

Л. М. Зеленый, Г. М. Тамкович, А. А. Петрукович,
Г. Н. Застенкер, Н. А. Эйсмонт, М. И. Яновский, Л. С. Чесалин

Институт космічних досліджень РАН, Москва, Росія

**Российско-украинский проект
«Интербол-Прогноз» для исследования
системы солнечно-земных связей.
Высокоапогейный спутник «Интербол-3»**

Подается наукова программа супутника «Интербол-3».

ВВЕДЕНИЕ

Перспективный космический проект «Интербол-Прогноз» предлагается как продолжение и развитие весьма успешного международного проекта «Интербол», функционировавшего в 1995—2000 гг. [1] в рамках участия России и Украины в широкой международной кооперации по программе исследований космической погоды — ILWS. В состав проекта предлагается включить группу из двух-трех сравнительно небольших украинских спутников «Прогноз», находящихся на солнечно-синхронной орбите на высоте около 600 км, и российский спутник среднего класса «Интербол-3» с орбитой, позволяющей проводить исследования межпланетной среды и внешней магнитосферы.

Центральной задачей проекта является одновременное исследование широкого спектра проявлений солнечной активности (как «входных сигналов») и отклика на них в магнитосфере и ионосфере (как «результатирующих возмущений»).

В этом плане задачами спутника «Интербол-3» являются исследования разнообразных излучений Солнца (ультрафиолетового, рентгеновского и радиоизлучения), параметров межпланетной среды (плазмы солнечного ветра, магнитного поля, энергичных частиц) и аналогичных (но в более широком наборе) параметров внешней магнитосферы.

В настоящее время исследования по физике сол-

нечно-земных связей не только дают важные фундаментальные результаты, но и находятся в центре внимания из-за наблюдаемого влияния солнечной активности и земных магнитных бурь как на работоспособность современных технических систем, так и на биосферу, включая и человека [2—5]. Эти исследования подтвердили необходимость обеспечения прикладной информацией о космической погоде широкого круга отечественных потребителей в науке, народном хозяйстве, медицине и в других сферах. В связи с развитием средств космической связи и навигации, освоением северных территорий, осуществлением трансполярных перелетов гражданской авиации и пр. зависимость человечества от солнечно-космических факторов в будущем только усилится. Поэтому предлагаемая (как одна из задач проекта «Интербол-Прогноз») отработка методов комплексного мониторинга и прогнозирования солнечной, геомагнитной, авроральной и ионосферной активности является весьма перспективной и важной. Предыстория проекта подробно изложена в работе Г. М. Тамковича и др. [7].

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ВЫСОКОАПОГЕЙНОГО СПУТНИКА «ИНТЕРБОЛ-3»

Известно, что солнечная активность и связанные с ней явления в околоземном пространстве (напри-

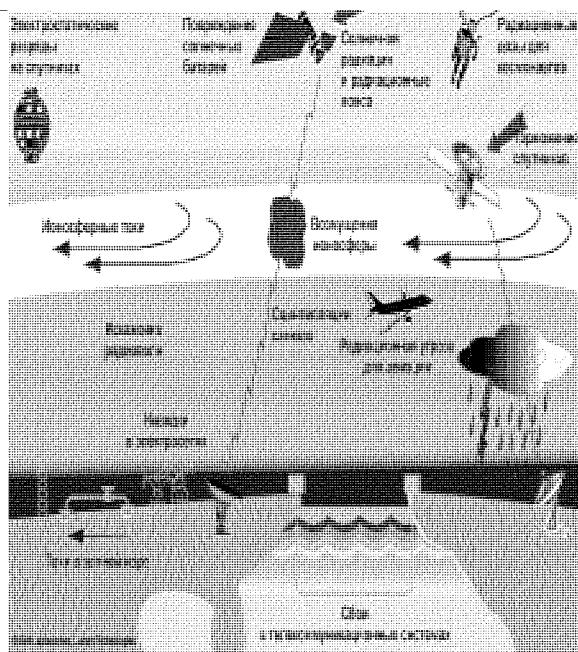


Рис. 1 Схема возможных воздействий солнечной активности на технические системы и человека

мер, магнитные бури) оказывают существенное влияние на системы связи и навигации, работоспособность космических аппаратов, на климат и состояние атмосферы Земли, на здоровье людей. Очень схематично совокупность этих воздействий представлена на рис. 1.

