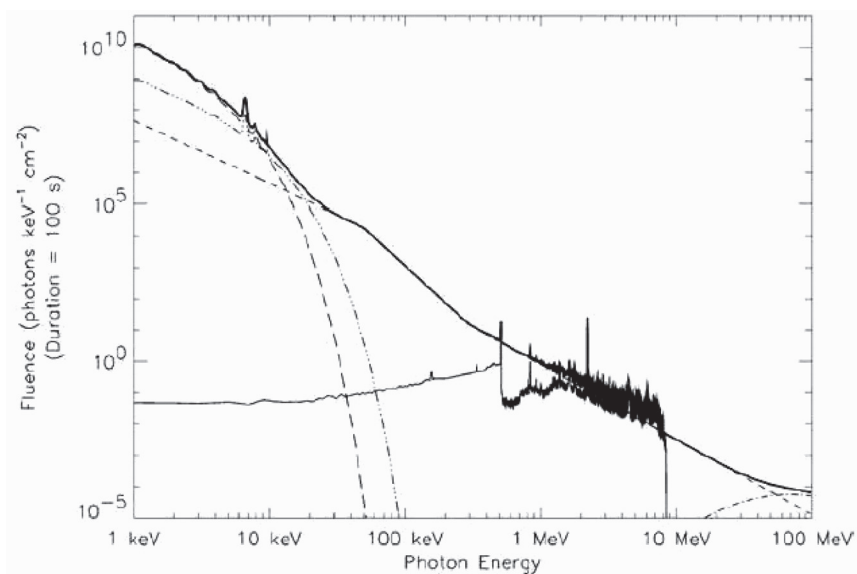


Рис. 1. Спектр излучения Солнца в области энергий квантов более 1 кэВ.
Оси: абсцисс – энергия фотона в кэВ (keV) или МэВ (MeV); ординат – спектральная плотность потока фотонов в кэВ⁻¹·см⁻² за 100 с

года и приурочен к началу 24-ого солнечного цикла, однако, по техническим причинам, не связанным с научной аппаратурой, его миссия завершилась осенью того же года [Котов, 2010].

К началу 2000-х годов стало ясно, что спектр излучения Солнца складывается за счет процессов, происходящих в разных его частях, и имеет вид, представленный на рис. 1, который взят из работы [Lin et al., 2002]. Низкоэнергетическая часть (до ~20 кэВ) определяется квазitemпературным коронарным излучением, которое представлено двумя пунктирными линиями, соответствующими температурам $\sim 10^7$ К и $\sim 3 \cdot 10^7$ К. В диапазоне единиц МэВ большой вклад дают ядерные линии. На графике также виден максимум на 511 кэВ, определяемый аннигиляцией позитрона. В области десятков МэВ основным становится излучение, вызванное π -мезонным распадом. В то же время, весь энергетический интервал перекрывает тормозное излучение фотосферы, изображенное на графике в виде трех отрезков прямых. Хотя приведенный спектр ограничен значением 100 МэВ, спутник КОРОНАС-ФОТОН регистрировал кванты вплоть до 300 МэВ. В настоящее время единственным источником информации о потоках жесткого солнечного излучения является спутник RHESSI. Он имеет аппаратуру, позволяющую отслеживать потоки в диапазоне 3 кэВ–17 МэВ, разделенном на 9 интервалов. Сбор данных производится в интересах задач физики Солнца и, хотя они в полном объеме находятся в свободном доступе [RHESSI], не имеют столь удобного вида как данные GOES.

Настоящая статья посвящена анализу экспериментальных данных и обоснованию необходимости создания физико-математической вычислительной модели расчета воздействия жесткого электромагнитного излучения Солнца на ионосферу Земли.

