

УДК 523.9

## Солнечные и гелиосферные космические проекты

*В.Д. Кузнецов*

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия, 142190  
*kvd@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 29 октября 2013 г.

**Аннотация.** Дается краткий обзор состояния и перспектив космических исследований в области гелиофизики. На смену действующим космическим аппаратам Hinode, SDO, STEREO и т. д. готовятся новые космические миссии Interhelioprobe, Solar Orbiter, Solar Probe Plus и т. д., направленные на наблюдения Солнца с близких расстояний и из внеэклиптических положений, на локальные измерения вблизи Солнца и вне плоскости эклиптики. Планируемые наблюдения и их координация в этих миссиях позволят изучить структуру и динамику магнитных полей в приполярных зонах Солнца и углубить наше понимание механизма солнечного динамо и солнечного цикла, изучить процессы нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра, ответить на ряд других актуальных вопросов гелиофизики.

SOLAR AND HELIOSPHERIC SPACE PROJECTS, *by V.D. Kuznetsov.* The paper provides a review of the state of the art and prospects of space researches in heliophysics. The currently operating space missions (Hinode, SDO, STEREO, etc.) are prepared to be replaced by new ones, such as the Interhelioprobe, Solar Orbiter, Solar Probe, etc. aimed at observing the Sun from the close distances and from out-of-ecliptic positions, as well as at conducting in-situ measurements in the vicinity of the Sun and outside the ecliptic plane. The planned coordinated observations within the frames of these missions will allow us to explore the structure and dynamics of magnetic fields in the polar regions of the Sun, to study the mechanisms of the solar dynamo and solar cycle, to gain a deeper insight into the process of heating of the solar corona and solar wind acceleration, and to get a response to a number of other pressing issues of heliophysics.

**Ключевые слова:** физика Солнца, гелиофизика, космические исследования

---

### 1 Введение

С именем Андрея Борисовича Северного связана целая эпоха в изучении Солнца. Созданная им Крымская астрофизическая обсерватория была центром солнечных исследований, и она способствовала развитию этих исследований в СССР. Наряду с созданием наземных средств наблюдений Солнца здесь зарождались идеи первых солнечных космических проектов, которые в настоящее время занимают центральное место в изучении Солнца и дают большую часть новых результатов. За последние годы реализована целая серия весьма успешных солнечных и гелиосферных космических проектов, которые заметно улучшили наше понимание физики Солнца и гелиосферы или как сегодня говорят – гелиофизики.

## 2 Солнечные и гелиосферные космические проекты

Таблица 1 иллюстрирует состояние космических исследований по гелиофизике за последние годы. С 1991 года, начиная с проекта Yohkoh, наступила эра новых космических проектов в изучении Солнца с использованием ССD-матриц, которая была продолжена в течение последующих лет, в результате чего были выполнены наблюдения Солнца с высоким пространственным разрешением, позволившие существенно продвинуться в понимании структуры и динамики солнечной атмосферы и происходящих там процессов. Обзор некоторых результатов, полученных в рамках солнечных космических проектов, приведен в (Кузнецов, 2009; Кузнецов, 2010). Детально ознакомиться с результатами исследований по солнечным космическим проектам можно в специальных статьях и изданиях, посвященных этим проектам.

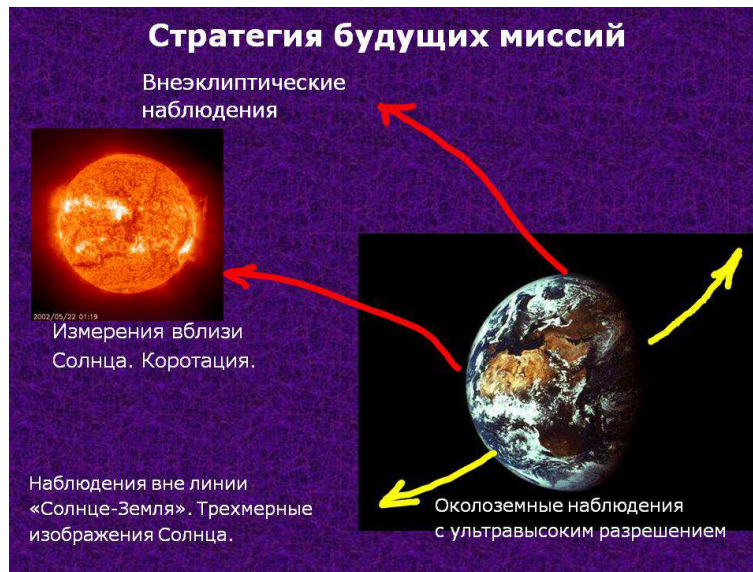
**Таблица 1.** Перечень основных солнечно-гелиосферных проектов за последние годы (в скобках указаны годы запуска или работы на орбите)