Реакцию земных процессов на солнечную активность принято называть космической погодой. В настоящее время в повестке дня стоят проблемы изучения закономерностей, своевременного предупреждения и адекватной оценки рисков такого солнечного влияния. Одним из стержневых направлений работ по космической погоде являются спутниковые наблюдения в солнечном ветре и в околоземном пространстве, позволяющие давать наиболее надежный оперативный прогноз («штормовое предупреждение») и мониторинг процессов преобразования энергии в геосфере [6]. В рамках реализации проекта «Интербол-Прогноз», на спутнике «Интербол-3» будут решаться следующие задачи:

- 1) практическая отработка методик и системы прогноза и мониторинга космической погоды в различных точках околоземного пространства;
- 2) продолжение фундаментальных исследований магнитосферы Земли и солнечно-земных связей, необходимых для улучшения качества прогноза;
- 3) измерения космического миллиметрового из-

лучения для ряда научных и прикладных задач.

Для наиболее полного выполнения задач проекта предполагается продолжить участие в международных программах исследований околоземного пространства и обмен научными данными в рамках международной кооперации. В то же время наличие собственных измерений солнечного ветра позволит сделать шаг к достаточной автономности российско-украинской системы прогноза космической погоды. Здесь следует подчеркнуть важность сохранения и развития сложившейся и весьма плодотворной научной и научно-технической кооперации в космических исследованиях весьма большого числа организаций Украины и России.

Прикладные задачи проекта по космической погоде. В рамках проекта предлагается провести исследование физических, методических и технических аспектов создания специализированных систем для мониторинга и прогноза солнечного воздействия на околоземное пространство — космической погоды. С этой целью планируется решить следующие задачи:

- выбор оптимального набора измеряемых параметров, например, вспышек солнечных рентгеновских лучей, потоков солнечных космических лучей (СКЛ), плотности и скорости ионов солнечного ветра, величины и направления межпланетного магнитного поля;
- исследование статистической достоверности измеряемых величин и прогноза в целом. Собственные вариации солнечного ветра и модификация потока солнечной энергии на границе магнитосферы Земли затрудняют выработку абсолютно надежного прогноза. Наряду с исследованием природы таких модификаций целесообразна разработка методики прогноза, носящей вероятностный характер;
- отработка блок-схемы специализированного измерительного комплекса, обеспечивающего гарантированное измерение и передачу параметров космического пространства. Следует отметить сложность передачи большого объема данных с больших расстояний при ограниченной пропускной способности радиолинии.
- отработка системы постоянной передачи, приема и обработки сигнала спутника в режиме реального времени;
- разработка оптимального орбитального сценария для будущих специализированных космических аппаратов.

Научные задачи проекта по исследованию солнечно-земных связей. В ходе исследований фундаментальных проблем физики солнечно-земных связей предполагается основное внимание уде-

лить ключевым областям магнитосферы, в которых происходит преобразование потока солнечной энергии в энергию магнитосферных и ионосферных возмущений:

Исследования характеристик солнечного ветра и его изменчивости. Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле (ММП) несут в себе отпечатки стационарных и транзиентных структур, содержащихся в солнечной короне, фотосфере и в солнечном магнитном поле. Поэтому поток солнечного ветра является наиболее важным агентом-переносчиком к Земле последствий всплесков солнечной активности. Помимо вариаций, имеющих солнечное происхождение, в солнечном ветре наблюдаются еще и собственные колебания, рождаемые на этапе его ускорения во внешней короне и во время его распространения. Наиболее интенсивные и опасные с практической точки зрения события связаны с выбросами солнечной корональной массы в межпланетное пространство.