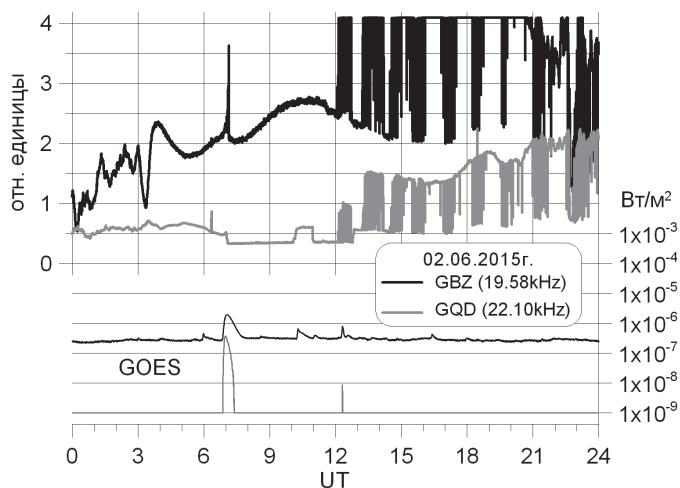
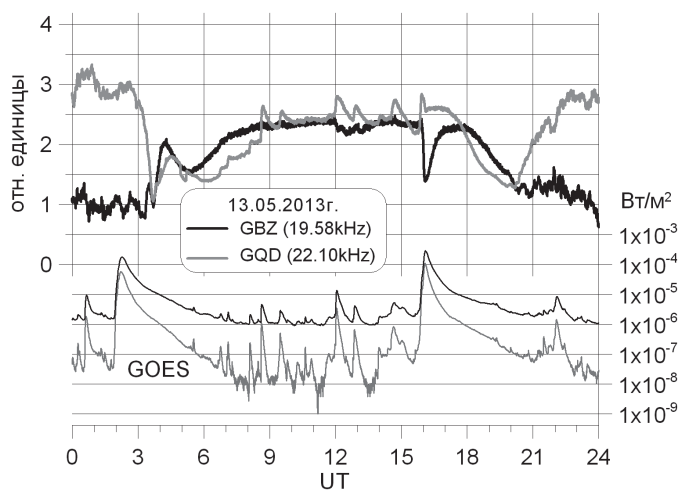
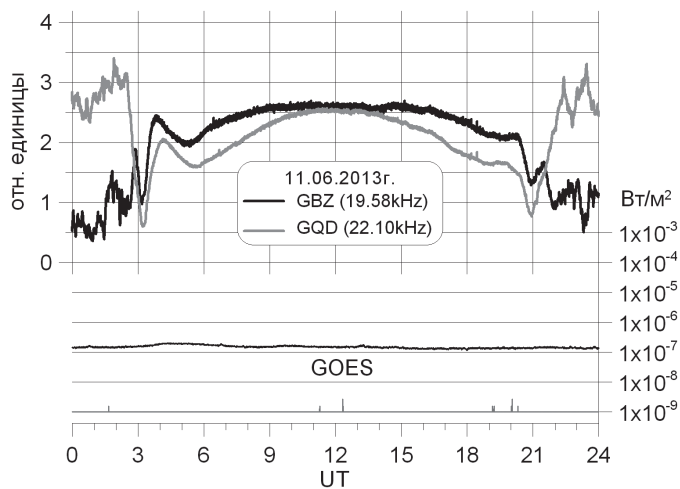
Экспериментальные данные по распространению радиоволн

Распространение радиоволн СВД–ДВ диапазонов в приземных слоях атмосферы обычно описывается в терминах волноводного канала. Наиболее распространенной моделью является разделение волны на земную, распространяющуюся вдоль поверхности Земли, и ионосферную. На достаточно больших расстояниях от передатчика вклад земной волны становится пренебрежимо малым. Отражение ионосферной волны обычно происходит от высот 80–90 км, то есть от области, которая подвержена воздействию мягкого рентгеновского излучения. Результаты мониторинга 9-ти станций СВД–ДВ диапазонов доступны на сайте [SID]. Архив содержит информацию с 2009 г. Данные представляют собой величину, пропорциональную модулю горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля с временным шагом 10 с. Приемник расположен во Франции в г. Мюре, южнее Тулузы. Особый интерес представляют две станции с кодовыми обозначениями GBZ и GQD, несущими частотами 19,58 и 22,10 кГц, соответственно, и с расстоянием между передающими антеннами ~35 км. Передающие центры находятся примерно в районе 55,5° с.ш., 3° з.д. Трассы имеют длину порядка 1300 км, середины которых находятся в районе 49° с.ш., 0,5° з.д. Излучатели – наземные зонтичные антенны, имеющие диаграмму направленности эквивалентную вертикальному электрическому диполю. Такие характеристики означают, что излучается только ТМ-мода, принимаемый сигнал соответствует ионосферной волне, а влияние корпускулярных частиц на ионосферу на трассе возможно только при наличии экстремальных потоков жестких частиц.

На рис. 2 представлены записи суточного мониторинга указанных станций для четырех дней. Значения амплитуды приведены в верхней части графика и отложены по левой оси. В нижней его части, отнесенной к правой оси, показаны данные спутника GOES с шагом 2 с. Черным цветом изображен канал XL, серым – XS. Потоки корпускулярных частиц во все рассмотренные дни были на фоновом уровне.