Стадия реализации	Проекты
Завершенные	Voyager-1,2 (1977), Yohkoh (1991–2001), КОРОНАС-И (1994–2001), ULYSSES (1990–2009), TRACE (1998–2010)
Действующие	SOHO (1996), КОРОНАС-Ф (2001–2005), RHESSEI (2002), Hinode (2006), STEREO (2006), IBEX (2008), КОРОНАС-ФОТОН (2009), SDO (2010), HI-C (2012), IRIS (2013)
В стадии подготовки	SOLAR PROBE+ (2018), SOLAR ORBITER (2018), “Интергелиозонд” (2020)
В стадии разработки	POLARIS, Solar Polar Orbiter, АРКА, SPORT

В последние десятилетия в осуществлении солнечных космических миссий реализуется представленная на рис. 1 концепция, согласно которой изучение нерешенных проблем в изучении Солнца (солнечное динамо и солнечный цикл, механизмы нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра и т. д.) возможно на основе новых данных о Солнце и солнечной короне, для получения которых необходимы наблюдения с высоким пространственным разрешением за счет сближения с Солнцем или за счет наблюдения с околоземных орбит телескопами сверхвысокого разрешения, также необходимы локальные измерения плазменных параметров вблизи Солнца и наблюдения магнитных полей и движений плазмы в приполярных областях Солнца.

Наблюдения солнечной атмосферы со сверхвысоким пространственным разрешением с околоземных орбит совсем недавно были реализованы в ракетных экспериментах с приборами Hi-C (High Resolution Coronal Imager – Корональный телескоп высокого разрешения) и IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph – Телескоп-спектрограф переходной области).

Телескоп Hi-C (<http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/hic2013.html>) был запущен в июле 2012 года метеорологической ракетой на высоты до 283 км. За время полета около 10 мин было получено 165 изображений большой активной области на длине волны 19.3 нм ультрафиолетового диапазона с пространственным разрешением в 150 километров на солнечной поверхности, что в шесть раз превышало пространственное разрешение телескопов на существующих орбитальных космических аппаратах. Наблюдения показали наличие в солнечной короне тонких магнитных жгутов – скрученных и переплетенных магнитных трубок, а также мощных вспышек ультрафиолетового излучения, которые группируются вдоль силовых линий магнитного поля, имеют характерные размеры до 700 км, длительность свечения до 25 сек и энергетику порядка 10<sup>31</sup> эрг. Эти наблюдения соответствуют механизму нагрева короны, предложенному Паркером (1988) – скручиванию и переплетению магнитных силовых линий движениями их концов на фотосфере с образованием сложной топологии магнитного поля и последующими множественными процессами пересоединения силовых линий магнитного поля, сопровождающимися преобразованием магнитной энергии в



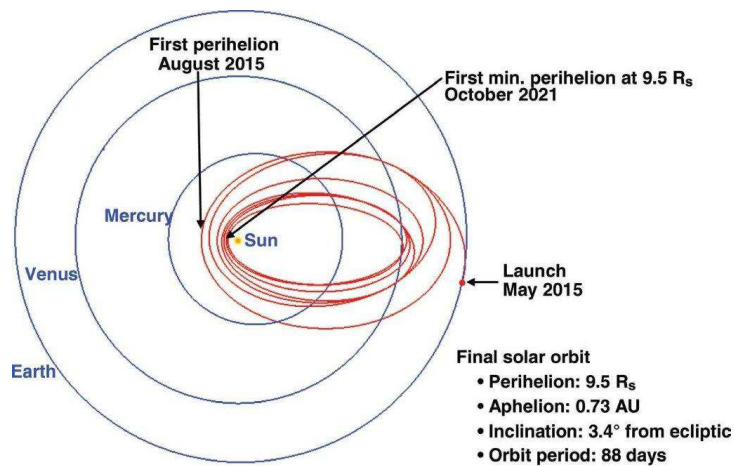
**Рис. 1.** Стратегия современных солнечных космических миссий

тепловую энергию плазмы. Оценки энергетического потока, связанного с наблюдаемыми телескопом Hi-C явлениями, показали его достаточность для нагрева короны до 4 млн град.

