

## О ВОЗМОЖНОСТЯХ И ПРОБЛЕМАХ НАБЛЮДЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА ДЛЯ ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

### POSSIBILITIES AND PROBLEMS OF SOLAR MAGNETIC FIELD OBSERVATIONS FOR SPACE WEATHER FORECAST

**М.Л. Демидов**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, demid@iszf.irk.ru*

**M.L. Demidov**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics, SB RAS,  
Irkutsk, Russia, demid@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Важной составной частью актуальной в последние десятилетия проблемы космической погоды является прогноз параметров околоземного космического пространства, состояния ионосферы и геомагнитной активности на основе наблюдений различных явлений на Солнце. Особо значимы измерения магнитных полей, поскольку именно они определяют пространственную структуру внешних слоев солнечной атмосферы и в значительной степени параметры солнечного ветра. Ввиду отсутствия в настоящее время возможностей наблюдений магнитных полей непосредственно в короне практически единственным источником разнообразных моделей количественного расчета параметров гелиосферы являются измеряемые в фотосферных линиях ежедневные магнитограммы и получаемые на их основе синоптические карты. При этом оказывается, что результаты прогноза, в частности, скорости солнечного ветра на орбите Земли и положения гелиосферного токового слоя сильно зависят не только от выбранной модели расчетов, но и от исходного материала, поскольку магнитограммы различных инструментов (а зачастую и наблюдения в разных линиях на одном и том же телескопе) хотя и похожи морфологически, но могут значительно различаться при подробном количественном анализе. Детальному рассмотрению именно этого аспекта проблемы космической погоды посвящена значительная часть настоящей работы.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечные магнитные поля, наблюдения, солнечный ветер, межпланетная среда, моделирование.

**Abstract.** An essential part of the space weather problem, important in the last decades, is the forecast of near-Earth space parameters, ionospheric and geomagnetic conditions on the basis of observations of various phenomena on the Sun. Of particular importance are measurements of magnetic fields as they determine the spatial structure of outer layers of the solar atmosphere and, to a large extent, solar wind parameters. Due to lack of opportunities to observe magnetic fields directly in the corona, the almost only source of various models for quantitative calculation of heliospheric parameters are daily magnetograms measured in photospheric lines and synoptic maps derived from these magnetograms. It turns out that results of the forecast, in particular of the solar wind velocity in Earth's orbit and the position of the heliospheric current sheet, greatly depend not only on the chosen calculation model, but also on the original material because magnetograms from different instruments (and often observations in different lines at the same), although being morphologically similar, may differ significantly in a detailed quantitative analysis. A considerable part of this paper focuses on a detailed analysis of this particular aspect of the problem of space weather forecast.

**Keywords:** the Sun, solar magnetic fields, observation, solar wind, interplanetary medium, modeling.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространенных общих интересов подавляющего большинства людей на планете является погода. Причем знания того, какая погода будет сегодня, порой недостаточно, часто мы хотим знать, а что нас ждет завтра и в последующие дни. Прогноз погоды стал насущной необходимостью. Для нужд большинства населения Земли вполне достаточно знания состояния приповерхностной атмосферы (тропосферы и стратосферы), однако в последние десятилетия появились сферы деятельности земной цивилизации, в которых термин «погода» используется в гораздо более широком смысле.

Осознание того очевидного факта, что многие глобальные (и зачастую локальные) процессы зависят от состояния нашей звезды — Солнца, в частности от степени покрытия его поверхности пятнами, стимулировало систематические наблюдения солнечной активности и попытки ее прогнозирования. Еще в середине XIX в. за исследованиями запятненности солнечной поверхности закрепились, по аналогии с традиционными терминами метеорологии, термины «солнечная погода», «солнечная метеорология». Активная деятельность человечества в космосе за последние полвека, особенно в околоземном космическом пространстве (ОКП), на больших высотах в атмосфере, а также в приполярных областях,

где, ввиду особенностей конфигурации магнитного поля Земли, проявления солнечно-земных связей выражены наиболее эффектно, поставило на повестку дня вопрос изучения состояния и прогноза системы Солнце–Земля в целом. За данной сферой научной и практической деятельности устойчиво закрепился термин «космическая погода», и даже «космическая погода и космический климат». Более конкретно под термином «космическая погода» принято понимать изменяющиеся со временем условия на Солнце, в межпланетной среде (солнечном ветре), магнитосфере, ионосфере и термосфере Земли, которые оказывают влияние на функционирование технологических систем наземного и космического базирования и могут представлять опасность для жизни и здоровья людей. По решаемым проблемам исследования в рамках космической погоды подразделяются на три типа: 1) синоптические наблюдения Солнца, 2) прогноз солнечной активности, 3) предсказание параметров межпланетной среды.

