

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И МОНИТОРИНГА СОЛНЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

С.А. Богачев

Институт космических исследований РАН

bogachev.sergey@gmail.com

Исследования Солнца и солнечно-земных связей являются одним из основных направлений современной космической деятельности. В настоящий момент на околоземной орбите и в межпланетном пространстве работают сразу несколько космических обсерваторий соответствующего назначения, в том числе обсерватория SDO (Solar dynamics observatory; НАСА), обсерватория SoHO (Solar and Heliospheric Observatory; Европейское космическое агентство), обсерватория Hinode (Япония), обсерватория Solar orbiter (Европейское космическое агентство), две обсерватории STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory; НАСА) (некоторые примеры – [1,2]). В совокупности они обеспечивают практически непрерывный мониторинг солнечной активности в мягком рентгеновском, крайнем УФ и оптическом диапазонах, где лежит основное излучение поверхности и короны Солнца, а также проводят измерения магнитного поля Солнца. Также наблюдения Солнца с прикладными задачами реализуются на некоторых метеоспутниках, среди которых особое значение имеет группировка GOES (NOAA; США). Приборы гелиофизического назначения, хотя пока и в ограниченном количестве, размещаются также на аппаратах серии «Электро» и «Метеор», создаваемых в интересах Росгидромета.

Учитывая огромные объемы информации, поступающей с использованием соответствующих средств (одна только обсерватория SDO ежедневно формирует не менее 2 Тбайт первичных цифровых данных), существенное значение приобретают методы обработки данных и связанные с ними математические модели. Наибольшее прикладное значение имеют модели прогноза солнечных вспышек и выбросов массы (как наиболее крупных проявлений солнечной активности), а также модели предсказания характеристик солнечного ветра. Кроме того, даже при точном прогнозировании событий солнечной активности и параметров ветра, возникает задача предсказания отклика земного магнитного поля на соответствующее воздействие. В результате возникает набор связанных проблем, объединенных общей темой солнечно-земных связей, которые в общем виде пока далеки от решения.

Для прогнозирования солнечных вспышек ключевое значение имеют наблюдения магнитного поля Солнца. В основном, измерения магнитного поля осуществляются методом спектрального исследования уширения линий солнечного спектра под действием эффекта Зеемана. В настоящее время достоверно измерять удается магнитное поле только на поверхности Солнца (при этом вертикальная компонента поля измеряется много более точно, чем поперечная). В то же время основная энергия для солнечной активности копится выше, в короне Солнца. По этой причине существенное значение имеют модели расчета магнитного поля в солнечной короне по наблюдениям поля на поверхности. Для этого широко применяется потенциальное приближение, которое дает достоверные результаты, однако плохо применимо для прогноза вспышек, поскольку вспышки возникают исключительно в непотенциальных магнитных конфигурациях. Для решения этой проблемы применяются различные приближения о распределении электрического поля в короне; например, часто используется предположение, что токи в короне текут

вдоль линий поля, то есть вектор j параллелен вектору B . В то же время уже в данном простейшем приближении возникает неопределенность в коэффициенте пропорциональности между j и B , то есть моделирование осуществляется заведомо неточно. В более сложных предположениях о структуре тока в короне, неопределенность еще более возрастает. Это лишь одна из сложностей, с которыми сталкивается современный прогноз вспышек и выбросов. Пример трехмерной структуры магнитного поля Солнца, восстановленной в потенциальном приближении, показан на рисунке 1.