Ультрафиолетовый многоканальный телескоп-спектрограф переходной области IRIS (Interface Region Imaging Spectrograph, [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/iris](http://www.nasa.gov/mission_pages/iris)), предназначенный для изучения переноса энергии в корону и солнечный ветер, был запущен 28 июня 2013 г. Его пространственное разрешение 1/3 угловых сек, временное – 1 сек. Первые наблюдения позволили обнаружить множество тонких магнитных нитей с большим разбросом плотностей и температур в них, а также быстро вспыхивающие и гаснущие вспышки, отражающие перенос энергии в солнечной атмосфере. Среди задач, которые предполагается решать в этом эксперименте, – изучение различных типов нетепловой энергии, которые могут преобладать в хромосфере и вне ее, изучение процессов в хромосфере, которые регулируют перенос массы и энергии в корону и гелиосферу, изучение процессов всплывания магнитных потоков и переноса массы через нижнюю атмосферу и роли всплывания магнитных потоков в инициировании вспышек и выбросов массы.

Из недавних результатов в области гелиофизики следует отметить измерения запущенных в 1977 году КА Voyager-1, 2, которые находятся вблизи границ Солнечной системы и призваны дать ответ на вопрос о том, правильно ли мы понимаем строение области перехода между гелиосферой и межзвездной средой – наличие гелиопаузы, двух ударных волн и пространства между ними. В августе 2012 г. КА Voyager-1 наблюдал значительный спад плотности потоков солнечных частиц и сопровождающий его большой скачок интенсивности высокоэнергетических галактических космических лучей, и это интерпретировалось как выход КА за пределы Солнечной системы. Однако затем последовали утверждения, что измерения Voyager-1 не подтверждают ни одну из моделей области перехода, и области, в которых находился КА, были непонятны. Переход через границы занял всего несколько дней, что не согласуется с существующими моделями. Не наблюдалась смена знака магнитного поля – от солнечного к галактическому, и многие другие данные измерений были непонятны. На сегодняшний момент на основе анализа данных делается заключение о том, что КА Voyager-1 вышел за пределы Солнечной системы год назад. Поведение магнитного поля связано с пересоединением в области перехода (как для магнитосферы Земли и планет), когда образуются магнитные острова и направление поля может менять знак, и в этих магнитных островах могут захватываться как солнечные, так и галактические частицы, создавая сложную картину для интерпретации измерений.

По данным наблюдений околоземного КА IBEX (Interstellar Boundary Explorer, <http://solarsystem.nasa.gov/missions/>) с помощью регистрации изображений энергичных нейтральных атомов на границе Солнечной системы установлено, что при своем движении в межзвездной среде гелиосфера оставляет за собой хвост подобно кометам и хвостам магнитосфер планет при их обтекании солнечным ветром. Нейтральные атомы не отклоняются гелиосферным магнитным полем, и возникающее при их столкновениях с другими частицами излучение, регистрируемое IBEX, непосредственно отражает происходящие с ними процессы. Зарегистрированы также два потока заряженных частиц, выходящие из полюсов Солнечной системы, и еще два потока, которые выходят по бокам. Пока не удалось установить протяженность хвоста гелиосферы. Локальные измерения вблизи Солнца в рамках представленной на рис. 1 стратегии предполагается реализовать в проекте Solar Probe Plus (<http://solarprobe.gsfc.nasa.gov/>), а также частично в проектах Solar Orbiter (<http://www.orbiter.rl.ac.uk/>, [http://www.esa.int/esaSC/120384\\_index\\_0\\_m.html](http://www.esa.int/esaSC/120384_index_0_m.html)) и “Интергелиозонд” (Кузнецов, 2012) (<http://www.izmiran.ru/projects/INTERHELIOPROBE/>).



**Рис. 2.** Баллистическая схема сближения КА Solar Probe Plus (NASA) с Солнцем

Баллистическая схема сближения КА Solar Probe Plus с Солнцем показана на рис. 2. За счет многократных гравитационных маневров у Венеры КА приблизится к Солнцу на расстояние в 9.5 солнечных радиусов, наклон орбиты к плоскости эклиптики составит всего 3.4°. Ставятся задачи за счет наблюдений и измерений вблизи Солнца определить процессы ускорения и источники быстрого и медленного солнечного ветра в максимуме и минимуме солнечной активности; определить источники и потоки энергии, которые нагревают корону; отождествить механизмы ускорения и источники энергичных частиц, определить роль плазменной турбулентности и пылевой плазмы в генерации солнечного ветра и энергичных частиц. Комплекс научной аппаратуры включает приборы для локальных измерений (быстрый ионный анализатор, два быстрых электронных анализатора, анализатор ионного состава, прибор для регистрации энергичных частиц, магнитометр, плазменно-волновой прибор, гамма и нейтронный спектрометр, пылевой детектор) и гелиосферный телескоп белого света.