Стоит кратко осветить историю происхождения современного термина «космическая погода». Справедливости ради нужно заметить, что впервые данный термин был введен в научный лексикон известным российским и советским ученым Александром Леонидовичем Чижевским (1897–1964 гг.), которого заслуженно считают одним из основоположников гелиобиологии — науки, изучающей влияние солнечной активности на земные организмы. Более того, он пошел дальше и высказывал предположение (разделяемое далеко не всеми), что колебания активности Солнца коррелированы с историческими событиями — войнами, революциями, стихийными бедствиями и т. д. В книге Виореля Михайловича Ломова [2013] на стр. 243 указано, что впервые о понятии «космическая погода» А. Чижевский высказался в 1915 г. в докладе «Влияние пертурбаций в электрическом режиме Солнца на биологические явления». Признанием научных заслуг нашего соотечественника является тот факт, что в 2013 г. на 10-й Европейской неделе космической погоды (10<sup>th</sup> European Space Weather Week) была учреждена международная медаль А. Чижевского, которой награждаются молодые ученые за исследования по космической погоде и космическому климату.

К сожалению, работы А.Л. Чижевского не нашли отражения в историческом анализе [Cade, Chan-Park, 2015], в котором отмечено, что данный термин в международное обращение впервые был введен в конце 1950-х гг., а стал общеупотребительным начиная с 1990-х, т. е. это очень молодое понятие, впрочем, как и сама отрасль науки, которую оно обозначает. Тем не менее это бурно развивающееся направление, результаты исследований по космической погоде публикуются не только в традиционных астрономических и геофизических журналах, но и в появившихся специализированных изданиях: Space Weather (AGU Publication), Journal of Space Weather and Space Climate. Регулярно проводятся международные конференции, ближайшая из которых, IAU Symposium 335 «Space Weather of the Heliosphere. Processes and Forecasts», запланирована на 17–21 июля 2017 г. в Англии.

Существование проблематики космической погоды позволяет выделить солнечных физиков — гелиофизиков — в особую группу астрономов. Не будь этого аспекта, они занимались бы просто исследованиями рядовой карликовой звезды спектрального класса G2, которых огромное множество в нашей Галактике. Именно в контексте солнечно-земных связей солнечная физика занимает приоритетное положение среди других направлений астрофизики и физики космоса.

Если говорить о солнечных источниках (драйверах, solar drivers) межпланетных и земных возмущений, которые актуальны в контексте задач космической погоды, то их несколько и «удельный» вклад каждого из них варьирует в зависимости от фазы цикла солнечной активности и исследуемого явления. Обычно выделяют следующие основные солнечные драйверы: корональные выбросы массы, солнечные вспышки, солнечный ветер, солнечное ультрафиолетовое излучение и энергичные частицы, солнечное радиоизлучение. Наиболее эффективными с точки зрения возбуждения возмущений, безусловно, являются корональные выбросы массы (КВМ), солнечные вспышки и сопровождающие оба эти явления потоки энергичных частиц. Актуальна также информация о радиоизлучении и светимости (особенно в коротковолновой области спектра, вариации в которой с циклом активности достигают 10 %, в отличие от вариаций 0.1 % в интегральном и видимом излучении).