Представленные на рис. 2, а кривые величины сигнала имеют классический вид таких зависимостей в спокойных гелиофизических условиях. Потоки обоих каналов GOES находятся на почти постоянном уровне. На обеих кривых распространения хорошо видны характерные изменения, связанные с прохождением утреннего (~3 UT) и вечернего (~21 UT) терминаторов. Вместе с тем, флуктуации сигнала в ночных секторах не имеют объяснения. Рис. 2, б соответствует условиям достаточно больших потоков рентгена, которые на протяжении всего дня находились не ниже класса C. На графиках хорошо различимы многочисленные вспышки C-класса, три, достигших уровня M-класса, и две, относящихся к классу X (в районе 2 и 16 UT). В дневном секторе хорошо видны изменения сигнала GQD, повторяющие ход кривых канала XL. Исключение составляет вторая из вспышек класса X, которая детальнее будет рассмотрена ниже. В то же время, сигнал GBZ не реагировал на вспышки класса C. Что касается ночного сектора, то ни один из сигналов не дал эффектов, которые гарантировано можно связать со вспышками. Также необходимо отметить, что величины обоих сигналов, как в дневное, так и в ночное время, мало отличались от тех, что представлены на рис. 2, а, хотя потоки рентгена по обоим каналам разнятся более чем на порядок.

Аномальное поведение демонстрируют кривые, представленные на рис. 2, в. Как видно на данных GOES, потоки рентгена стабильны и сравнительно невелики. Заслуживающим внимание было только событие, произошедшее около 7 UT. Оно



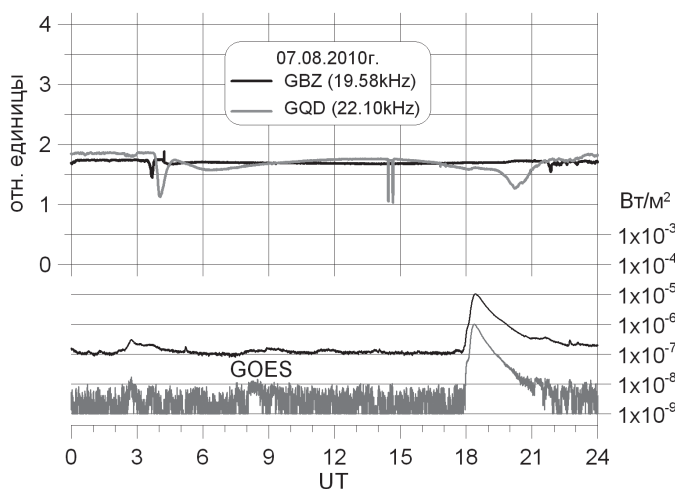
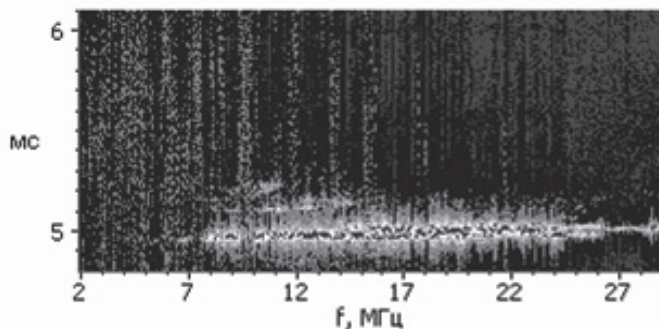


Рис. 2. Примеры записей суточного хода амплитуд сигналов СДВ диапазона в сравнении с данными GOES

характеризуется как вспышка класса C. Изменение потока в канале XL при этом было ~ 7 раз, в то время как подскок канала XS составил не менее 380 раз (развитие произошло при уровне 10^{-9} Вт/м², соответствующем порогу чувствительности аппаратуры). Это событие вызвало флуктуацию сигнала GBZ, которая пришлась на фазу наиболее быстрого изменения потоков (отношение потоков каналов XS и XL составило почти 0,25). Важно отметить, что в остальном поведение этого сигнала в первую половину дня не отличается от рассмотренных выше случаев. Этого нельзя сказать о сигнале GQD, величина которого находилась в это время на аномально низком уровне. Кроме того, отсутствует эффект прохождения терминатора. Однако после 12 UT ситуация резко изменилась. Оба сигнала демонстрируют сильную неустойчивость со значительным ростом величины. Эта ситуация сохраняется до конца суток, не взирая на уход в ночную область. Так как величины сигналов выше 4,095 не выдаются, оценить рост сигнала GBZ не представляется возможным. «Полосатость» сигнала с хорошей квазипериодичностью говорит о наличии соответствующего квазипериодического процесса, создающего ионосферу. Важно также отметить, что такая ситуация сохранялась несколько дней, после чего сначала GBZ, а позже и GQD перешли в режим, когда сигнал оказывался в области «зашкала» на протяжении почти всего дня, опускаясь ниже порогового значения на несколько часов в ночное время. Такая картина наблюдалась несколько недель.

