

## ПРИМЕНЕНИЕ ОРБИТАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

С.В. Кузин, С.А. Богачев  
(Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН)

Обсуждаются возможности и перспективы использования солнечных изображающих инструментов (телескопов, спектрогелиометров и коронографов) для мониторинга солнечной активности и прогнозирования состояния околоземного пространства и верхней атмосферы Земли. Рассматривается опыт работы на орбите нового российского комплекса солнечных космических телескопов ТЕСИС, введенного в эксплуатацию 30 января 2009 года. Обсуждаются фундаментальные цели и ближайшие задачи отечественной космонавтики в области исследования космической погоды.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечная активность, космическая погода, инструменты для исследования Солнца.

### Введение

Сочетание слов «космическая погода» вошло в нашу жизнь относительно недавно как перевод английского термина «space weather», которым обозначается совокупность факторов и явлений, наблюдаемых в околоземном пространстве и позволяющих характеризовать его мгновенное и среднее состояние. Этот термин не вполне точен, в том смысле, что к космической погоде в наши дни относят не только явления, пространственно относящиеся к «космосу», но и события в атмосфере и магнитосфере Земли. В этой связи далеко не праздным является вопрос, где же заканчивается обычная земная погода, и начинается погода космическая. Ответить на него можно, если провести границу между этими явлениями не по пространственному признаку «космос-Земля», а по более глубоким физическим причинам. С этой точки зрения к «земной погоде» можно отнести явления, зависящие, в основном, от собственной энергетики нашей планеты. Это движение потоков воздушных масс, перепады температур, грозы, осадки, а также другие явления. Хотя длительное время считалось, что этим списком полностью исчерпывается все изменения в окружающей нас среде, в настоящее время понятно, что это не так. Не только в окружающем пространстве, но даже и в атмосфере Земли существует целый ряд явлений, понять и объяснить которые нельзя без привлечения внешних причин, находящихся за пределами земной атмосферы. Причем в некоторых случаях внешние факторы не просто присутствуют, а являются доминирующими, а иногда и единственными. Примеры таких событий многочисленны. Это магнитные и электрические бури, полярные сияния, изменения состояния ионосферы и связанное с этим изменение дальности и эффективности коротковолновой радиосвязи, а также многие другие явления. Все это говорит о том, что хотя термин «космическая погода» и не является совершенно точным в пространственном смысле, он, тем не менее, имеет ясное физическое наполнение. Этими словами описывается широкая совокупность

явлений вблизи поверхности Земли, в нижней и верхней земной атмосфере, в ионосфере и магнитосфере Земли, околоземном пространстве, а также в гелиосфере, прямой причиной которых являются *внешние космические факторы*. При этом основным, а в подавляющем большинстве случаев и единственным фактором, влияющим на космическую погоду в масштабах всей нашей планетной системы, несомненно, является Солнце.

Космические исследования Солнца в этой связи приобретают в наши дни особый интерес. С одной стороны, изучение физических процессов в атмосфере нашей звезды было и остается одним из важнейших фундаментальных направлений современной астрофизики. С другой стороны, это направление приобретает ярко выраженный прикладной характер. В его рамках решаются вопросы непрерывного мониторинга солнечной активности, а также ставятся задачи по обеспечению науки, экономики и социальной сферы оперативной информацией о состоянии и изменениях космической погоды, так как это сейчас происходит в прогнозировании обычных погодных явлений.

В настоящей статье кратко обсуждаются «солнечные» аспекты исследования космической погоды как с точки зрения задач, стоящих перед данным направлением, так и с позиции эксперимента. Обсуждаются возможности современных солнечных обсерваторий в части решения задач непрерывного мониторинга и прогнозирования активности Солнца, а также перспективы развития данного направления в нашей стране.

### Особенности постановки экспериментов по исследованию космической погоды

Вопрос о фундаментальных задачах и особенностях постановки экспериментов по исследованию и прогнозированию космической погоды имеет не только теоретический интерес. В настоящее

время в России реализуются или планируются к реализации как минимум два проекта, имеющих прямое отношение к данной теме. Это программа «ГЕОФИЗИКА», предусматривающая вывод на орбиту группировки из пяти космических аппаратов для исследования Солнца, околоземного пространства и атмосферы Земли, и программа фундаментальных исследований Солнца «КОРОНАС», очередной спутник которой («КОРОНАС-4») может быть выведен на орбиту в 2015 – 2016 гг. Хотя в последнем случае речь идет о программе академических научных исследований в интересах физики Солнца и астрофизики, при создании аппарата, очевидно, будет обсуждаться и возможность его использования и для решения прикладных задач.

