



3016



Космическая погода

Доктор физико-математических наук
С.А. Богачев

Мы все живем на дне воздушного океана и привыкли к его капризам — заморозкам летом, новогодним праздниками без снега, октябрю с апрельской температурой. Мы относимся к этому философски, лишь привычно поругивая синоптиков. И, словно устав от нашего равнодушия, наука с недавних пор стала пугать нас новым чудом — космической погодой. Действительно ли в космосе есть погода? Что это вообще такое?

Влияет оттуда, проявляется здесь

Магнитные бури, радиационные пояса, озоновые дыры — эти слова входят в нашу жизнь, заставляя вздрагивать и оглядываться вокруг в поисках новой невидимой силы, способной, если верить средствам массовой информации, выводить из строя электростанции, сети связи, космические аппараты и конечно же влиять на здоровье людей. Связанные между собой явления в атмосфере Земли, в космическом пространстве и на Солнце объединяют понятием «космическая погода». В некоторых случаях они могут быть важны и для жителей Земли, и для космонавтики.

Все эти процессы можно описать формулами и измерить с помощью физических инструментов. Понять, что это такое, проще всего, сравнивая с обычной погодой. Под последней, как мы все знаем, понимается состояние окружающей нас

среды и прежде всего атмосферы — температура, влажность, давление, скорость и направление перемещения воздуха (ветер). Причины изменений в атмосфере находятся в физике самой Земли — в законах движения воздушных масс. И хотя иногда приходится слышать теории вроде «что вот в этом году было жаркое лето, так, наверное, просто Солнце светило сильнее», к реальности эти догадки не имеют отношения.

Однако существует красивое выражение: «Земля находится в объятиях Солнца». Стоит ли за этой фразой реальная физика и если да, то какая? Нет ли в окружающей среде изменений, причины которых находятся где-то далеко? Ответ на этот вопрос положительный — да, они есть. К космической погоде как раз и относят те процессы, которые происходят на поверхности и в атмосфере Земли (с появлением спутников сюда стали относить и ближнее космическое пространство), но причина которых находится вне планеты.

При таком определении к космической погоде могут быть отнесены, например, приливы и отливы. Объяснить их физикой самой Земли невозможно, и если вообразить себе вымышленное человечество, по какой-то причине не знающее о существовании Луны и Солнца, то попытки объяснить приливные явления в этих условиях поставили бы их в тупик.

Земля в объятиях Солнца

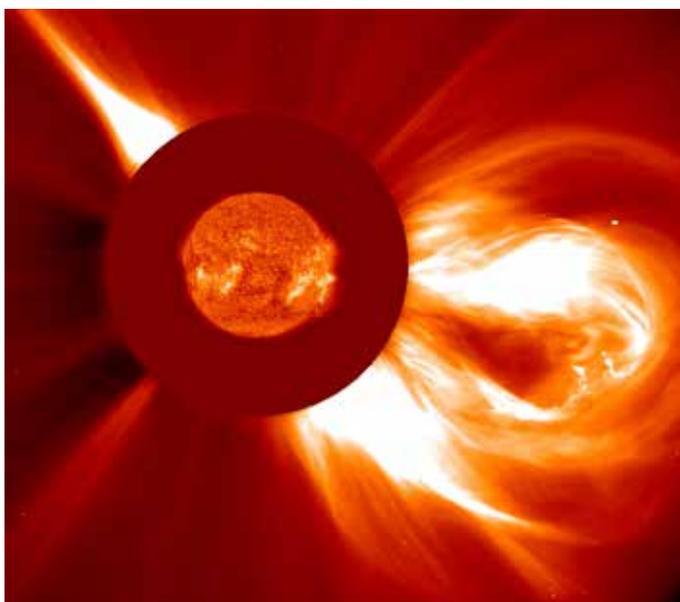
В отличие от обычной метеорологии, проводящей измерения на Земле (даже метеоспутники смотрят вниз на Землю), чтобы изучать космическую погоду, надо смотреть в космос. Поэтому космическая погода молода — эта область не могла развиваться в полную силу до начала космической эры. Что сегодня, кроме приливов, может быть отнесено к космической погоде?