К основным целям проекта в этой области можно отнести:

- исследования собственно изменчивости и структуры солнечного ветра и ММП;
- изучение воздействия солнечного ветра на магнитосферу.

В рамках международного разделения труда один из научно-исследовательских космических аппаратов всегда находится в солнечном ветре. Однако для проведения полноценных исследований предпочтительнее иметь данные одновременно с двух-трех аппаратов, что позволит получать информацию о характерных пространственных и временных масштабах и, главное, оценивать наклоны резких фронтов возмущений плазмы и ММП.

Исследования модификации потока солнечной плазмы и магнитного поля в магнитослое и на ударной волне. Известно, хотя и не всегда принимается во внимание, что магнитослой является интерфейсом между межпланетной средой и магнитосферой, поэтому на магнитопаузу как на границу магнитосферы воздействуют не собственно солнечный ветер и межпланетное магнитное поле, а плазма и поле, существенно измененные (модифицированные) в области магнитослоя и на ударной волне. Определение характера указанной модификации и количественная оценка изменений как плазмы, так и магнитного поля в магнитослое должны быть существенной частью исследований влияния солнечного ветра и ММП на магнитосферу. Как показали исследования на спутнике «Интербол-1», существующие модели лишь качественно совпадают с действительностью. Однако еще более серьезная проблема, как было особенно на-

глядно показано в этих исследованиях, связана с тем, что магнитослой является не только «трансформатором» возмущений, приходящих из межпланетной среды, но и «генератором» вариаций плазмы и магнитного поля, взаимодействующих потом с магнитопаузой. При этом рожденные в магнитослое вариации плотности плазмы и амплитуды магнитного поля, как правило, в несколько раз превышают одновременно наблюдающиеся вариации этих параметров в солнечном ветре.

Исследования процессов накопления и высвобождения энергии в геомагнитном хвосте. Энергия солнечного ветра аккумулируется на ночной стороне магнитосферы в геомагнитном хвосте. При умеренном потоке энергии в магнитосферу (характерном для магнитных суббурь), она начинает высвобождаться взрывным образом спустя некоторое время (порядка 1 ч) после внешнего возмущения.

Во время магнитных бурь интенсивность воздействия на магнитосферу и магнитный хвост такова, что процессы высвобождения и накопления энергии протекают практически одновременно, а геометрия магнитного хвоста существенно изменяется. Несмотря на то, что общая последовательность событий во время бурь и суббурь довольно хорошо изучена, остается большое количество невыясненных вопросов, имеющих принципиальное значение для задач, связанных с космической погодой. Так, в частности, в некоторых случаях сброс накопленной энергии из хвоста к Земле принимает взрывообразный периодический характер (последовательность суббурь), а в некоторых событиях он имеет стационарный характер (интервалы усиленной конвекции без суббурь). Доля энергии солнечного ветра, попадающая во внутреннюю магнитосферу, и поэтому наиболее важная практически, критически зависит от конкретного сценария развития магнитосферной конвекции.

Можно выделить три ключевых области магнитного хвоста, которые будут подробно исследованы в проекте «Интербол-3».

1. Область перехода от дипольных к вытянутым силовым линиям (40 000—70 000 км). Именно здесь энергия солнечного ветра посредством инъекций плазмы проникает непосредственно во внутреннюю магнитосферу.

2. Область ближнего хвоста (20 000—700 000 км). На этом удалении от Земли комбинация различных факторов делает наиболее вероятным и успешным развитие неустойчивостей, инициирующих процесс взрывообразного высвобождения энергии.