В настоящее время наибольший опыт в части постановки длительных экспериментов по мониторингу Солнца и околоземного пространства накоплен в США, где с 1974 г. действует целевая программа исследований GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Идеология программы похожа на идеологию программы «ГЕОФИЗИКА», хотя, к сожалению, пока превосходит ее в ряде чрезвычайно важных деталей. В основе программы лежит *непрерывное* формирование нескольких ключевых рядов данных (плотность потока частиц на земной орбите, уровень рентгеновского излучения Солнца и др.), совокупность которых позволяет характеризовать как мгновенное состояние ключевых факторов космической погоды, так и формировать краткосрочные и среднесрочные векторы прогноза. Непрерывность наблюдений является *главной идеей программы*, которая реализуется сразу двумя путями: за счет вывода спутников программы на геостационарную орбиту и за счет холодного резервирования спутников (на орбите все время находятся 1 – 2 резервных аппарата, которые вводятся в строй либо по плану, либо в случае выхода из строя одного из аппаратов группировки).

Второй проблемой, возникающей при решении задач непрерывного мониторинга среды, является необходимость крайне быстрой обработки информации. Эта задача успешно решена в GOES: задержка между поступлением данных с орбиты и их обновлением в общедоступных базах данных составляет в этом проекте около 30 с. При реализации программы «ГЕОФИЗИКА» на это еще только предстоит обратить внимание.

Надо заметить, что такой подход к данным существенно отличается от того, который используется при работе с результатами фундаментальных научных исследований. Практика работы на спутниках программы «КОРОНАС» показывает, что при достижении фундаментальных научных целей время и

сроки обработки информации не имеют решающего значения: от момента получения первых результатов до завершения их обработки, проверки и анализа часто проходят месяцы, а иногда и годы. При решении задач мониторинга среды такие и даже значительно меньшие задержки будут, конечно, недопустимы. Так время прихода на орбиту Земли релятивистских электронов, сформированных в области солнечной вспышки, составляет 10 – 15 с. Это явно показывает, через какое время устареет соответствующий оперативный прогноз. Хотя для других частиц, протонов и ионов, это время не так мало (речь идет уже о десятках минут и часов). Видно, что проблема оперативной обработки информации в космических аппаратах, работающих в интересах исследования космической погоды, имеет особое значение.

Следует отметить и необходимость сокращения задержки в поступлении собранной научной информации на Землю. Создание систем оперативной обработки и анализа информации теряет всякий смысл, если информация поступает на Землю с задержкой в часы и десятки часов. Решить эту проблему можно либо выводом аппаратов на геостационарную или геосинхронную орбиту, «повесив» их над приемной антенной, либо созданием большой сети приемных станций, ориентированных вдоль орбиты спутника и непрерывно принимающих данные с аппарата. Группировка аппаратов GOES построена по первому принципу. Что касается космических солнечных обсерваторий, то здесь можно найти примеры обоих решений. Так, перспективная солнечная обсерватория NASA «SDO» будет выведена на геостационарную орбиту. По второму пути (сброс данных на серию станций) идет, например, японская обсерватория HINODE. К сожалению, в нашей стране пока уделяют мало внимания выбору оптимальных орбит для научных космических аппаратов. В результате, например, обсерватория NASA «SDO» только за счет более удачного выбора орбиты будет способна передавать на Землю до 4000 Гбайт информации в сутки – больше, чем российская обсерватория аналогичного назначения «КОРОНАС-ФОТОН» сможет передать за 10 лет безупречной работы. Конечно же, при создании будущих солнечных и геофизических обсерваторий в нашей стране нельзя игнорировать ни эти факты, ни цифры. Такая позиция будет означать молчаливое согласие на изначальное отставание в одном из важнейших направлений современной космической деятельности.

Решение задач мониторинга накладывает особые требования и на надежность как самих космических аппаратов, так и устанавливаемых на них комплексов научной аппаратуры. Последнее особенно важно, поскольку сам принцип, закладываемый в основу таких

обсерваторий, требует согласованного изучения как Солнца, рассматриваемого как источник активности, так и околоземного пространства, выступающего как возмущающаяся среда. В этом смысле выход из строя аппаратуры, ответственной за одну из сторон, в значительной степени обесценивает и работу другой стороны. Одним из решений этой проблемы является жесткая минимизация числа приборов вместе с одновременным повышением требований (как технологических, так и научных) к каждому конкретному инструменту. Именно по этому пути в настоящее время развивается группировка GOES. Особенно ярко эта тенденция проявляется в аппаратах нового поколения GOES-R, в которых сохранено только четыре прибора: блок формирования изображений Солнца SIS, блок регистрации заряженных частиц SEISS, блок исследования атмосферы, преимущественно в инфракрасном диапазоне, ABI и грозовой картограф GLM. При этом число каналов в каждом блоке увеличено. Так, например, в блок формирования изображений Солнца впервые включен коронограф.