1. Полярные сияния. Изображение из сети Интернет

Прежде всего — полярные сияния. Причина — заряженные частицы, вторгающиеся в атмосферу Земли после вспышек на Солнце или вместе с солнечным ветром и проникающие в плотные воздушные слои нашей планеты через полярные каспы — воронкообразные области магнитного поля. Взаимодействуя с атомарным и молекулярным кислородом и азотом, солнечные частицы переводят их в возбужденное состояние, из которого атомы релаксируют с испусканием фотонов разной энергии, в основном — в зеленой и красной частях спектра.

Далее, магнитные бури — колебания напряженности земного магнитного поля после вспышек на Солнце, реже — в результате взаимодействия с солнечным ветром. Такие неожиданные (и как казалось на тот момент — беспричинные) изменения магнитного поля Земли были обнаружены еще в XIX веке, однако тогда они не могли быть объяснены никак, кроме как процессами под земной поверхностью, может быть, даже в ядре, так как вспышки на Солнце тогда не были известны. Первую солнечную вспышку наблюдал 1 сентября 1859 года британский астроном Ричард Кэррингтон, и сопровождалась она одной из крупнейших зафиксированных геомагнитных бурь, среди последствий которой — массовый отказ телеграфных систем в Европе и Северной Америке. Начавшиеся после этого поиски и исследования вспышек на Солнце показали космическое происхождение магнитных бурь. Произошло это, надо полагать, к большому удовольствию синоптиков, которым уже в то время хватало проблем с обычной погодой.

Хотя и магнитные бури, и полярные сияния вызываются вспышками на Солнце, их природа различна. Полярные сияния связаны с отдельными вспышечными частицами, проникающими в магнитное поле Земли. Однако, помимо отдельных частиц, солнечные вспышки иногда выбрасывают в космос целые облака плазмы — так называемые выбросы массы. Такие выбросы, в частности, хорошо видны на снимках, которые делают спутники. В отличие от быстрых отдельных частиц, которые тратят на путь от Солнца к Земле порой всего несколько часов, облака плазмы медлительны, они неторопливо ползут к нам два-три дня (по земным меркам их скорости колоссальны — 1000 км/с и более). В ходе движения, как любое газовое тело, облака увеличивают свои размеры и при приближении к Земле могут вырастать до



2
Солнечный выброс массы. Изображение получено коронографом LASCO на спутнике SOHO 2 декабря 2003 года



ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ НАУКИ

десятков миллионов километров. В результате, если на пути такого облака окажется небесное тело без атмосферы, то оно просто окутывает его (это следует учесть будущим покорителям Луны). В случае же Земли, обладающей не только атмосферой, но и магнитным полем, солнечная плазма не проникнет вниз, а будет отражена магнитосферой. Однако так же, как после удара по нему палицей вибрирует щит, так и земное магнитное поле, приняв на себя удар облака плазмы, начинает испытывать колебания, которые добегают из космоса до поверхности Земли и регистрируются приборами уже на поверхности. Кроме того, солнечный выброс насыщает земную магнитосферу заряженными частицами и создает в ней избыточные токи, которые влияют на земное магнитное поле у поверхности. Развивается магнитная буря.

В любом замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного поля наводится ток — это школьный учебник. Такие контуры на Земле есть — это электрические сети и трубопроводы. Именно на эти системы наводятся в первую очередь дополнительные токи во время магнитных бурь. А от них они уже могут передаваться, например, на приборы, включенные в сеть. Опасно ли это? Скорее нет, чем да. Магнитные бури — нередкое явление, и, если бы каждая из них что-то выбивала в сети, это давно превратилось бы в общемировую проблему, а этого нет. При желании такие замкнутые проводящие контуры можно найти и в организме человека — например, нервная система и система кровообращения. Конечно, их размеры на многие порядки меньше размеров электросетей, и вдобавок сопротивление на многие порядки выше.