Еще один вариант аномального поведения продемонстрирован на рис. 2, г. Хотя величины обоих сигналов находятся на среднем уровне, для GBZ суточный ход полностью отсутствует, а для GQD проявляется очень слабо. Если прохождение утреннего терминатора еще можно отметить на обеих кривых, то вечерний слегка проявляется лишь на GQD. Вспышка класса M ни как не отразилась на сигналах. При этом общий уровень канала XL ни чем не отличается от случая на рис. 2, а, однако канал XS демонстрирует очень сильную неустойчивость, которая не наблюдалась ни в одном из предыдущих случаев. Здесь также следует подчеркнуть, что ка-

2012.02.27 17:47:00 UTC
Ловозеро (Мурм.обл.) (68N 35.02E) — ГФО Михнево (54.95N 37.75E)



processed automatically

TROMSO NORWAY DYNASONDE 12-02-27 1748UT 15°E
8pBP6It DoY= 58.74166 File=TR120011.BPG

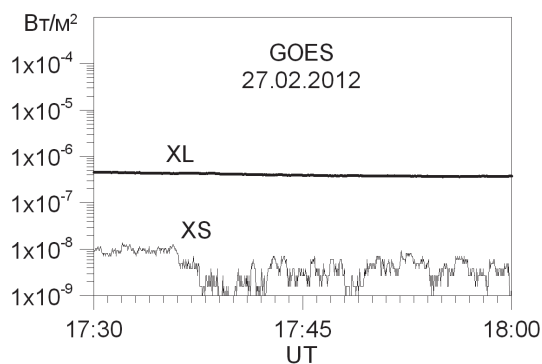
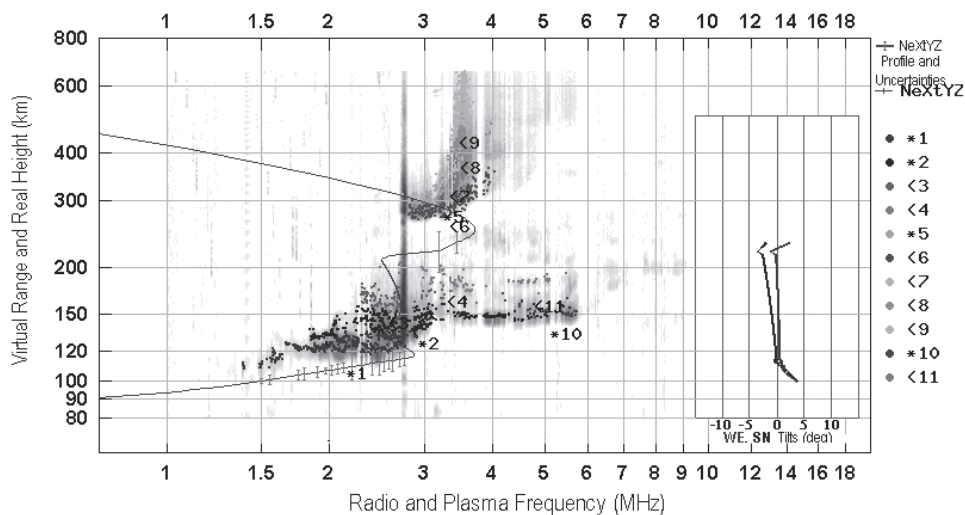


Рис. 3. Ионограммы наклонного (а) и вертикального (б) зондирования, полученные в ночном секторе; (в) – потоки рентгена по данным GOES

чественно такая картина наблюдалась на протяжении нескольких дней до и после рассмотренной даты.

Нестандартное поведение ионосферы проявляется также на сигналах КВ диапазона. Результаты обработки сигнала наклонного ЛЧМ-ионозонда, полученные на трассе Ловозеро–«Михнево» 27.02.2012 г. в 17:47 UT, приведены на рис. 3, а. Длина трассы вдоль поверхности Земли 1458 км, то есть минимальное время группового запаздывания составляет 4,86 мс. Отраженный сигнал содержит частоты от 7 до 29 МГц. Ограничение частоты 29 МГц определяется параметрами передаваемого сигнала. До 15 МГц видно двухскачковое распространение, а до 11 МГц – даже трехскачковое. Время запаздывания, соответствующее односкачковому распространению, почти не зависит от частоты, то есть ионизация очень резко возрастает по высоте и кажущаяся высота отражения фактически совпадает с реальной высотой отражения. Оценки показывают, что отражение происходит на высоте ~ 120 км при ионизации $\sim 5,25 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ ($f_o \sim 6,5$ МГц). На середине трассы (в точке отражения) величина зенитного угла Солнца составляет $\sim 111^\circ$, то есть на угловом расстоянии $\sim 21^\circ$ за терминатором. Однако угловое расстояние до линии горизонта с высоты 120 км составляет $\sim 11^\circ$. Следовательно, возникшая ионизация не может быть результатом действия прямого солнечного излучения.

