

УДК 550.338.2 (575.2) (04)

**УСЛОВИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛА
В СПУТНИКОВОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

К.А. Каримов – докт. физ.-мат. наук, профессор
Р.Д. Гайнутдинова – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.
Институт физики Национальной академии наук КР

The conditions of telecommunication signal passage in the satellite channel of communication are investigated depending on solar flare activity. The perspectives of the use of received results for noise level forecast are shown.

Введение. В спутниковом канале связи существует ряд ошибок в приеме сигнала со спутника, обусловленных различными причинами. Это ошибки, связанные с аппаратурными погрешностями, прохождением сигнала в космосе, ионосфере и атмосфере, солнечной интерференцией и др. В периоды солнечной интерференции, которая наблюдается вблизи периодов весеннего и осеннего равноденствий, Солнце, спутник связи и приемные антенны на земле находятся на одной линии. Прямое интенсивное солнечное излучение значительно перекрывает по мощности сигналы со спутника и прием полезного сигнала на земле становится невозможным. В этот период необходимо переходить на связь с другим спутником, не расположенным на одной линии с Солнцем и приемными антеннами на земле.

Среди множества существующих ошибок в передаче информационного сигнала в спутниковом канале рассмотрим только один класс ошибок, связанный с солнечной вспышечной активностью, а также ее влияние на условия прохождения сигнала в сантиметровом диапазоне с геостационарного спутника связи [1, 2]. С целью определения связи уровня зашумленности сигнала в спутниковом канале с солнечной вспышечной активностью были проведе-

ны наблюдения за период с мая по август 2004 г., в январе 2005 г. и в апреле 2006 г.

Результаты исследований. При передаче и приеме сигнала со спутника в сантиметровом диапазоне волн Интернет-провайдером АКНЕТ используется спутник “Экспресс-б”, орбита которого расположена на расстоянии 36 тыс. км от поверхности земли. Передача сигнала с земли на спутник происходит на частотах 4,0–6,0 ГГц ($\lambda=5,0\text{--}7,5$ см), а обратно сигнал ретранслируется на частоте 3,6 ГГц ($\lambda=8,5$ см). Известно, что для диапазона радиоволн от 2 до 10 см условия их прохождения практически не зависят от погодных условий в атмосфере. При этом вся ионосфера до высот 300 км совершенно прозрачна для прохождения сантиметрового диапазона радиоволн. Тем не менее, в сигналах со спутника периодически 2–3 раза в месяц отмечается короткопериодное возрастание уровня шумов и уменьшение отношения сигнала к шуму. В эти периоды отношение полезного сигнала к шуму резко снижается с уровня 14–15 дБ до уровня 9–10 дБ, а в отдельные периоды это отношение достигает 3–4 дБ.

Заметим, что в эти периоды мощность рентгеновского излучения от Солнца достигает $10^4\text{--}10^5$ Вт/м² при уровне шума 10^7 Вт/м².

В эти периоды происходит возрастание уровня ошибок или зашумленность телекоммуникационного сигнала. Пороговый уровень зашумленности соответствует мощности рентгеновского излучения более 10^{-8} – 10^{-7} Вт/м².

При цифровом кодировании сигнала важно знать уровень его ошибок для правильного декодирования. При возрастании уровня шума необходимо повышать мощность полезного сигнала и повторно посылать сигнал. При повторной передаче сигнала его мощность несколько возрастает, но не беспредельно, и с определенной вероятностью этот сигнал принимается более достоверно с меньшими потерями. В другом случае можно идти по пути уменьшения полосы пропускания приемника в спутниковом канале. При существующей в сети АКНЕТ полосе пропускания 1,6 мегабит в секунду дальнейшее уменьшение полосы пропускания приведет к уменьшению пропускной способности каналов связи. Как видно, этот путь передачи сигнала ограничен пропускной способностью приемника.