Есть еще несколько каналов влияния. Например, Солнце влияет на плотность верхней атмосферы и ионосферы и, следовательно, на движение спутников на низких орбитах, а также на радиосвязь. Важным аспектом является ультрафиолетовое излучение Солнца, проникающее до поверхности Земли и, в частности, вызывающее загар. Его уровень также зависит от солнечной активности. Наконец, важная часть космической погоды — радиационный фон в ближнем и дальнем космосе. С развитием электроники и ее миниатюризацией опасность выхода из строя космического аппарата при попадании в него заряженной частицы с каждым новым поколением спутников только возрастает. А в будущем мы столкнемся с проблемой обеспечения безопасности человека при дальних космических перелетах, например, при экспедиции на Марс. В этом случае возможность прогнозировать вспышки на Солнце окажется принципиально важной. На время всплесков космической радиации экипаж будет иметь время укрыться в защищенных отсеках, а чувствительные элементы электроники могут быть обесточены, что снижает риск их необратимого повреждения.

Как прогнозируют космическую погоду

Легко определить текущее состояние обычной погоды — купить бытовую метеостанцию, а на крайний случай хватить и термометра за окном. Однако, чтобы не просто измерить,



3

Космический аппарат GOES-R (художественное изображение).
Источник — www.nasa.gov

а сделать прогноз, необходимы уже существенно большие усилия, с привлечением множества данных, собираемых метеостанциями по всему миру, а в наши дни еще и путем привлечения спутниковых наблюдений. Это относится и к космической погоде. Проводить локальные измерения магнитного поля и выдавать сообщения о магнитных бурях — в целом задача несложная, хотя и требующая определенной квалификации. Есть большое число магнитных датчиков, многие из которых являются всепогодными, и единственное, что требуется, — это обеспечить отсутствие помех со стороны электрических приборов. Часто такие датчики просто закапывают в землю. Сложнее изучать состояние верхней атмосферы и ионосферы, но с этим справляются метеозонды, поднимающиеся до высот около 40 км, и ионозонды — наземные радиолокаторы, зондирующие ионосферу. Однако космическая погода потому и называется космической, что без взгляда в космос не обойтись. Точно так же как термометр за окном способен сообщить о температуре сейчас, но ничего не скажет о температуре завтра, так и магнитометры, метеозонды и ионозонды характеризуют лишь текущее состояние

атмосферы и магнитного поля, но не знают, что произойдет через день. Для того чтобы прогнозировать космическую погоду, надо наблюдать источник ее изменений и иметь модель явления. Таким источником для Земли является Солнце.

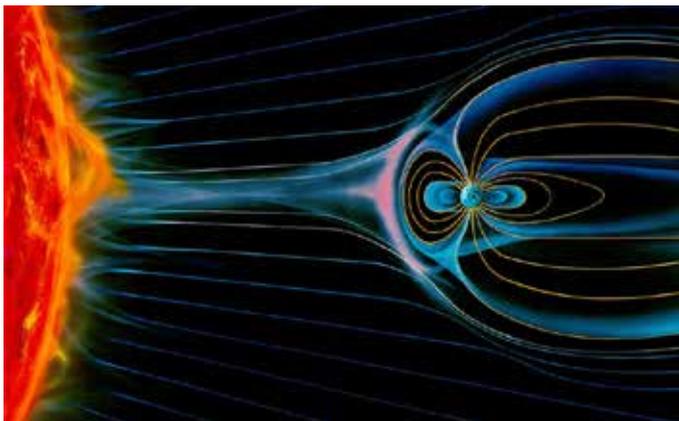
Поэтому для изучения космической погоды нужны аппараты, осуществляющие наблюдение Солнца, а также одновременно измеряющие отклик на солнечные события в ближних космических окрестностях Земли. Солнечная вспышка может длиться всего несколько минут, а ее следы с диска Солнца могут исчезнуть уже через один-два часа. Если спутник ведет наблюдения с большим шагом или периодически уходит в тень Земли, он непригоден для работы в этой области. Кроме того, он должен иметь возможность в любой момент передать данные на Землю. Если аппарат вращается вокруг Земли и выйдет в зону видимости приемной станции только через несколько часов, часть вспышечных воздействий за это время может уже добраться до Земли.