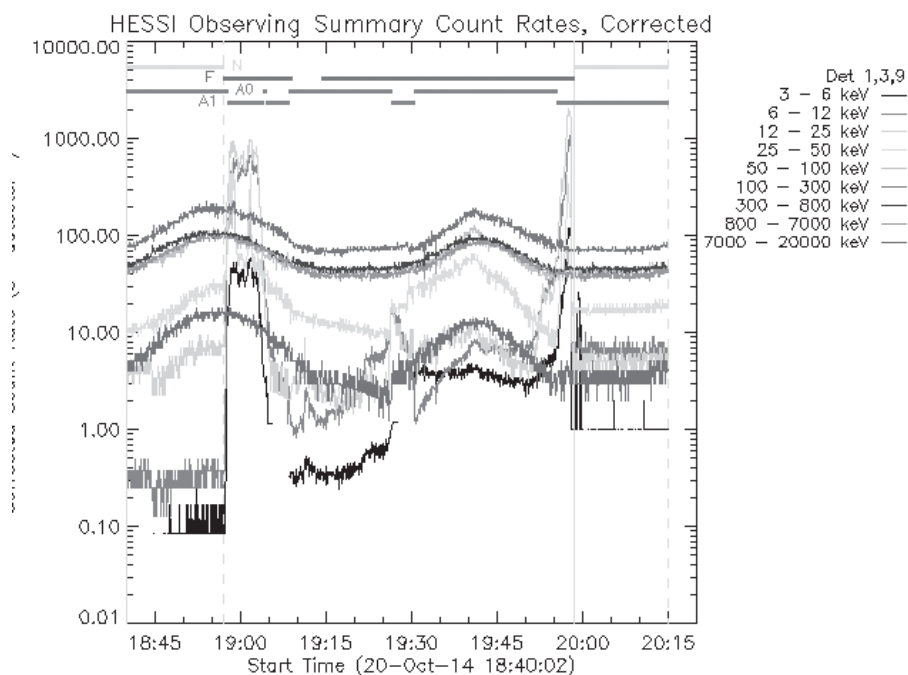
Приведенные оценки уровня ионизации и высоты отражения близки значениям, получающимся по ионограмме вертикального зондирования (рис. 3, б) в Тромсё через минуту после рассмотренного события [EISCAT]. Зенитный угол Солнца в точке наблюдения в этот момент равен $\sim 102^\circ$, то есть высота 120 км уже не освещается прямым излучением, а высота 150 км находится чуть выше линии горизонта (угловое расстояние $12,3^\circ$). Однако потери излучения в атмосфере не позволяют доставить ионизирующую составляющую солнечного спектра в эту точку по механизму прямого излучения. Динамика потоков рентгена по данным GOES в это время приведена на рис. 3, в. Приведенные примеры показывают, что на формирование ионизованной части атмосферы влияет более широкий набор факторов, чем принимается в классической модели, а механизм этого влияния более сложный.