Анализ ряда крупных ошибок, превышающих число ошибок равных 50, т.е. числа отказов в прохождении сигнала, показывает, что их большая часть приходится на периоды с высокой солнечной вспышечной активностью и соответствующим высоким уровнем рентгеновского излучения более 10^{-5} Вт/м². В эти периоды уровень солнечного рентгеновского излучения был выше 10^{-5} Вт/м², а индекс геомагнитной активности К превышал 5–7 единиц по 9-балльной шкале. Необходимо иметь в виду, что уровень геомагнитной активности с индексом К=5–6 соответствует магнитной буре, а индекс К=7 соответствует большой магнитной буре.

Наиболее наглядным представлением влияния солнечной активности на качество связи Интернет провайдера являются периоды весеннего и осеннего равноденствий. В этот период Солнце, спутник связи и приемные антенны на земле находятся на одной линии. Это явление называется солнечной интерференцией и отражает крайний (предельный) случай рассматриваемого явления [2].

В последующем для анализа вышеуказанной связи были выбраны летний и весенний периоды, когда активность солнечных процессов была максимальна и отмечался высокий

уровень корреляции между ошибками в спутниковом канале связи и уровнем солнечной активности [3].

Рассмотрим конкретно два периода наблюдений, первый – в июле 2004 г., второй – в апреле 2006 г. В данный интервал наблюдений зарегистрировано 5 значимых ошибок, превышающих 40 условных единиц (рис. 1).

Первый интервал с большими ошибками, имеющими значения более 80 единиц, отмечается с 14 по 16 июля, второй – с 27 по 29 июля с ошибками от 50 до 70 единиц. В остальные периоды ошибки не превышали среднего уровня шума, равного 2–8 единицам.

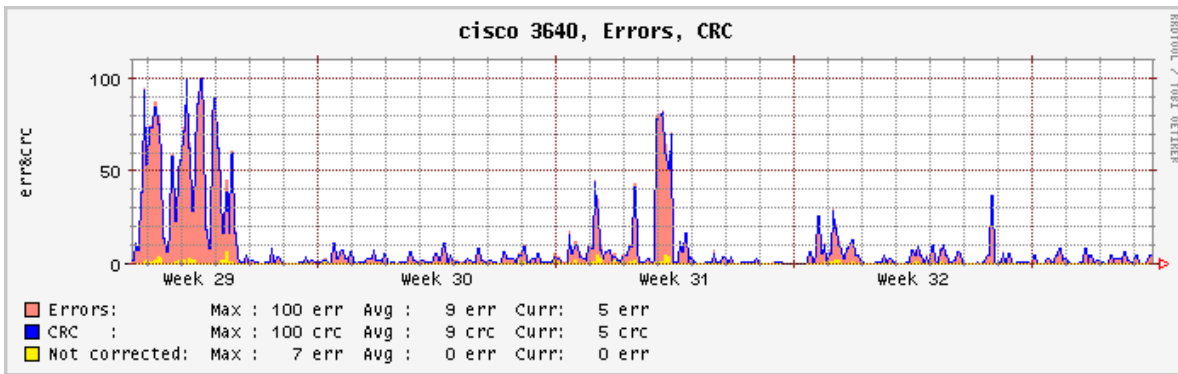
Проанализируем состояние процессов на Солнце и в магнитосфере Земли в июле месяце в целом и отдельно за указанные выше периоды. Процессы на Солнце в июле 2004 г. были относительно спокойными. Активность солнечных пятен была сравнительно низкой и отмечалась преимущественно в оптическом диапазоне.

Данные по геомагнитной активности наглядно отражают солнечную активность и их можно использовать в целях качественного контроля ее уровня (рис. 1б).

В указанный период отмечался рост солнечной вспышечной активности с двумя максимумами. Первый максимум вспышечной активности отмечался 15–16 июля 2004 г. Так, с 13 по 17 июля в солнечной короне произошла новая вспышка вблизи экватора на широте $\sim 20^{\circ}$ с.ш., сопровождающаяся выбросом солнечной материи из короны со скоростью до 1000 км/с (высокоскоростной поток), выбросом электронов, повышенным рентгеновским излучением в пределах $\gamma=10^{-3}$ – 10^{-4} Вт/м² (при фоновом уровне 10^{-8} – 10^{-7} Вт/м²).