Наблюдения в приполярных областях Солнца, в рамках изображенной на рис. 1 концепции, предполагается осуществить в проектах Solar Orbiter и “Интергелиозонд”, которые будут иметь КА на близких рабочих орбитах с наклоном к плоскости эклиптики около 30 град. (см. рис. 3). Эти проекты разрабатываются в России и в Европейском космическом агентстве. Основные задачи связаны с изучением полярных и экваториальных областей с высоких гелиоширот – изучение полярных магнитных полей, движений плазмы и солнечного динамо, эклиптической короны и гелиоширотной

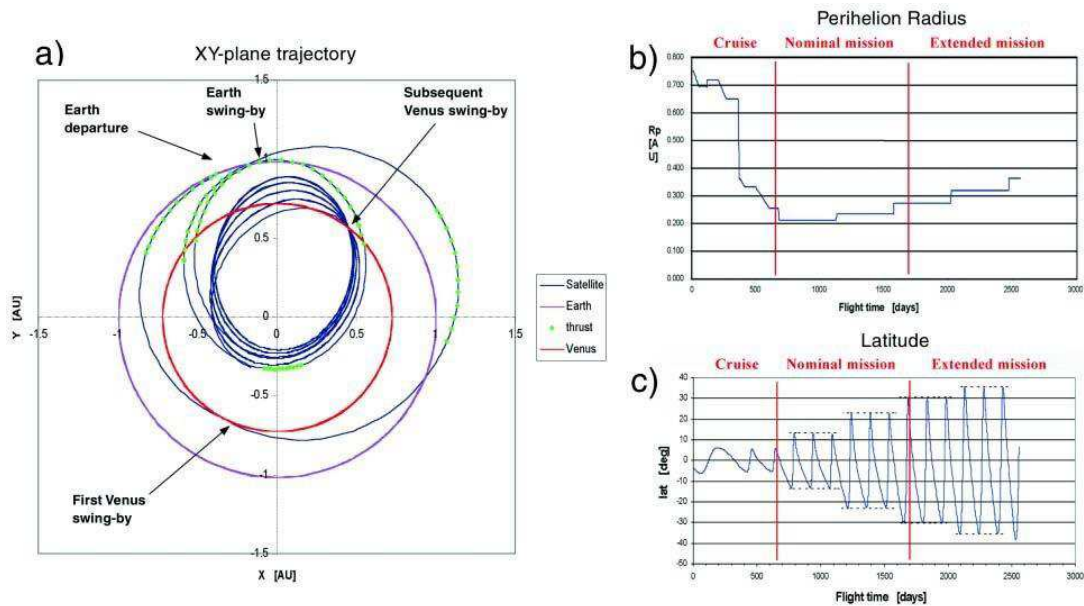


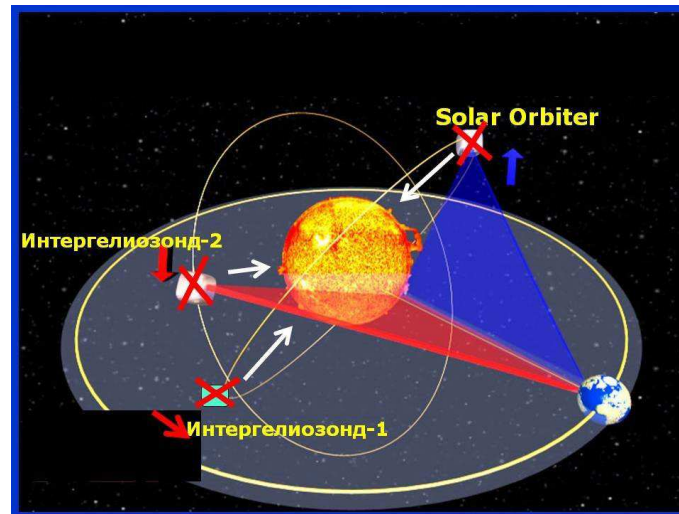
Рис. 3. Баллистическая схема формирования рабочих орбит КА Solar Orbiter (ESA)