Эти требования выполнены, например, группировкой аппаратов GOES, которые работают в космосе в интересах Национальной атмосферной и океанической администрации США (NOAA). Первый аппарат группировки был выведен на орбиту в октябре 1975 года, и с тех пор друг друга на орбите сменили уже 17 космических аппаратов. Последний из них был запущен в марте 2018 года, запуск следующих назначен на 2020-й и 2024 год. «Сменили друг друга» — не совсем правильный термин, так как аппараты запускаются и работают с перекрытием. Одновременно на орбите находятся два-три, а иногда и больше, идентичных спутников, некоторые из них ведут наблюдения в параллельном режиме, а один-два находятся в холодном резерве и могут быть включены в любой момент. Наблюдения ведутся непрерывно, данные поступают на Землю в режиме реального времени. Для этого все аппараты выводятся на геостационарную орбиту, находясь на которой, они фактически висят над одной и той же точкой Земли — в данном случае над своей приемной станцией. От момента получения данных в космосе до их появления на серверах

4

Изображение Солнца, полученное космическим аппаратом SDO.
Источник — www.nasa.gov





5
Схематическое изображение взаимодействия солнечного ветра и Земли.
Изображение из сети Интернет

NOAA и публичных ресурсах в Интернете проходит не более одной-трех минут. Однако эти аппараты не определяют, где на солнечном диске произошла вспышка — напротив Земли, когда ее влияние максимально, или на его краю.

Эту задачу решает другой аппарат — SDO (Solar Dynamics Observatory), запущенный в 2010 году. Снимки он получает великолепные — от некоторых просто захватывает дух. Главной же для науки, впрочем, является не красота, а непрерывность работы SDO. Все это время он шлет на Землю снимки Солнца в режиме реального времени каждые 12 секунд. Работает аппарат на такой же геостационарной орбите, что и спутники GOES.

Однако это еще не все — ни GOES, ни SDO не могут наблюдать солнечный ветер. Этому мешает магнитное поле Земли, внутри которого работают оба спутника. Чтобы его наблюдать, надо выводить аппараты очень далеко от Земли — на сотни тысяч, а лучше миллионы километров. Эту задачу решает космический аппарат ACE (Advanced Composition Explorer), запущенный в 1997 году. Аппарат располагается в точке Лагранжа L1 — находясь в ней, аппарат вращается вокруг Солнца с той же угловой скоростью, что и Земля, то есть он все время находится между ними. Удалена эта точка от нашей планеты примерно на 1,5 млн км. Земного магнитного поля здесь нет, аппарат оказывается погруженным прямо в поток солнечного ветра. Он измеряет состав солнечного ветра, энергию и концентрацию частиц, исследует космические лучи, измеряет магнитное поле. С этого аппарата идет основной мировой поток данных по солнечному ветру.

Но есть еще один прибор, без которого в космической погоде не обойтись, — коронограф, способный наблюдать движения масс в окрестностях Солнца, измерять их скорости и предсказывать, как быстро они достигнут (и достигнут ли вообще) Земли. Единственный мировой коронограф, находящийся тоже в точке L1, расположен сейчас на очень старом европейском спутнике SOHO, выведенном на орбиту еще в 1995 году. По сути, только из-за уникальности данного прибора в настоящий момент поддерживается работоспособность SOHO, у которого уже зарегистрирован отказ нескольких служебных систем. Еще два коронографа расположены на аппаратах STEREO, которые, однако, удалены от Земли на сотни миллионов километров и передают снимки раз в пять минут.

Таким образом, исследование космической погоды сейчас ведется не одним, а сразу несколькими космическими аппаратами, каждый со своими задачами, и, в некотором смысле, собранными в единую группировку. Тем не менее даже такая искусственно созданная группа смогла за последнее десятилетие очень сильно продвинуть теорию космической погоды, пусть пока и не приблизив ее точность к обычной метеорологии, но повысив качество прогноза как минимум в разы.



Что происходит у нас

Космическая погода — это серьезный научный контроль и прогноз радиационного и плазменного состояния ближнего космоса, то есть области, где располагается подавляющая часть космических аппаратов, а также прогноз состояния ионосферы и в целом верхней атмосферы Земли. Данные эти нужны для решения множества научных и технических задач. Никто не отменял и задачи освоения Луны (какими бы фантастическими они ни казались сейчас), которые нельзя решить без информации о солнечной активности. Причем наблюдения Солнца и исследования космической радиации — это область, где Россия в постсоветскую эпоху не только не потеряла, а даже расширила свои возможности. За последние десять лет были созданы три космические обсерватории — «КОРОНАС-Фотон» в 2009, «Спектр-Р» в 2011 и «Михайло Ломоносов» в 2016. Первая из них была полностью предназначена для исследования Солнца и его радиационных излучений. Вторая, «Спектр-Р», хотя и решает задачи радиоастрономии, несет на борту еще и прибор «Плазма-Ф» для мониторинга солнечного ветра и межпланетной среды. Наконец, в последнем аппарате около половины научных приборов предназначены для регистрации космических