Необходимо отметить, что рентгеновское и ультрафиолетовое излучение от Солнца достигает поверхности земли через 7 минут. При квазистационарных процессах на Солнце потоки заряженных частиц или плазмы достигают земли на 2–3 сутки.

В период с 13 по 17 июля магнитосфера была сильно возмущенной. Уровень возмущения соответствовал большой магнитной буре. В спутниковом канале связи в этот период отмечался высокий уровень зашумленности, достигающий 90–100 единиц.



(a)



(б)

Рис. 1. Статистика ошибок спутникового канала связи – (а) и вариации индекса геомагнитной активности К – (б) с 13 июля по 12 августа 2004 г.

Поскольку орбита спутника связи “Экспресс-6” находится на расстоянии 36 тыс. км, т.е. за пределами границы магнитосферы, соответствующей 5–6 радиусам Земли, то надо полагать, что захватывания частиц солнечной плазмы в области приема-передающих антенн на спутнике не происходит.

Второй интервал возмущений на Солнце отмечался с 26 по 29 июля 2004 г. и характеризовался также высоким уровнем вспышечной активности и рентгеновского излучения. В этот период в приэкваториальной области Солнца произошла вторая вспышка, сопровождающаяся выбросом коронального вещества и повышенным уровнем рентгеновского излучения, достигающим 10^{-4} Вт/м². В этом случае поток рентгеновского излучения достигает высот первого шумановского резонатора в атмосфере Земли на уровне 100 км за 7 минут, а потоки солнечного ветра (коронального вещества) достигают поверхности земли через 2–3

суток. Отметим, что в шумановском резонаторе генерируются частоты от 4 до 60 Гц, которые воздействуют на нервную систему головного мозга человека [4].

Необходимо отметить, что помимо шумановского резонатора, в верхней атмосфере Земли на высотах от 100 до 500 км существует еще альвеновский резонатор. В этом резонаторе генерируются альвеновские волны, частоты которых действуют на ритмы сердечно-сосудистой системы человека, что приводит к обострению сердечно-сосудистых заболеваний [4].

В период с 28 по 29 июля усилился высокоскоростной поток солнечного ветра, сопровождающийся мощным выбросом рентгеновского излучения и магнитной бурей. Необходимо отметить, что аналогичная связь отмечалась и в другие интервалы времени с мая по июнь 2004 г.

В зимний период в январе 2005 г. на Солнце были вновь зарегистрированы две

мощные вспышки с выбросом коронального вещества и потоками рентгеновского излучения. Сбои в работе телекоммуникационного канала связи в этот период были очень велики. К примеру, заполняемость спутникового канала связи на Москву в этот период снизилась до 10% при обычной норме 80%.

Эти явления усугублялись еще и постоянным выпадением атмосферных осадков в виде снега, который покрывал слоем антенные тарелки. При этом уменьшалась зеркальная отражательная способность антенных тарелок, поскольку слой рыхлого снега на тарелке уменьшает отражательную способность приемно-передающей антенны в сантиметровом диапазоне волн [5]. Практически это выражалось в уменьшении скорости передачи информации в сети Интернет, что отмечалось всеми пользователями канала Интернет в г. Бишкек.

Следует отметить, что данные по изменению уровня геомагнитной активности (рис. 1) могут быть использованы для качественного анализа и оценки связи уровня ошибок спутникового канала с солнечной активностью.

Для более детального анализа взаимосвязи указанных выше процессов и выявления механизмов и физических причин, рассмотрим вероятность появления сбоев в спутниковом канале связи в зависимости от следующих факторов.

Точность определения времени и вероятность появления сбоев в спутниковом канале связи зависит от пространственных (геометрических) и временных параметров расположения системы “Солнце – спутник – приемные антенны на земле” [6, 7].