структуры выбросов массы; с изучением механизмов нагрева короны и ускорения солнечного ветра, триггерных механизмов вспышек и выбросов массы, механизмов ускорения частиц на Солнце и в гелиосфере; с изучением источников солнечного ветра на Солнце и связи солнечных транзитных явлений с изменениями гелиосферы. Состав приборов включает два основных блока: приборы дистанционных наблюдений атмосферы Солнца (магнитограф, рентгеновские телескопы и спектрометры, коронограф, гелиосферный телескоп) и приборы для локальных гелиосферных измерений основных параметров (детекторы ионов и электронов солнечного ветра, детекторы плазмы солнечного ветра и пыли, магнитно-волновой комплекс, магнитометр, телескоп энергичных частиц, детекторы нейтронов, радиоспектрометр).

Два КА “Интергелиозонд” предполагается разместить на гелиоцентрических орбитах таким образом, чтобы обеспечить непрерывность внеэклиптических наблюдений Солнца (см. рис. 4) – разделение КА на наклоненных в разные стороны орбитах на четверть периода. В этом случае КА будут сменять друг друга над плоскостью эклиптики. Для кооперации с КА Solar Orbiter оптимальным будет размещение его с противоположной стороны по отношению к одному из КА “Интергелиозонда”, как показано на рис. 4.

В китайском проекте SPORT (Solar Polar ORbit Telescope) КА подобно орбите КА ULYSSES за счет гравитационного маневра у Юпитера перейдет на гелиоцентрическую внеэклиптическую орбиту и будет изучать солнечные магнитные поля на высоких широтах, высокоскоростной солнечный ветер и распространение выбросов массы от Солнца до Земли. Предполагаемый состав научной аппаратуры включает телескоп крайнего ультрафиолетового диапазона (121.6 нм), магнитограф, коронограф, гелиосферный телескоп, радиотелескоп апертурного синтеза, анализатор солнечного ветра, магнитометр, детектор радио- и плазменных волн, детектор энергичных частиц.

С использованием технологии солнечного паруса разрабатываются проекты размещения КА на гелиоцентрические орбиты (около 0.5 а. е.) с высоким наклоном (около  $75^\circ$ ) – Solar Polar Orbiter (<http://sci.esa.int/trs/36025-the-solar-polar-orbiter/>) и Polaris (Polar Investigation of the Sun). В этих проектах в качестве основных целей ставятся исследования полярных областей Солнца – их магнитных полей, поверхностных и подфотосферных движений, ответственных за динамо и солнечный цикл; исследования полярной короны, гелиодолготной и трехмерной структуры короны



**Рис. 4.** Баллистическая схема двух КА “Интергелиозонд” и оптимальный вариант баллистической координации наблюдений с КА Solar Orbiter

и выбросов массы; солнечной радиации как функции гелиошироты, а также свойств полярного солнечного ветра и энергичных частиц и их связи с корональными структурами.

В российском проекте “АРКА” предполагаются наблюдения Солнца с высоким пространственным разрешением (доли угл. сек.) с околоземной орбиты для решения задач нагрева солнечной короны, изучения солнечных вспышек разных масштабов и энерговыделений, для изучения тонкой структуры и динамики магнитных полей солнечной атмосферы. Этот проект будет дальнейшим развитием технологии изображающей рентгеновской спектроскопии, реализованной в проектах серии КОРОНАС (КОРОНАС-И, КОРОНАС-Ф, КОРОНАС-ФОТОН).

### 3 Заключение

Координация научных программ различных гелиофизических космических миссий осуществляется в рамках программы ILWS – International Living with a Star (<http://ilwsonline.org/>) с целью получения наиболее важной и всесторонней информации при их реализации. Солнечно-гелиосферные космические проекты продолжают оставаться важнейшим источником информации о Солнце и гелиосфере, дополняя столь же важные и обширные данные наземных наблюдений.

### Литература

- Кузнецов В.Д. // Космические исследования Солнца. Сборник статей “Пятьдесят лет космических исследований”. М. Физматлит. 2009. С. 60.  
 Кузнецов В.Д. // Космические исследования Солнца. УФН. 2010. Т. 180. № 9. С. 988.  
 Кузнецов В.Д. // Научные задачи проекта “Интергелиозонд”. В сборнике “Проект Интергелиозонд”. Труды рабочего совещания, Таруса. 11–13 мая 2011 г./ Ред. Кузнецов В.Д. Москва. 2012. С. 5.  
 Паркер (Parker E.N.) // Astrophys. J. 1988. V. 330. P. 474.