6
Космический аппарат «КОРОНАС-Фотон» — последняя на текущий момент специализированная солнечная обсерватория РФ.
Изображение из сети Интернет

частиц, ультрафиолета и гамма-излучения. Иными словами, необходимые приборы разработаны, запущены, они летали и летают. Осталось лишь разобраться, действительно ли надо запускать в космос сразу три или четыре обсерватории или решить эту задачу можно проще.

Типовой спутник GOES — это огромный аппарат с массой более 5 тонн, конкурировать с которым трудно — аппарат «Михайло Ломоносов» весит около полутонны. Однако на солнечные приборы в спутнике GOES отдана относительно небольшая часть массы. Остальное составляют иные инструменты, работающие по земным вопросам, а также служебные системы и системы резервирования. В спутнике SDO также

для задач космической погоды используются лишь два телескопа из десяти находящихся на борту. Остальные работают по задачам солнечной физики, для решения которых этот аппарат, собственно, и был выведен в космос. Из всего спутника SOHO, как уже говорилось выше, интерес для космической погоды представляет лишь коронограф. Что касается аппарата ACE, то это небольшой аппарат с общим весом около 600 кг, в котором для мониторинга базовых характеристик солнечного ветра задействована лишь часть приборов. Остальные изучают тонкие вопросы вроде ионного состава межпланетной плазмы, не имеющие прямого отношения к космической погоде.

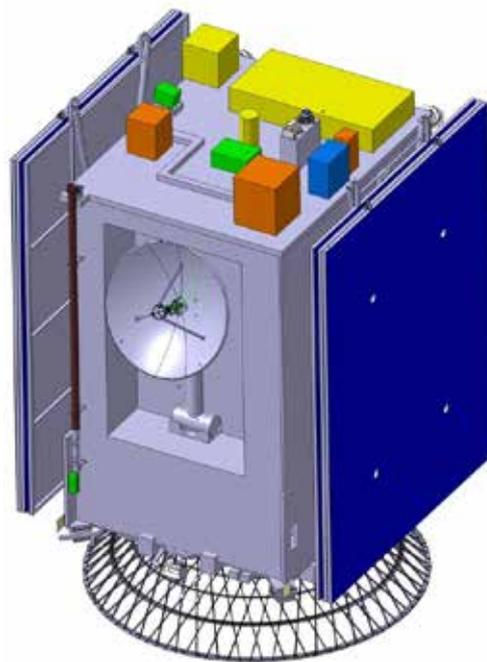
Если приборы для изучения космической погоды подбирать не из того, что есть в наличии — как сложилось сейчас, — а разрабатывать целенаправленно, то их можно разместить единым комплексом на одном космическом аппарате среднего размера. Задача эта, с учетом того, что многие приборы имеют прототипы на ранее выведенных российских аппаратах, вполне подъемная и может быть решена в короткий срок. Установка приборов на борту одного спутника облегчает синхронизацию и сравнительный анализ результатов разных приборов.

СОЛЯРИС смотрит на Солнце

Заказ на такой проект, получивший название СОЛЯРИС, поступил в Российскую академию наук (РАН) в 2016 году от ФГУП ЦНИИмаша — головного научно-исследовательского института Государственной корпорации «Роскосмос». В качестве головной организации от РАН выступил Физический институт Академии наук (ФИАН) — один из ведущих физических институтов нашей страны (альма-матер семи лауреатов Нобелевской премии), являвшийся, помимо прочего, разработчиком космических солнечных телескопов для космического аппарата «КОРОНАС-Фотон». В кооперации с тремя ведущими организациями в области научного космического приборостроения (ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ и МИФИ) была предложена следующая концепция будущего российского аппарата.