Вероятность частоты появления сбоев в спутниковом канале связи на земле зависит от времени прохождения приемно-передающей точки вдоль орбиты Земли (рис. 2). Когда приемные антенны находятся в области тени, зашумленность канала связи полностью отсутствует. В этот период появление ошибок связано только с техническими причинами. Два пика зашумленности (максимумы сбоев) приходятся на утренние и вечерние часы и еще один пик, сравнительно меньший, приходится на полдень. Пики в утренние и вечерние часы связаны с геометрией ориентации приемно-передающих антенн относительно Солнца и

геостационарного спутника. Следует заметить, что в суточном ходе сбоев связи основные периоды максимальных отклонений или зашумленности при наличии возмущений в солнечной короне приходятся именно на эти пики, особенно характерные для утренних и вечерних часов.

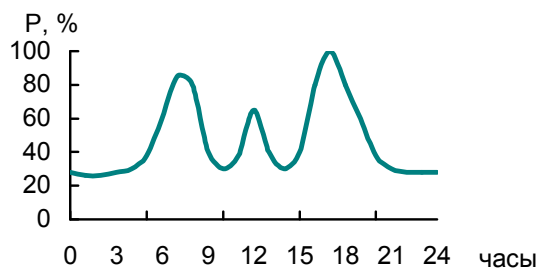


Рис. 2. Вероятность частоты появления сбоев в спутниковом канале связи.

Далее для более детального временного анализа сбоев в спутниковом канале связи с точностью до нескольких минут были рассмотрены внутрисуточные данные по активности рентгеновского излучения в период солнечных вспышек и времени появления сбоев в приемном канале связи.

Установлено, что периоды активных солнечных вспышек связаны с активностью рентгеновского излучения (рис. 3), сбоев в спутниковом канале связи и вариации индекса геомагнитной активности.

С 5 на 6 апреля 2006 г. на Солнце произошла короткопериодная нестационарная вспышка с выбросом вещества и рентгеновским излучением (рис. 3а, б). Выбросы рентгеновского излучения (рис. 3а) достигали по мощности до 10^{-5} Вт/м².

В это время зафиксированы сбои в работе спутникового канала связи. Они были связаны с выбросами солнечного рентгеновского излучения и совпадали с пиками во временном распределении ошибок сигнала приемных антенн вдоль орбиты Земли.

Временной анализ показывает, что первоначально по времени происходит солнечная вспышка, затем, спустя 10–20 мин. (5 апреля) и 7–10 мин. (6 апреля), происходят сбои в работе канала связи. Временные задержки сбоев