Солнечная магнитная природа большинства космических «возмутителей спокойствия» на Земле была доказана еще в середине XIX в., когда была обнаружена корреляция интенсивности и числа геомагнитных бурь с числом солнечных пятен. Хорошо известен гигантский геомагнитный шторм 1859 г., сопровождавшийся интенсивным полярным сиянием и нарушением работы телеграфа, который Ричард Кэррингтон связал (правда, с большой осторожностью, говоря «One swallow does not make a summer»!) с мощной вспышкой в белом свете, наблюдавшейся им 1 сентября 1859 г. на Солнце в окрестности большой активной области [Carrington, 1859]. Классическим примером тесной взаимосвязи солнечных и земных событий является геомагнитная буря (сопоставимая по мощности с Кэррингтоновским событием) 13–14 марта 1989 г., которой предшествовал мощный КВМ, произошедший на Солнце 9 марта. Во время этой бури была потеряна связь со многими спутниками, а в электросетях провинции Квебек в Канаде случилась авария, убытки от которой оцениваются в 100 миллионов долларов. Из катастрофических событий относительно недавнего времени можно упомянуть магнитную бурю 29 октября 2003 г., вызвавшую нарушения работы электрических сетей в Южной Африке и в Швеции [Cid et al., 2014].

Системы наземного и космического базирования для мониторинга за происходящими на Солнце процессами созданы и активно развиваются в цивилизованных странах. В Европе существует программа Европейского космического агентства Space Situational Awareness Programme (SSA,

www.swe.ssa.esa.int), в США действует U.S. National Space Weather Strategy и National Space Weather Action Plan (www.swpc.noaa.gov). Справедливости ради следует заметить, что первые шаги по организации «службы Солнца» в контексте эффектов космической погоды (влияние на возмущения ионосферы и, как следствие, на распространение радиоволн) начали предприниматься Германией еще в начале 1940-х гг. во время Второй мировой войны. В частности, в интересах Немецких военно-воздушных сил в Альпах была создана сеть из трех солнечных обсерваторий на территории Германии и одной в Австрии.

Важным, а в некоторых случаях определяющим первоисточником всех названных драйверов является магнитное поле. В конечном счете именно энергия, запасенная в магнитном поле, в сочетании с динамическими явлениями в конвективной зоне и во внешних слоях атмосферы реализуется в процессах солнечной активности. Наблюдения солнечных магнитных полей являются актуальными и совершенно необходимыми для решения большинства задач прогноза космической погоды. Данные о таких полях используются как непосредственно, например для расчетов на их основе параметров короны и межпланетной среды, так и опосредованно, например для поиска их связи (проху) с вариациями светимости. Целью настоящей обзорной работы является анализ современного состояния наблюдений солнечных магнитных полей. Будут рассмотрены (не в полной мере, конечно) возможности использования различных рядов наблюдений солнечных магнитных полей (отдельных магнитограмм и синоптических карт) для задач прогноза параметров солнечного ветра и индексов геомагнитной активности.

Из достаточно многочисленных солнечных обсерваторий мира, даже имеющих крупные телескопы, предназначенными в основном для исследования тонкоструктурных образований, далеко не все обладают возможностями осуществлять полнодисковый мониторинг магнитных полей. А именно это является необходимым условием для использования магнитограмм в задачах космической погоды. В таблице приведены основные сведения о солнечных обсерваториях, оснащенных полнодисковыми магнитографами. Для телескопа СТОП нового поколения [Пещеров и др., 2013] указана как место расположения Горная астрономическая станция Главной астрономической обсерватории РАН (ГАС ГАО) вблизи Кисловодска, поскольку именно там наблюдения (некоторые результаты которых приведены в том числе и в данном обзоре) выполняются наиболее регулярно. В действительности в ИСЗФ СО РАН по заказу Института прикладной геофизики (ИПГ) было изготовлено три одинаковых инструмента для создания сети из трех обсерваторий, в которую, помимо Кисловодска, входят Уссурийская и Байкальская астрофизические обсерватории.