Анализ данных спутника RHESSI

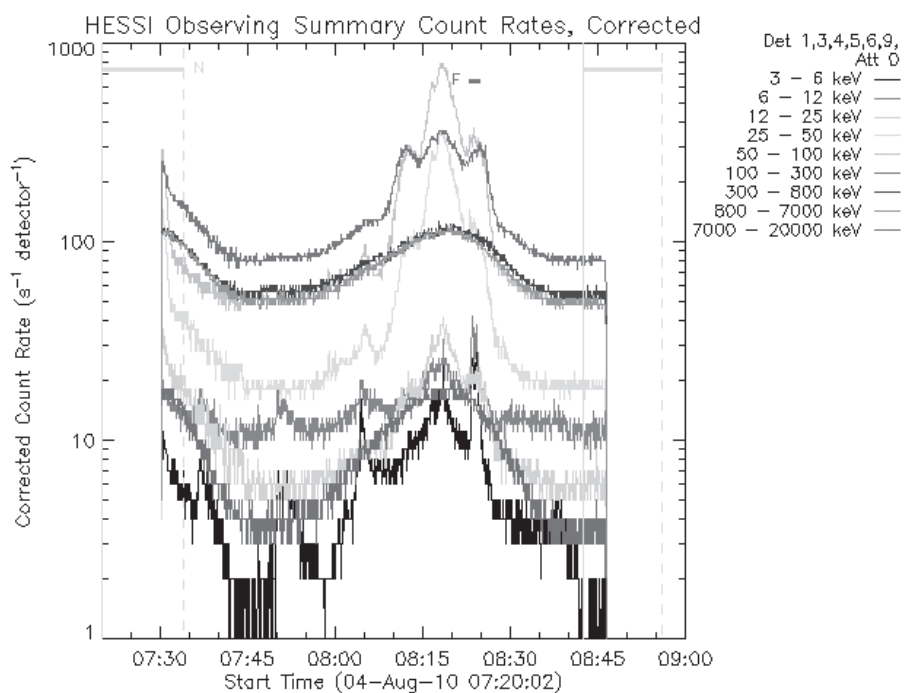
Как сказано выше, единственным источником информации о динамике жесткой составляющей спектра солнечного излучения последние годы является спутник RHESSI. Аппаратура спутника предназначена для регистрации фотонов в диапазоне от 3 кэВ до 20 МэВ, разделенном на 9 не перекрывающихся интервалов с границами 6, 12, 25, 50, 100, 300, 800 и 7000 кэВ. Таким образом, первые три поддиапазона вместе соответствуют каналу XS GOES, а первые два являются частью канала XL. Хотя заявленная верхняя граница диапазона составляет 20 МэВ, его реальная граница находится в районе 17 МэВ [Lin et al., 2008]. Более того, как отмечено в [Котов, 2010], чувствительность использованных германиевых детекторов постепенно падает при переходе через границу 1 МэВ. Это означает, что два последних канала выдают заниженные значения.

Анализ динамики потоков жесткого излучения Солнца был проведен на основе графического материала, выложенного на сайте [RHESSI]. Наиболее характерные примеры приведены на рис. 4. Каждый график соответствует одному витку спутника. На графиках приведены временные зависимости скорости отсчетов в каждом из 9-ти детекторов. При этом 1 count = 1 фотон, а все детекторы одного размера 7,1 см

в диаметре, то есть площадью 39,6 см². Основным предметом данного рассмотрения являются каналы, соответствующие энергиям выше 12 кэВ.



21-Oct-2014 15:53



7-Jun-2011 19:46

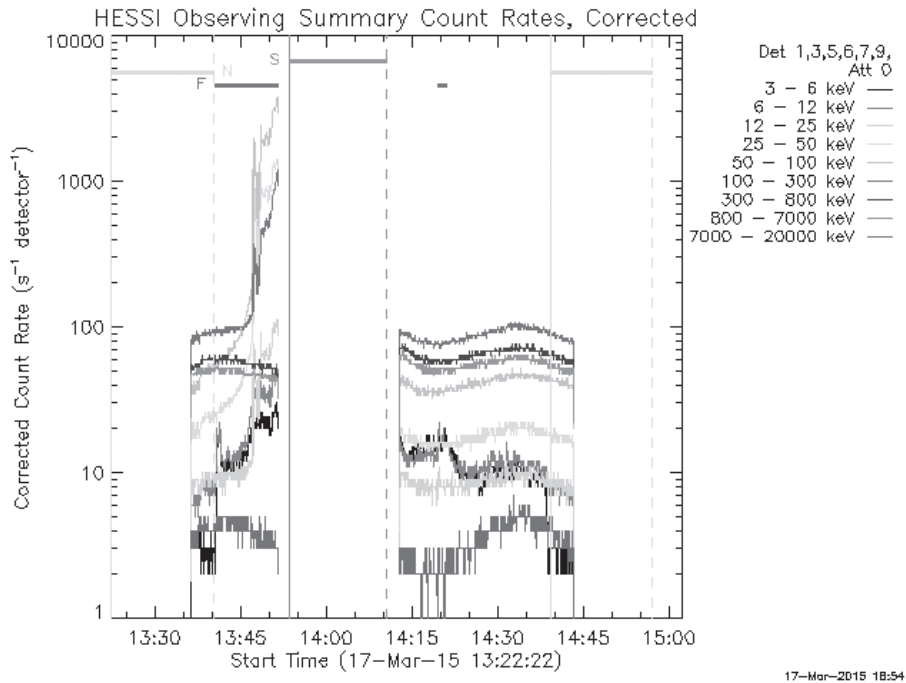
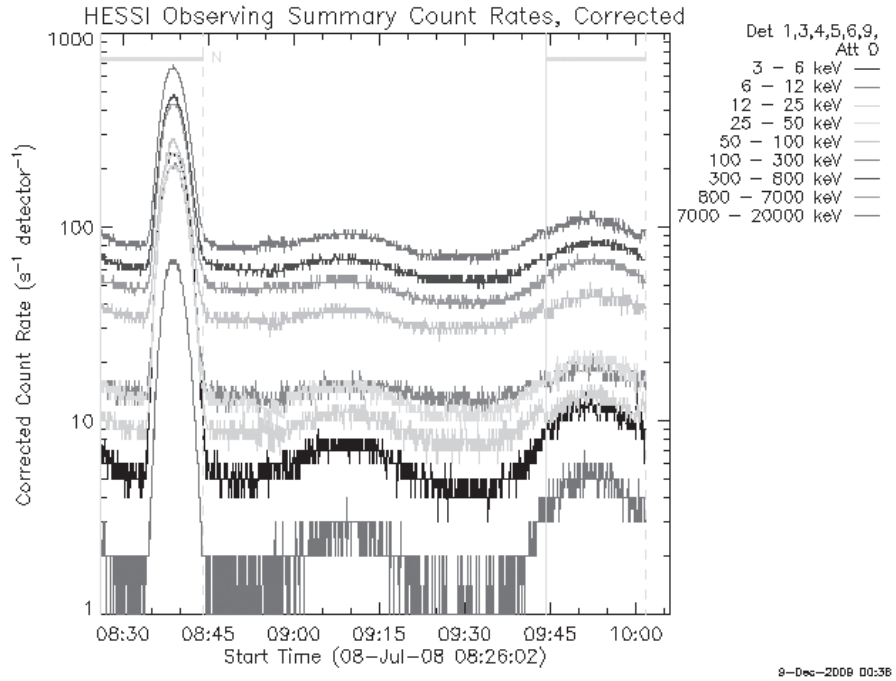