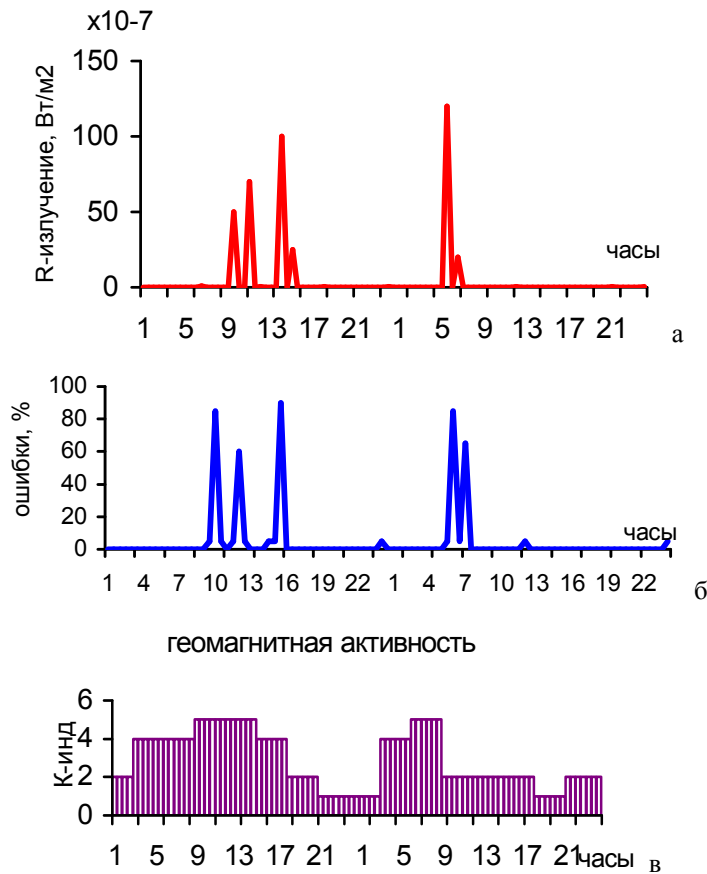


Рис. 3. Вариации рентгеновского излучения (а), статистика сбоев в спутниковом канале связи (б) и уровень геомагнитной активности – (в) во время солнечной вспышки 5–6 апреля 2006 г.

в канале связи после выбросов рентгеновского излучения варьируют от 7 до 20 мин. (рис. 3). Эти данные подтверждаются и результатами анализа других периодов солнечной вспышечной активности.

В суточных вариациях индекса геомагнитной активности (рис. 4в) в эти периоды отмечается ее возрастание. Эти данные более детально раскрывают связь сбоев в спутниковом канале связи с солнечной вспышечной активностью.

Выбросы солнечного коронального вещества в периоды квазистационарных возмущений на Солнце сопровождаются рентгеновским излучением, которое достигает атмосферы Земли через 7–10 мин. В этот период происходят возмущения в ионосфере в шума-

новском и альвеновском резонаторах. Эти возмущения в виде мощных электромагнитных импульсов достигают приемо-передающих антенн на геостационарном спутнике связи и могут модулировать высокочастотный сигнал в спутнике связи.

Заключение. Показано, что в периоды солнечных вспышек, сопровождающихся выбросом солнечного коронального вещества и рентгеновским излучением, происходит короткопериодное увеличение уровня ошибок сигнала, связанное с резким возрастанием зашумленности спутникового канала связи.

Указанная зависимость условий прохождения сигнала в спутниковом канале связи от солнечной вспышечной активности существует, и была отмечена только в периоды тех сол-

нечных вспышек, которые сопровождались выбросом мощного рентгеновского излучения до значений порядка 10^4 Вт/м² и выбросом солнечного коронального вещества, состоящего в основном из протонов, электронов и других частиц. В эти периоды зашумленность спутникового канала связи наблюдается в течение нескольких минут.

Сделанные в данной работе выводы требуют дальнейшего экспериментального подтверждения на результатах более длительного мониторинга и анализа экспериментального материала с привлечением данных по другим спутниковым каналам и другим частотным диапазонам радиоволн.

Литература

1. Гайнутдинова Р.Д., Каримов К.А. Параметры гелиогеофизической активности и окружающая среда // Экология Кыргызстана: проблемы, прогнозы, рекомендации / Под ред. проф. К.А. Каримова. – Бишкек: Илим, 2000. – С. 101–112.
2. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. Прикладные аспекты прогноза геомагнитных возмущений // Известия КТУ. – 2004. – №6. – С. 109–112.
3. Витинский Ю.И., Оль А.И., Сазонов Б.И. Солнце и атмосфера Земли. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 352 с.
4. Колесник А.Г. Электромагнитный фон и его роль в проблеме охраны окружающей среды // Изв. вузов. Физика. – 1998. – №8. – С. 102–112.
5. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д. К вопросу прогноза геомагнитных возмущений и его прикладных аспектах // Тез. докл. междунар. конф. “Современные проблемы физики и высокие технологии”. – Томск, 2003. – С. 383.
6. Каримов К.А., Гайнутдинова Р.Д., Каримов А.К. Увеличение уровня ошибок сигнала со спутникового канала связи в периоды повышенной солнечной и геомагнитной активности // Тр. междунар. конф. “Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе: состояние и перспективы”. – Бишкек, 2005. – С. 270–273.
7. Анисимова Е.О., Каримов К.А. Влияние солнечной активности на уровень ошибок спутникового канала оператора связи // Известия вузов. Физика. – 2006. – №3. – С. 206–208.