3. Область среднего хвоста (200 000—400 000 км). По современным представлениям, именно эта об-

ласть плазменного слоя хвоста заполняется частицами солнечного ветра, которые, ускоряясь, поступают ближе к Земле, и в конечном счете определяют наполнение магнитосферы горячей плазмой. Здесь также поддерживается естественный квазистационарный процесс пересоединения магнитных силовых линий, в ходе которого выделяется накопленная в хвосте энергия. Когда интенсивность этого процесса оказывается недостаточной, ситуация развивается по взрывному сценарию.

Исследования внутренней магнитосферы. В ходе магнитных бурь, связанных со всплесками солнечной активности, энергия солнечного ветра, как накопленная в геомагнитном хвосте, так и непосредственно поступающая из межпланетного пространства, попадает во внутреннюю магнитосферу Земли.

Традиционно к внутренней магнитосфере относят область с дипольными силовыми линиями земного магнитного поля вплоть до ионосферы (высоты до 60000 км). Увеличение числа энергичных частиц на этих силовых линиях приводит к модификации магнитного поля Земли, к прямым высыпаниям частиц в ионосферу и к возбуждению низкочастотных пульсаций. В отличие от высокоширотных возмущений, генерируемых в удаленных областях магнитосферы, возмущения, связанные с процессами во внутренней магнитосфере, воздействуют также и на умеренные и низкие широты и, соответственно, носят глобальный характер.

Несмотря на важность подробных измерений в этой области магнитосферы, до сих пор не накоплено достаточного количества экспериментальных данных, позволяющих количественно описать процессы накопления и диссипации энергии. Проведение надежных измерений энерго-угловых распределений энергичных частиц и магнитного поля, планируемое в проекте «Интербол-3», позволит уточнить причинно-следственные связи событий в этой критически важной области магнитосферы.

Исследования естественного фона миллиметрового излучения. В ходе проекта, в рамках фундаментальных работ по изучению физики как околоземного, так и удаленного космического пространства, планируется проведение с борта КА измерений степени пространственной анизотропии и величины поляризации излучения в миллиметровом диапазоне длин волн. Научная аппаратура, устанавливаемая на борту КА для проведения этого эксперимента, представляет собой комплекс сверхвысокочастотных радиометров, снабженных узконаправленными антеннами и измерителями степени поляризации принятого сигнала.

ОРБИТАЛЬНЫЙ СЦЕНАРИЙ ПРОЕКТА

Предлагаемая научная программа не может быть выполнена на простой кеплеровской орбите искусственного спутника Земли и требует составления сложного орбитального сценария. Для наиболее полных исследований по тематике космической погоды КА должен находиться в солнечном ветре впереди Земли, (например, в точке либрации L1). Для исследований магнитосферы наиболее подходят высокоапогейные эллиптические орбиты.

Представляется оптимальным следующий вариант орбитального сценария (см. рис. 2).

I этап. Перелет космического аппарата к передней точке либрации (L1) и возврат к Земле. Общая длительность этапа составляет несколько месяцев. Основная задача первого этапа — проведение научных и технологических исследований по тематике космической погоды: отработка режимов вывода аппарата на орбиту к точке L1, проведения сеансов связи с Землей с целью управления и передачи данных. Также будут производиться постоянные измерения солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и потоков солнечных энергичных частиц.

II этап. Переход аппарата на орбиту высокоапогейного спутника с низким наклоном и длительное функционирование на ней. Приоритет на этой орбите отдается измерениям в магнитосфере Земли и солнечном ветре. Оптимальное сочетание времени нахождения спутника в солнечном ветре и ключевых областях магнитосферы (в хвосте магнитосферы в пределах удаления до 180 000 км от линии Земля — Солнце) может быть получено на орбите с апогеем около 400 000 км и периодом около 11 дней. Достоверные измерения СВЧ-излучения на такой орбите возможны примерно в течение 50 % времени.

III этап. При наличии резерва топлива на борту на заключительном этапе проекта возможен перевод аппарата на гало-орбиту вокруг задней точки либрации L2, наиболее удобную для измерений СВЧ-излучения с низким уровнем помех. На этой орбите представляет интерес также измерение параметров солнечного ветра и ММП Земли на большом удалении позади Земли («очень дальний хвост»).