Рис. 4. Примеры данных спутника RHESSI.

На графиках по оси абсцисс приведено время в UT. Под каждым графиком указаны дата и время левой точки на оси абсцисс; по оси ординат – поток фотонов, приходящих в секунду на детектор

Уже беглый просмотр имеющегося материала показал, что в интересующем нас диапазоне нередко возникают экстремальные события, состоящие в резком увеличении потоков квантов. В общем случае изменение потока в канале доходит до 10^4 раз, но чаще всего составляет 1–2 порядка. Время развития такого события может занимать единицы минут, а продолжаться 10–30 минут. При этом, в одних случаях затронуты только 2–3 соседних канала, а в других – все.

На рис. 4, а можно увидеть развитие события, начавшегося в 19:50 и затронувшего каналы до 100 кэВ. Максимум изменения потока пришелся на канал 12–25 кэВ, в котором поток увеличился с 3 до $\sim 2 \cdot 10^3$ за, примерно, 7 минут. Изменение потока в канале 25–50 кэВ составило 50 раз (от 8 до 400), но началось на 5 минут позже, при этом до 19:55 происходил спад потока. Поток в канале 50–100 кэВ изменился примерно в 2 раза, что пришлось на очень короткий интервал времени в максимуме события. Канал 6–12 кэВ менялся в унисон с 12–25 кэВ, но относительное изменение не превысило 500 раз. На рис. 4, б показано событие, затронувшее диапазон от 12 до 300 кэВ. Его максимум пришелся на каналы 25–50 и 50–100 кэВ, в каждом из которых поток изменился примерно в 10 раз. Все событие заняло ~ 20 мин. Событие, изображенное на рис. 4, в, затрагивает все каналы, причем максимум изменения приходится на самый жесткий. Это означает, что реально затронута и более жесткая часть спектра. В то же время, само событие заняло не более 10 мин.

Важно отметить, что развитие события может быть очень бурным. Как видно на рис. 4, г подскок потока в каналах от 12 до 2000 произошел столь резко, что оценить время по графическим данным не представляется возможным. Отсутствие данных, отмеченное буквой S, является следствием сбоев, вызванных действием жестких корпускулярных частиц на аппаратуру спутника [Lin et al., 2008].

Следует отметить, что все рассмотренные события происходили на фоне квазипериодического колебания потоков либо во всех, либо только в жестких каналах. Их периодичность варьируется от 40 до 60 мин, а низшая точка от высшей различаются от $\sim 10\%$ до 10 раз. Существенным обстоятельством представляется и то, что экстремальные события могут развиваться как в верхней точке этого колебания (рис. 4, б), так и между ними. Среднее значение фонового потока также не остается постоянным. Его величина меняется, по крайней мере, в 5, а то и 10 раз.