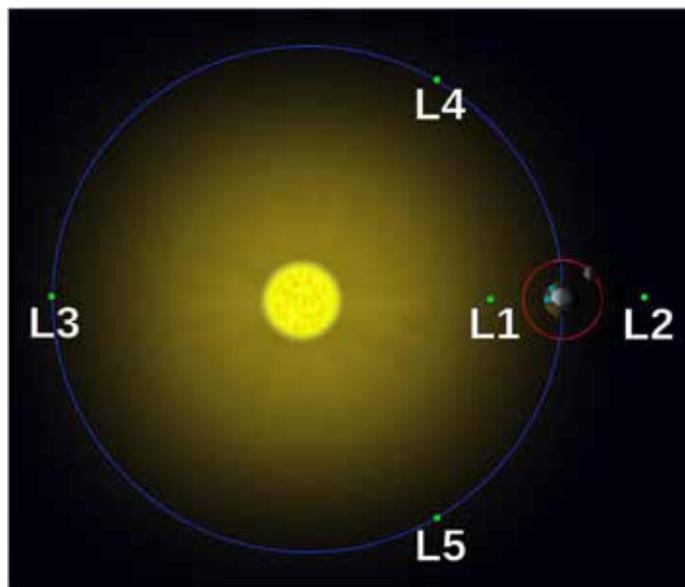
На борту спутника будут находиться четыре комплекса инструментов, каждый из которых решает свою задачу. Первый комплекс — это набор телескопов, разрабатываемый в ФИАНе. Этот блок должен в режиме реального времени производить фотографирование солнечного диска в области температур порядка миллиона кельвинов, где лежит основное излучение солнечной короны и вспышек. По этим снимкам затем можно будет определять, где именно произошла вспышка на Солнце, а также вероятность ее воздействия на Землю и на окружающее космическое пространство. В состав этого же блока включается коронограф для измерения скоростей распространения выбросов солнечного вещества к Земле. Второй комплекс, разрабатываемый в МИФИ, должен регистрировать рентгеновское и гамма-излучение Солнца, которые являются основными источниками воздействия на верхнюю атмосферу и ионосферу Земли, влияя в числе прочего на прохождение радиосигналов. Третий комплекс, за создание которого готов взяться НИИЯФ МГУ (одна из ведущих организаций разработчиков спутника «Михайло Ломоносов»), будет измерять потоки частиц, летящих от Солнца к Земле. Именно эти частицы бомбардируют космические аппараты и земную атмосферу после вспышек. И наконец, ИКИ РАН взял на себя ответственность за создание аппаратуры для регистрации характеристик солнечного ветра, основываясь на опыте прибора «Плазма-Ф», созданного ранее для аппарата «Спектр-Р».

Выведен аппарат должен быть в точку Лагранжа L1. Как уже говорилось, такая орбита обеспечивает погружение аппарата внутрь потока солнечного ветра и создает условия для его



Космический аппарат СОЛЯРИС — предварительный проектный облик

прямых измерений — возможность, которая отсутствует на низких орбитах внутри магнитосферы. Насколько комфортно там будет другим приборам? Думается, что вполне неплохо. По крайней мере, в этой же точке работает с 1995 года аппарат SOHO, приборы которого на настоящий момент прожили тут уже 23 года. В схожих условиях, погруженными в солнечный ветер, работают с 2006 года и космические аппараты STEREO. Помимо других достоинств, точка L1 обеспечит обсерватории непрерывную видимость Солнца — на геостационарных орбитах, где работают спутники GOES и SDO, два раза в год происходят перекрытия Солнца Землей (примерно по часу каждый день на протяжении одного-двух месяцев — весной и осенью). По-видимому, интересным такой запуск должен стать и для разработчиков средств выведения, так как в исто-



Точки Лагранжа в системе Солнце — Земля: гравитационное притяжение разнородного здесь тела уравновешивается центробежной силой. Изображение из сети Интернет



держиваемого институтом в инициативном порядке на основе зарубежных данных (в ситуации отсутствия своих). Ресурс расположен по адресу http://tesis.lebedev.ru/sun_pictures.html и посещается ежедневно от 10 до 20 тысячами человек — огромная цифра для научного проекта. В дни высокой солнечной активности, например, во время рекордных солнечных вспышек, наблюдавшихся в сентябре 2017 года, проект посещали до 60 тысяч уникальных посетителей в сутки, просматривавших в сумме до полумиллиона страниц. Конечно, это цифры говорят о готовности общества воспринимать данные о космосе и вообще научные результаты, если они изложены в понятном популярном виде. Нет сомнений, что с началом поступления данных от отечественного аппарата этот интерес должен только вырасти.