ТРЕБОВАНИЯ К КОСМИЧЕСКОМУ АППАРАТУ

Проведение эксперимента по исследованию космической плазмы налагает на конструкцию используемого космического аппарата ряд специфических требований, а именно:

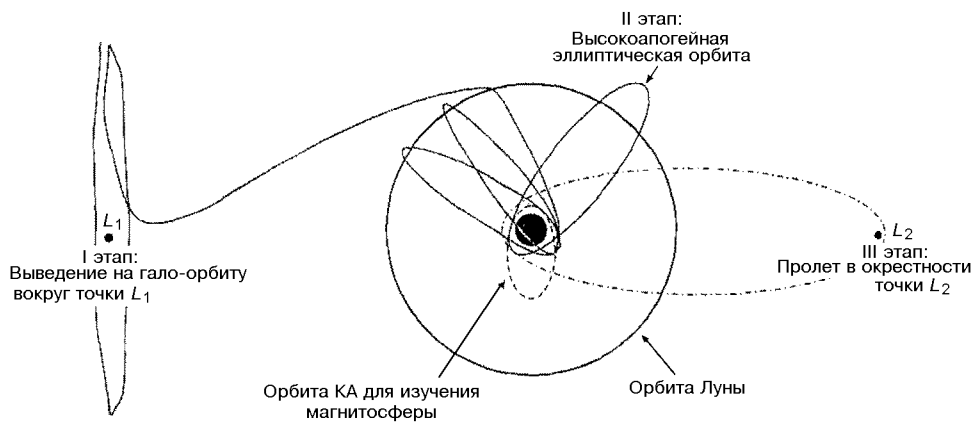


Рис. 2. Орбитальный сценарий для спутника «Интербол-3»

1) КА должен обеспечивать требуемое размещение научной аппаратуры, электропитание, управление и передачу данных измерений;

2) КА должен быть стабилизирован вращением вокруг оси, направленной на Солнце с точностью не хуже 10° . Оптимальный период вращения — 10—30 с. Знание ориентации: не хуже 0.5° ;

3) КА должен удовлетворять требованиям по магнитной чистоте и электромагнитной совместимости (аналогичным требованиям к КА «Интербол»);

4) КА должен быть снабжен двумя или четырьмя раскрывающимися штангами в плоскости, перпендикулярной к оси вращения. Длина штанг должна быть не менее 5 м. Штанги предназначены для размещения датчиков магнитного и электрического полей.

Модельный комплект научной аппаратуры проекта включает в себя:

- феррозондовый магнитометр (два датчика),
- анализатор потока ионов солнечного ветра,
- солнечный рентгеновский фотометр,
- спектрометры тепловых ионов и электронов,
- спектрометр энергичных ионов и электронов,
- детектор солнечных космических лучей,
- система сбора информации и управления научной аппаратурой,
- электрометр,
- анализатор спектров плазменных волн,
- детектор холодной плазмы,
- спектрометр солнечного ветра,
- анализатор ионного состава плазмы,
- комплекс радиометров миллиметрового диапазона,
- система сбора, запоминания и бортовой обработки научной информации, являющаяся «интеллектуальным развитием» системы ССНИ, успешно работавшей в проекте «Интербол».

Вес полного набора аппаратуры составит около 120—150 кг, потребление энергии около 160 Вт.

В настоящее время рассматривается несколько возможных вариантов конструкции КА на основе новой базовой платформы с использованием современных технологий. Предполагается, что запуск КА может быть осуществлен готовой связкой РН «Союз» с РБ «Фрегат» или разрабатываемой в настоящее время системой на основе конверсионного РН «Днепр» и специального РБ.