Сравнительный анализ данных

Хорошо известно, что жесткое рентгеновское и гамма излучения проникают в более глубокие слои атмосферы Земли. Это приводит к тому, что при сильном возрастании потоков в этой части спектра нередко происходит полное подавление сигналов ионозондов. Эффект наблюдается как в зоне прямой видимости Солнца, так и теневой части. Длительность такого эффекта зависит как от динамики потоков, так и от местоположения прибора, и может длиться от нескольких минут до нескольких дней.

На рис. 5 показана вторая из вспышек класса X, представленных на рис. 2, б. Для оценки ее жесткости на график добавлена величина Div, равная отношению потока в канале XS к потоку в канале XL и отложенная по левой нижней оси. Видно, что вспышка имела две фазы развития с максимальными жесткостями 0,37 и 0,42, но ее максимум был достигнут позже максимума Div второй фазы. При этом на сигнал GQD максимальное воздействие оказала первая фаза, а наибольшее изменение сигнала GBZ соответствует максимуму Div второй фазы, но не максимуму

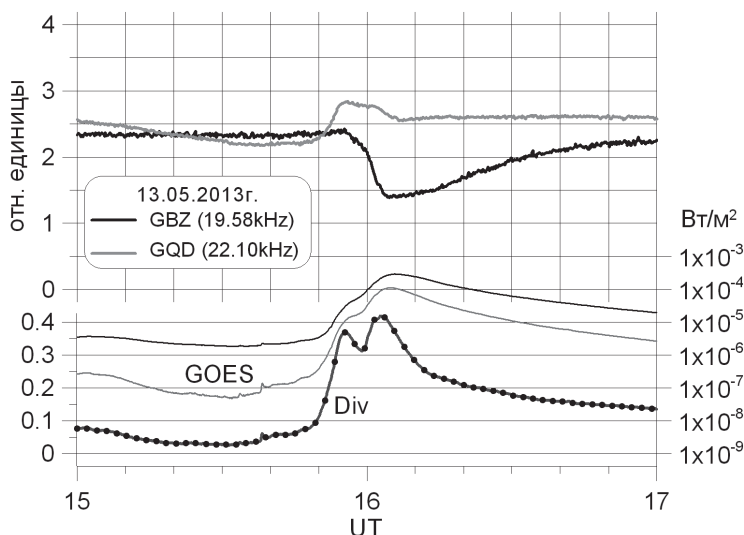


Рис. 5. Детализация вспышки класса X с рис. 2, б

му потока XL. Сравнение с данными RHESSI показывает, что поведение Div близко к динамике потока в канале 25–50 кэВ. В начале развития вспышки поток в нем равен 20, в момент максимума первой фазы увеличился до ~ 200 , далее упал до ~ 90 и достиг максимального значения $\sim 2 \cdot 10^3$ в максимуме второй фазы. Первая фаза сопровождалась увеличением потока в канале 50–100 кэВ в 2 раза. Однако вторая фаза затронула каналы 50–100, 100–300, 300–800 и 800–7000 кэВ, максимальное изменение потоков в которых от начала второй фазы составило, соответственно, 20, 8, 2 и $< 1,5$ раз. Изменение потоков в каналах < 25 кэВ повторяет XS, и превысило 10^4 . Проведенное сопоставление позволяет предположить, что на динамику сигнала GBZ существенное влияние оказало мягкое γ -излучение.

Заключение

Проведенный анализ данных со спутников GOES и RHESSI, и сопоставление их с данными о распространении радиоволн, говорит о существенном влиянии жесткого рентгеновского и γ -излучения Солнца на формирование ионосферы Земли как в зоне прямой видимости, так и в области за терминатором. Последнее обстоятельство приводит к необходимости поиска механизма передачи ионизирующего действия жесткого излучения в ночной сектор.

Автор выражает благодарность А.С. Стрелкову за обсуждение задачи.

Литература

- Котов Ю.Д. УФН, 2010, Т. 180, № 6, с. 647–661.
 Culhane J.L. and L.W. Acton. Simplified thermal continuum function for the X-ray emission from coronal plasmas // MNRAS, 1970. V. 151, pp. 141–147.

[EISCAT] <http://dynserv.eiscat.uit.no/>
[GOES] <http://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/>
Lin R.P. et al. The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)
// Solar Physics 210: 3–32, 2002.
Lin R.P. et al. Heliophysics Senior Review 2008 // The Reuven Ramaty High Energy
Solar Spectroscopic Imager (RHESSI).
[LISIRD] <http://lasp.colorado.edu/lisird/>.
[RHESSI] <http://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi2/>.
[SID] <http://sidstation.loudet.org/data-en.xhtml>.
[SWPC] <http://www.swpc.noaa.gov/observations>.