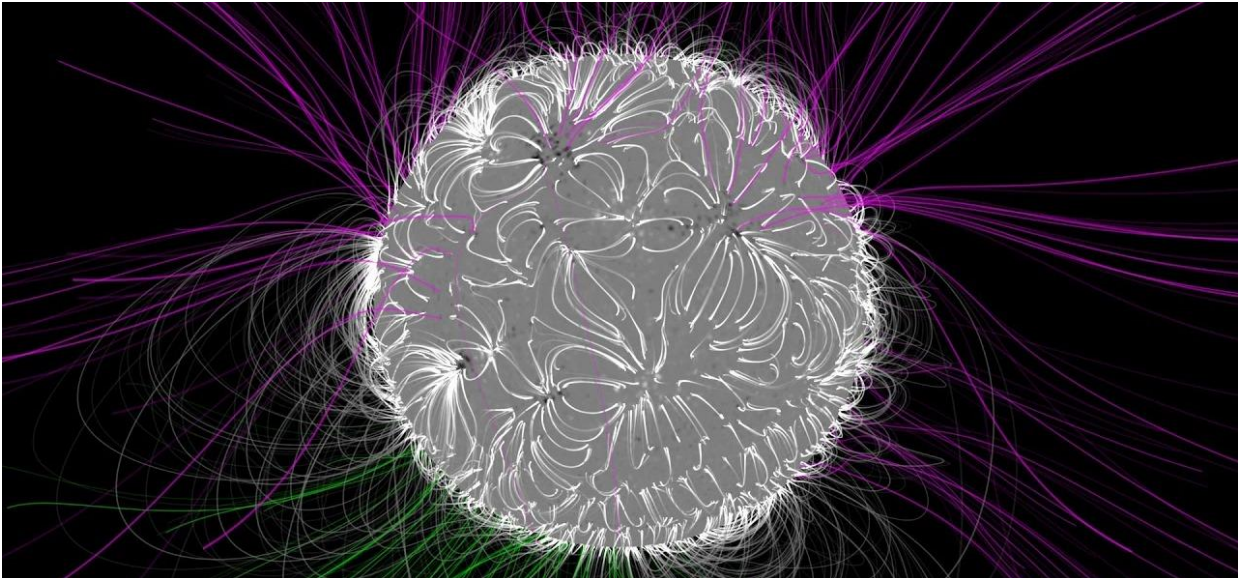


Рисунок 1 – Пример восстановления трехмерного магнитного поля Солнца в потенциальном приближении (использован метод PFSS)

Существенный прогресс, в настоящее время, достигнут в прогнозировании скорости солнечного ветра. Установлены экспериментально подтвержденные корреляции между особенностями магнитного поля Солнца и распределением скорости солнечного ветра, которые позволяют прогнозировать скорость на уровне достоверности около 80 процентов. В то же время, данная цифра почти не изменилась за последнее десятилетие, так как упирается в фундаментальное ограничение – мы видим лишь половину солнечной сферы, в то время как в формировании солнечного ветра участвует магнитное поле всего Солнца. Кроме того, наблюдениям магнитного поля мешают эффекты проекции: по этим причинам крайне трудно измерять поле у полюсов Солнца.

Среди перспективных направлений прогноза можно отметить попытки выявить предвестники вспышек в виде всплесков излучения в тех или иных диапазонах, либо в виде каких-то характерных изменений структуры центра активности перед вспышкой. Применяются аналитические методы, подключаются нейронные сети. В то же время радикально улучшить прогноз таким способом пока не получается.

Одной из причин медленного роста точности прогноза является, судя по всему, недостаток экспериментальных данных. Похожая ситуация была в свое время в метеорологии, когда значительный рост точности прогноза стал возможен только после радикального расширения средств наблюдения, в том числе массового использования доплеровских метеорологических радиолокаторов, а также за счет резкого увеличения сети метеоспутников. Скорее всего, такой же этап предстоит пройти в ближайшие 2-3 десятилетия солнечной физике. При этом значительную

роль в этом процессе должны сыграть малые аппараты, поскольку возможности расширения группировок за счет крупных обсерваторий серьезно ограничены. Как пример, можно привести обсерваторию RHESSI, являвшуюся долгое время надежным источником данных по наблюдениям Солнца в жестком рентгеновском диапазоне, но завершившую свою работу несколько лет назад, после чего этот источник данных просто исчез. Лишь недавно после запуска обсерватории ASO-S (Китай), на орбите снова появился жесткий рентгеновский телескоп, но доступ к его данным пока ограничен. В настоящее время проекты малых аппаратов для научных применений разрабатываются в нескольких странах (см., например, [3,4]). Основной задачей при этом является не только разработка платформы, но и разработка миниатюризированной аппаратуры, способной работать в условиях ограничений на массу и энергопотребление, которые накладывают малые аппараты. В нашей стране основной площадкой для разработки гелиофизической аппаратуры для кубсатов стала программа «Универсат», организованная Роскосмосом. В 2023 году программа предусматривает вывод на орбиту миниатюризированного солнечного телескопа СОЛ на аппарате «НОРБИ-2» [5] (см. рисунок 2), прибора «Рефос» на аппарате «Ярило», а также проведение летных испытаний климатологической аппаратуры «МИРА», представляющей собой миниатюризированный радиометр для измерения альбедо Земли. Также в рамках программы в текущем году запланированы экспериментальные исследования новых методов измерения магнитного поля Земли с помощью малоразмерных магнитометров, адаптированных под установку на аппаратах типа кубсат.