Следует еще остановиться на возможностях управления аппаратом и приема научной и служебной информации. Наиболее подходящим решением этой непростой (с учетом больших расстояний до аппарата) задачи явилось бы использование Центра дальней космической связи в г. Евпатория (рис. 3). Тем более, что этим Центром накоплен богатый опыт по непрерывной и весьма успешной работе в течение 1995—2000 гг. с двумя спутниками проекта «Интербол».

ВЫВОДЫ

Предполагается, что проект «Интербол-Прогнос» будет реализован при значительном участии предприятий и организаций России и Украины в изготовлении научной аппаратуры, проведении сеансов связи из Центра дальней космической связи в г. Евпатория. Неотъемлемой частью проекта является также его низкоорбитальный сегмент, состоящий из 2-3 микроспутников, полностью реализуемый украинской стороной. В сочетании с планируемыми наблюдениями Солнца с борта научной космической обсерватории «Коронас-Фотон» и наземными измерениями такой перспективный проект по тема-



Рис. 3. Одна из антенных систем Центра дальней космической связи в г. Евпатория

тике солнечно-земных связей станет основой полноценной программы исследований по космической погоде (рис. 4).

Разработки российских и украинских ученых и специалистов показали, что в настоящее время есть уникальная возможность приблизительно за три года осуществить подготовку и начать одновременную работу всей системы спутников проекта. Необходимо отметить, что ранее советские и российские КА не работали на орбитах в точках либрации, и предстоит впервые решить задачи вывода КА в окрестности точки, управления и приема телеметрии с такой орбиты. Нарработка подобного опыта будет иметь большое значение как для развития космонавтики в целом, так и для реализации последующих проектов (точки либрации являются приоритетными местами размещения ряда перспективных астрофизических и прикладных КА). В настоящее время спутник «Интербол-3» как составная часть проекта «Интербол-Прогноз» предложен для включения в новую федеральную космическую программу России.

Перспективная система прогноза и мониторинга космической погоды



1. Спутниковые наблюдения Солнца «Коронас-Фотон»
2. Мониторинг солнечного ветра и магнитосферы «Интербол-3»
3. Спутниковый мониторинг ионосферы «Прогноз» (ИКАУ)
4. Наземные наблюдения

Рис. 4. Схема наблюдений и прогноза космической погоды

362.

2. Гальперин Ю. И., Дмитриев А. В., Зеленый Л. М., Панасюк М. И. Влияние космической погоды на безопасность авиационных и космических полетов // Полет.—2001.—№ 1.—С. 27.
3. Петрукович А. А., Климов С. И. Использование измерений солнечного ветра для анализа и прогноза геомагнитной активности // Космич. исслед.—2000.—№ 5.—С. 463.
4. Петрукович А. А., Зеленый Л. М. В объятиях Солнца // Наука и жизнь.—2001.—№ 7.—С. 2.
5. Петрукович А. А., Зеленый Л. М. У природы есть и космическая погода // Наука и жизнь.—2001.—№ 10.—С. 57.
6. Петрукович А. А., Зеленый Л. М. Прогноз погоды XXI века // Наука и жизнь.—2002.—№ 5.—С. 2.
7. Тамкович Г. М., Зеленый Л. М., Петрукович А. А. Перспективный российско-украинский проект «Интербол-Прогноз», возможности и реалии // Полет.—2002.—№ 5.—С. 14.

THE RUSSIAN-UKRAINIAN PROJECT “INTERBOL-PROGNOZ” FOR THE INVESTIGATION OF SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS. THE HIGH-APOGEE SATELLITE “INTERBOL-3”

*L. M. Zelenyi, G. M. Tamkovich, A. A. Petrukovich,
G. N. Zastenker, N. A. Eismont, M. I. Yanovskii,
and L. S. Chesalin*

The scientific program of the satellite “Interbol-3” is presented.

1. Галеев А. А., Гальперин Ю. И., Зеленый Л. М. Проект ИНТЕРБОЛ по исследованиям в области солнечно-земной физики // Космич. исслед.—1996.—34, № 4.—С. 339—