#### **Возможности орбитальных солнечных телескопов в сфере исследования космической погоды**

Если рассматривать только солнечную сторону проблемы изучения космической погоды, то наиболее мощным из существующих средств мониторинга активных процессов на Солнце являются орбитальные солнечные телескопы. Работа за пределами атмосферы позволяет этим инструментам наблюдать Солнце в ультрафиолетовой и рентгеновской области, где лежит основное излучение активной солнечной атмосферы, а, главное, делает их независимыми от погодных условий и смены дня и ночи.

Главной особенностью, отличающей телескопы от обычных «поточковых» инструментов, является возможность не просто регистрации сигнала от Солнца, а построения его детального изображения. Наиболее очевидным преимуществом, возникающим в этой связи, является возможность локализации источников излучения на диске Солнца. Если обычные инструменты могут зарегистрировать только факт изменения сигнала, то телескопы позволяют определить, с каким объектом связаны эти изменения, и дают возможности для детального исследования этих и других солнечных областей. Это исследование, очевидно, может быть проведено тем подробнее, чем выше качество изображений.

В приложении к задаче исследования космической погоды возможность локализации активных солнечных процессов приобретает особую важность. Если с точки зрения *собственной активности* Солнца все солнечные долготы являются равноправными (никакая из них не

обладает большей активностью, чем другие), то с точки зрения *геоэффективности* различные области Солнца существенно отличаются друг от друга. Так события, происходящие на восточном лимбе Солнца, могут оказывать существенное воздействие на коротковолновую радиосвязь, но при этом никак не влияют на состояние земной магнитосферы. При этом гораздо более слабые вспышки, но расположенные на так называемых геоэффективных солнечных долготах, могут вызвать сильнейшие магнитные бури. Помимо локализации важным фактором, который может быть получен из анализа изображений, является топология активных областей. Так балл магнитной бури, вызванной выбросом плазмы из области с северной магнитной полярностью, может на несколько единиц отличаться от выброса из области с полем противоположной направленности. Разумеется, такой анализ и, как следствие, точный прогноз, может быть сделан только при наличии на борту обсерватории высокоточных солнечных телескопов.

В некоторых случаях телескопы являются единственным способом исследования активных солнечных процессов. Речь идет о событиях, которые не приводят к росту потока излучения и, по этой причине, остаются пропущенными неизображаемыми приборами. В приложении к проблеме космической погоды наиболее важными из таких событий являются корональные выбросы массы и эруптивные протуберанцы. Оба этих класса оказывают существенное влияние на магнитосферу нашей планеты, однако не сопровождаются всплесками излучения и могут быть обнаружены только путем анализа серий изображений Солнца. Помимо факта начала выброса данные с телескопов позволяют рассчитать вектор его скорости, а также определить сектор межпланетного пространства, в который будет выброшено вещество. Обычно этого достаточно для формирования предварительного прогноза о моменте прихода ударных волн и объемов ионизованного вещества на орбиту Земли. Уточненный прогноз может быть сформирован через несколько часов по данным наблюдений коронографов – приборов с широким полем зрения, позволяющих контролировать распространение вещества на расстояниях до 10 – 20 радиусов Солнца. Именно такое сочетание инструментов, телескопа, наблюдающего выброс в диапазоне высот до 1 солнечного радиуса, и коронографа, отслеживающего траекторию его распространения в межпланетном пространстве, предусмотрено в программе «ГЕОФИЗИКА». Для нее в Физическом институте РАН будут созданы два согласованных по задачам прибора: солнечный изображающий спектральный телескоп «СОЛИСТ» и солнечный



**Рис. 1. Подготовка к запуску спутника «КОРОНАС-ФОТОН». Космодром Плесецк, Архангельская область**

телескоп-коронограф «СТЕК». По такому же пути, как говорилось выше, развивается сейчас группировка GOES: на всех спутниках программы, начиная с аппарата GOES-R, ставится такой же блок приборов для исследования Солнца.