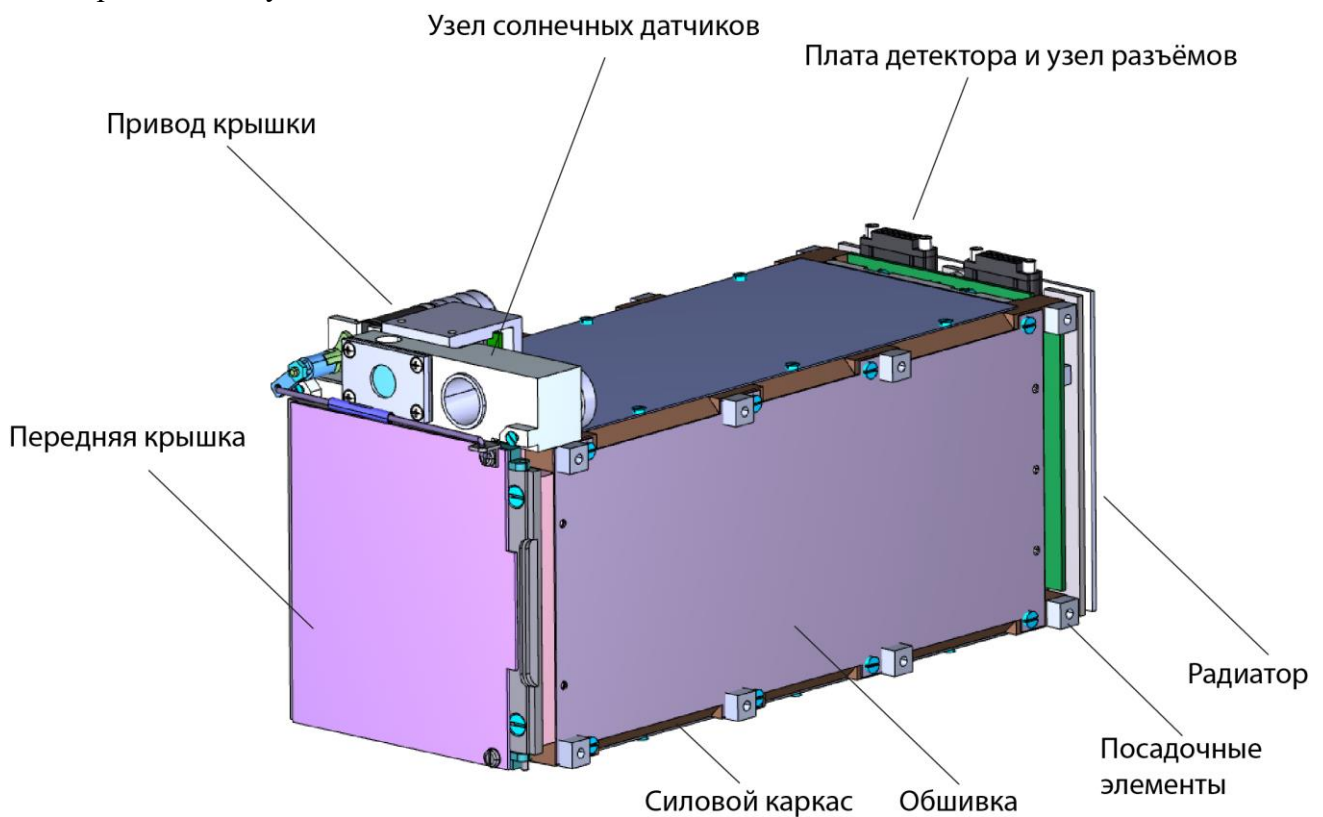


Рисунок 2 – Общая конструкция телескопа СОЛ для наноспутника НОРБИ-2

В целом, мы рассчитываем, что объективный интерес к проблеме солнечно-земных связей будет способствовать развитию новых технологий малоразмерного приборостроения, а также, в целом, развитию направления малых спутников, и надеемся способствовать этому в рамках упомянутых выше компетенций по миниатюризированному приборостроению.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002/>.

Список литературы:

1. Pesnell W.D., Thompson B.J., Chamberlin P.C. The Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Physics, 2012. V.275 (1). P. 3-15. DOI: 10.1007/s11207-011-9841-3.
2. Golub L. The X-Ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission // Solar Physics, 2007. V.243 (1). P. 63–86. DOI:10.1007/s11207-007-0182-1.
3. Waydo S., Henry D., Campbell M. CubeSat design for LEO-based Earth science missions // IEEE Aerospace Conference. 2002. Big Sky MT USA. ISBN:0-7803-7231-X. DOI:10.1109/AERO.2002.1036863.
4. Kim G.M., Park S.-Y., Lee T. et al. Development of Formation Flying CubeSats and Operation Systems for the CANYVAL-C Mission: Launch and Lessons Learned // 35th Annual Small Satellite Conference, 2021. Utah State University, Logan, UT.
5. A Telescope for Imaging the Sun on Board CubeSat Small Spacecraft / Pertsov A.A. [et al]. // Instruments and Experimental Techniques. 2022. V. 65(2). pp. 326-331. DOI: 10.1134/S0020441222020051.