Остается лишь самый главный вопрос — с учетом экономической ситуации и значительного сокращения за последние годы финансирования научного космоса, есть ли финансы для реализации проекта? В целом ситуация выглядит не очень благоприятной. В частности, по тематике физики Солнца вот уже около десяти лет не удается найти средства для начала создания в железе солнечной обсерватории «Интергелиозонд», которая должна была вывести комплекс научных приборов на орбиту вокруг Солнца. За время, пока данный проект обсуждался и проходил лабораторные исследования, Европейское космическое агентство разработало и построило свой аналогичный спутник, Solar Orbiter, который готов к запуску. Если он будет запущен и нормально заработает, возникнет вопрос о целесообразности запуска российского проекта. Существует риск заморозки и второго российского солнечного проекта, АРКА, который должен был вывести на орбиту два рекордных по точности телескопа, детализация которых превосходит детализацию телескопов SDO в шесть раз. Срок запуска этого аппарата сначала из-за отсутствия средств был сдвинут с 2021 года на 2024-й, потом на 2027-й, а сейчас под вопросом уже и эта дата, и так отдаленная от настоящего момента почти на десять лет. Будут ли ждать нашего запуска столько времени за рубежом?

В этой ситуации вопрос, полетит ли СОЛЯРИС или останется еще одним проектом, демонстрирующим миру наши возможности лишь на бумаге, остается пока открытым. От организаций Роскосмоса возможности по созданию космической платформы для данного проекта подтвердило уже АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва. Платформы, подходящие для реализации проекта, имеет в своем листе и НПО им. С.А. Лавочкина — организация, специализирующаяся на научном космосе. Остается лишь следить за финансовыми и техническими планами корпорации Роскосмос.

9

Космический аппарат АРКА (Россия). Предназначен для вывода в космос солнечных телескопов сверхвысокого разрешения. Срок запуска — 2027 год.

Изображение из сети Интернет

рии отечественной космонавтики, в отличие от зарубежной, запусков на эту орбиту не было.

Исследования космической погоды, помимо научных аспектов, привлекают своей открытостью и востребованностью обществом. Российская научная космонавтика редко представляет какие-то результаты на публичное обсуждение. Исключение — проект «Спектр-Р», периодически готовящий довольно яркие пресс-релизы и сообщения. Но даже ему пока далеко до открытости тех же зарубежных обсерваторий Hubble, Chandra, SDO, марсоходов Spirit и Curiosity и других, поддерживающих обширные галереи открытых данных. Найти какие-то результаты работы по российским проектам — задача сложная даже для терпеливых людей. Иногда на такое замечание возражают, что фундаментальная наука, по определению, вещь не для всех и ученые должны отчитываться перед обществом не пресс-релизами, а статьями в научных журналах. Можно спорить, насколько это правильно, однако наблюдения космической погоды — явно та сфера, где это оправдание не проходит. Аппарат, запущенный для непрерывного мониторинга состояния Солнца и космоса, конечно же должен демонстрировать результаты этого мониторинга в реальном режиме времени, а не путем публикации двух-трех научных статей в год. Такой подход здесь неизбежен, и нас он не пугает, а в некотором смысле вдохновляет.

Интересным аспектом таких программ является также их возможная коммерциализация. Если первичные ряды данных (снимки Солнца, измерения потоков частиц и фотонов), в соответствии с принятой мировой практикой, как правило, открыты, то интеллектуальные продукты, получаемые в результате обработки этих данных, опять же, как правило, продаются. Таким продуктом может быть детальный прогноз радиационной обстановки, либо поправки в модели атмосферы, либо прогнозы по радиосвязи и прохождению радиоволн, наконец, различные мобильные приложения. В наше время, когда финансовую отдачу пытаются спрашивать уже чуть ли не со специалистов по космологии, данная тематика может частично снять остроту с этого вопроса в применении к астрофизике.

Насколько интересна обществу данная тема, можно частично судить по результатам работы центра космической погоды ФИАНА, созданного некоторое время назад и под-