В заключение можно отметить, что солнечные телескопы являются единственными инструментами, позволяющими формировать долгосрочные прогнозы солнечной активности (на срок до 27 дней). Основным материалом для таких прогнозов являются ряды изображений Солнца, полученные в течение полного оборота Солнца вокруг оси, на основе которых определяется текущая конфигурация активных областей на солнечной сфере и рассчитывается секторная структура межпланетного магнитного поля. Это позволяет спрогнозировать моменты выхода активных областей на геоэффективные долготы, откуда они получают возможность влиять на Землю, а также рассчитать дни пересечения Землей границ межпланетного магнитного поля, часто сопровождающиеся возмущениями магнитосферы.

#### **Опыт исследования геоэффективных солнечных событий в эксперименте ТЕСИС**

Возможности нашей страны по созданию изображающих солнечных инструментов, а также возможности самих инструментов по исследованию явлений солнечной активности наглядно демонстрирует обсерватория ТЕСИС, созданная в ФИАН и работающая с 30 января 2009 г. на спутнике «КОРОНАС-ФОТОН» [1]. Телескопы обсерватории являются оригинальными разработками академии наук, не повторяющими собой ни один из действующих зарубежных инструментов. При этом по ряду позиций, таких как напыление рентгеновских фильтров на поверхность ПЗС-детекторов или по конструкции монохроматических кристаллических зеркал, созданный комплекс инстру-

ментов не имеет аналогов в мире. Соответствующие технологии являются ноу-хау нашей страны.

Инструменты обсерватории создавались в интересах фундаментальной науки для исследования тонкой структуры солнечной короны, а также процессов накопления и высвобождения энергии солнечных вспышек. Тем не менее, приборы позволяют успешно решать и вполне прикладные задачи мониторинга солнечной активности [2].

Если оценивать практический опыт, накопленный за первые месяцы работы проекта, можно заключить следующее. Один из главных результатов, которые показал ТЕСИС, – это способность современных телескопов превосходить потоковые инструменты по чувствительности. Так в течение марта-июня 2009 г. телескопами ТЕСИС было зарегистрировано не менее 10 солнечных вспышек, которые были пропущены потоковыми мониторами GOES из-за недостаточного сигнала (все вспышки находились под порогом чувствительности датчиков GOES). Во всех этих случаях телескопам удалось получить серию изображений, на которых были зарегистрированы все стадии развития вспышек: от начала развития до стадии полного разрушения вспышечных магнитных петель.

Еще более впечатляющие результаты были получены прибором Сфинкс в составе ТЕСИС. Этот прибор показал чувствительность в 50 раз большую, чем чувствительность датчиков GOES, причем в том же самом диапазоне, где работают эти датчики. За март-июнь 2009 г. Сфинкс зарегистрировал поразительное число вспышек – более 200, тогда как группировкой GOES за тот же период было зарегистрировано около 20 событий.

Все это явно показывает направления, в которых уже сейчас возможно достижение существенного приоритета по сравнению с близкими по задачам зарубежными системами, при условии своевременного обращения внимания на эти возможности.

Вторым направлением, где сейчас наблюдаются впечатляющие результаты, является исследование солнечных выбросов и протуберанцев – одних из основных факторов космической погоды, уступающих по значимости только солнечным вспышкам. Результаты ТЕСИС демонстрируют большие возможности современных телескопов для исследования структуры и динамики этих явлений.

Основной прогресс в исследовании протуберанцев и выбросов, который принес ТЕСИС, связан с широким полем зрения инструмента. Если в большинстве современных зарубежных телескопов поле зрения лишь незначительно превышает размеры солнечного диска, а в некоторых случаях (как в телескопе «TRACE» NASA) много меньше его, то оптическая система ТЕСИС позволяет получать

изображения Солнца с углом зрения 4 солнечных радиуса. Такое поле зрения в сочетании с высокой чувствительностью инструмента не имеет равных в мире, что позволяет ТЕСИС осуществлять уникальные по качеству и детализации наблюдения эруптивных солнечных явлений в короне Солнца.

Наконец, на борту спутника «КОРОНАС-ФОТОН» в составе ТЕСИС, фактически, проходит испытания аппаратура, в перспективе способная стать одним из основанных способов мониторинга и прогнозирования солнечной активности. Речь идет о наблюдениях высокотемпературной солнечной плазмы с температурой выше 10 млн. град. Плазма такой температуры, по современным представлениям, является одним из главных индикаторов солнечной активности, а сам факт ее формирования может рассматриваться как предвестник солнечной вспышки в этой области. В настоящее время в мире нет инструментов, способных получить фотографии Солнца в этом диапазоне температур. В составе ТЕСИС таких инструментов два: изображающий кристаллический спектрогелиометр, работающий в линии иона магния  $MgXII$  8,42 Å (он формирует изображения плазмы с температурой 5 – 15 млн. К) и телескоп Гершеля, настроенный на линию железа  $FeXXII$  132 Å (температура 10 – 25 млн. К). Основные результаты с этих высокотемпературных инструментов должны начать поступать с середины 2010 г., когда Солнце, как ожидается, выйдет из состояния минимума активности, в котором оно находится с 2006 г.

*Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 08-02-13633-офи\_ц и 08-02-01301-а программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Программа 16, часть 3» и программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Плазменные процессы в солнечной системе».*

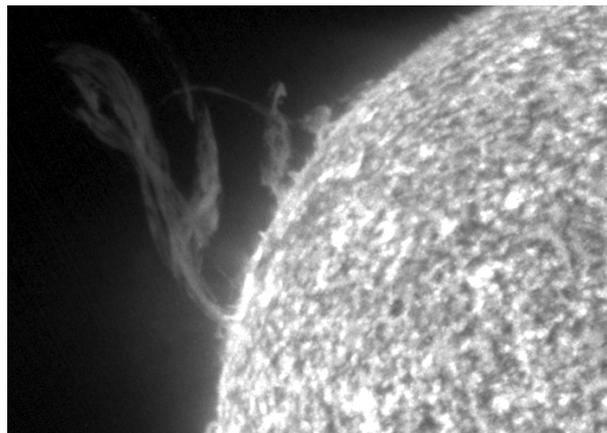
### Литература

1. Система доступа к данным ТЕСИС [Электронный ресурс] // Сайт обсерватории ТЕСИС. – М., 2009. – Режим доступа: <http://tesis.lebedev.ru>, свободный. – Дата обращения 30.06.2009.
2. Система мониторинга солнечной активности и космической погоды ТЕСИС [Электронный ресурс] // Сайт обсерватории ТЕСИС. – М., 2009. – Режим доступа: [http://www.tesis.lebedev.ru/sun\\_pictures.html](http://www.tesis.lebedev.ru/sun_pictures.html), свободный. – Дата обращения 30.06.2009.

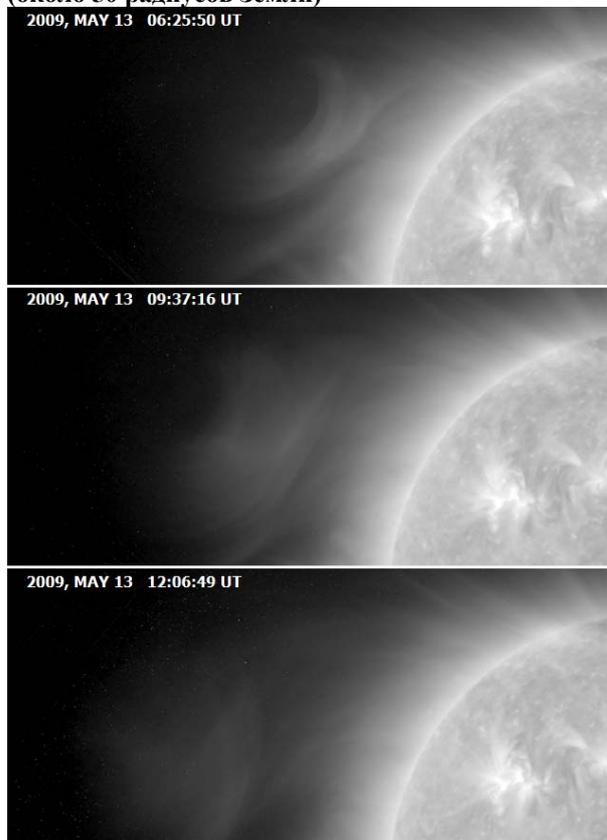
Поступила в редакцию 02.07.2009

*Сергей Владимович Кузин, канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией рентгеновской астрономии Солнца, т. 8(499)132-65-96, e-mail: kuzin@sci.lebedev.ru.*

*Сергей Александрович Богачев, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник ФИАН, т. 8(499)132-65-97, e-mail: bogachev@sci.lebedev.ru.*



**Рис. 2.** Геоэффективные проявления активности Солнца: выброс гигантского солнечного протуберанца на краю Солнца. Наблюдения ТЕСИС 23 апреля 2009 г. Температура плазмы около 80 тыс. град. Размеры протуберанца около 300 тыс. км (около 50 радиусов Земли)



**Рис. 3.** Геоэффективные проявления активности Солнца: развитие выброса массы в дальней короне Солнца. Наблюдения ТЕСИС от 13 мая 2009 г. Температура плазмы около 1 млн. град. Характерные размеры выброса около 1 радиуса Солнца (750 тыс. км)