Как видно из таблицы, инструменты различаются как способом выделения в спектре интересующих спектральных линий (спектральным селектором может служить спектрограф, интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) или интерферометр), так и используемыми спектральными линиями. При этом если при использовании спектрографа

осуществляется сканирование диска (меандром в случае использования в качестве фотоприемника ФЭУ или ПЗС-линейки или одномерным перемещением солнечного изображения поперек входной щели вдоль одной из пространственных координат  $\alpha$ ,  $\delta$  в случае ПЗС-матрицы), то при наблюдениях с фильтрами и интерферометрами приходится при регистрации всего диска сканировать профиль спектральной линии или наблюдать в выбранных участках контура. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки. Другое важное различие магнитографов — пространственное разрешение, варьирующее от нескольких десятков пикселей на диск по одной из координат до нескольких тысяч.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос о способе контроля нулевого уровня при регистрации магнитных полей на различных телескопах [Demidov, 1996]. Казалось бы, наиболее очевидным является способ с использованием немагнитной линии (обсерватория WSO, линия FeI 512.4 нм). Однако необходимая при таком способе перестройка спектрографа на другую длину волны сопряжена с определенными проблемами (а для фильтровых магнитографов вообще недоступна), и, вообще говоря, идентичность значений смещений нулевого уровня в рабочей и немагнитной линиях справедлива лишь на некотором уровне точности. Во многих отношениях более надежный способ с использованием полуволновой фазовой пластинки (телескопы СТОП) позволяет избавиться от большинства инструментальных проблем, однако обладает тем недостатком, что при наблюдениях с высоким пространственным разрешением введение в пучок света крупногабаритной полимерной пленки вызывает ухудшение качества изображения и увеличивает рассеянный свет. Третий способ контроля нулевого уровня (SOLIS) является косвенным, в отличие от вышеназванных первых двух, и заключается в специальной дополнительной обработке данных в рамках тех или иных предположений. Например, что при усреднении за длительные интервалы времени сигналы от обширных участков диска Солнца со слабыми магнитными полями должны иметь нулевые значения.

В таблице приведены сведения об инструментах как наземного, так и космического базирования. Обсуждению преимуществ и недостатков каждого вида наблюдений посвящены, в частности работы [Balasubramaniam, Pevtsov, 2011; Pevtsov, 2016]. Ясно, что наземные и космические наблюдения взаимно дополняют друг друга и наземные данные ни в коем случае нельзя списывать со счетов. Они, по сравнению с космическими данными, обладают такими преимуществами, как долговременность (что важно для синоптических программ), относительная дешевизна, возможность оперативной модернизации оборудования по мере появления новых измерительных средств. Очевидные недостатки — искажающее влияние земной атмосферы и зависимость от времени суток (ночью наблюдения не проводятся) — можно компенсировать использованием адаптивной оптики и организацией сетей одготипных телескопов. Наконец, данные наземных наблюдений совершенно необходимы для калибровки и тестирования работы космических инструментов.

Основные сведения об инструментах, наблюдения магнитных полей на которых используются для прогноза космической погоды

Инструмент	Место расположения	Селектор длин волн	Используемая рабочая спектральная линия, нм	Угловое разрешение (угл. сек)	Размерность полнодисковой магнитограммы X×Y пикселей
WSO (Wilcox Solar observatory)	Стэнфорд, США ( $\lambda=122^\circ$ W, $\varphi=37.4^\circ$ N)	Спектрограф Литтрова	FeI 525.02	90×180	21×11
SOLIS	Тусон, США ( $\lambda=111^\circ$ W, $\varphi=32.2^\circ$ N)	Спектрограф Литтрова	FeI 630.15 FeI 630.25 CaII 854.2	1×1	2K×2K
GONG	Мировая сеть из 6 станций	Интерферометр Майкельсона	NiI 676.8	8×8	256×256
SOHO/MDI	Точка Лагранжа L1	Интерферометр Майкельсона	NiI 676.8	2×2	1024×1024
SDO/HMI	Геосинхронная орбита (высота 36 тыс. км, $\lambda=122^\circ$ W, наклонение $28^\circ$ )	ИП фильтр Лию + интерферометр Майкельсона	FeI 617.3	0.5×0.5	4K×4K
SMAT HSOS	Пекин, Хуайроу, Китай ( $\lambda=116^\circ$ , $\varphi=40.3^\circ$ N)	Перестраиваемый ИП-фильтр Лию	FeI 532.4	2×2	992×1004
СТОП ГАС ГАО	Кисловодск, Россия ( $\lambda=42.6^\circ$ , $\varphi=43.7^\circ$ N)	Спектрограф Литтрова	FeI 630.15 FeI 630.25	33×6	59×294
СТОП ССО	Саяны, Монды, Россия ( $\lambda=101^\circ$ , $\varphi=51.6^\circ$ N)	Спектрограф Литтрова	FeI 525.02 и другие	91×91	21×21

**НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ  
О МЕТОДАХ И МОДЕЛЯХ  
РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ  
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА  
И ИНДЕКСОВ ГЕОМАГНИТНОЙ  
АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ  
НАБЛЮДЕНИЙ МАГНИТНЫХ  
ПОЛЕЙ СОЛНЦА**

Солнце влияет на Землю как напрямую, посредством электромагнитного и корпускулярного излучения, так и опосредованно, через разнообразные процессы в межпланетном пространстве. Вопросам исследования источников возникновения и характеристик солнечного ветра (СВ), являющегося связующим звеном между Солнцем и Землей, посвящено множество работ, в том числе отечественных ученых. Весьма полный обзор публикаций, а также важные собственные результаты приведены в монографии [Коваленко, 1983], которая не потеряла своей актуальности и в настоящее время. В стационарных условиях из приэкваториальных частей короны Солнца истекает спокойный солнечный ветер со

скоростью порядка 400 км/с с вмороженным в него магнитным полем, формируя квазистационарную структуру, основным элементом которой является гелиосферный токовый слой (ГТС) — граница раздела полярностей межпланетного магнитного поля (ММП). Скорость солнечного ветра из полярных корональных дыр намного выше и достигает 800 км/с. Спокойный солнечный ветер модифицируется активными процессами, происходящими в активных областях и корональных дырах, приводя к деформациям ГТС, КВМ и сложным динамическим взаимодействиям различных потоков в межпланетной среде. Принципиальным для геомагнитной активности является положение Земли относительно поверхности ГТС (в общем случае существенно искривленной относительно плоскости солнечного экватора), поскольку от этого зависит, совпадает ли ориентация геомагнитного поля с  $B_z$ -компонентой ММП или противоположна ей. Во втором случае происходят процессы пересоединения и более активные изменения магнитосферы. Изменение ориентации магнитного поля Земли относительно ММП приводит к полугодовым вариациям геомагнитной активности,

известным как эффект Расселла — Мак-Феррона [Russell, McPherron, 1973]. Особые условия взаимодействия земной магнитосферы и ММП, модифицирующие эффект Расселла — Мак-Феррона, возникают в периоды весеннего и осеннего равноденствия [Cliver et al., 2000], приводя к комбинированному «эффекту равноденствий».

Ранее неоднократно предпринимались попытки [Пудовкин и др., 1977; Понявин, Пудовкин, 1988; Обридо и др., 1996; и т.д.], в настоящее время представляющие лишь исторический интерес, найти эмпирические соотношения между извлекаемыми из магнитограмм полного диска наблюдаемыми параметрами магнитного поля и солнечного ветра (ориентация и величина компонент магнитного поля, скорость, плотность, время распространения до орбиты Земли) и индексами геомагнитной активности.

В дальнейшем были созданы гораздо более комплексные и уточненные методы прогноза, вплоть до разработки сложных трехмерных магнито-гидродинамических (3D МГД) моделей. В задачах предсказания параметров СВ вблизи Земли на расстоянии 1 а. е. от Солнца выделяют два подхода: первый — расчет фоновых, спокойных СВ и короны, второй — расчет динамических явлений, таких как КВМ. При этом для сложных моделей второго подхода в качестве начальных условий применяются упрощенные модели, разработанные для задач первого подхода. Наиболее распространенным подходом первого уровня являются расчеты в рамках модели поверхности источника в приближении потенциального поля (Potential Field Source Surface, PFSS) [Schatten et al., 1969; Altschuller, Newkirk, 1969; Levine et al., 1977; Hoeksema, 1984; Rudenko, 2001]. В такой модели предполагается, что магнитное поле в короне потенциальное (такое вынужденное упрощение означает игнорирование токов в фотосфере и хромосфере, которые в действительности, конечно же, присутствуют, и пренебрежение силами, связанными с газовым давлением) и становится абсолютно радиальным, начиная с некоторого уровня над фотосферой. Данный уровень называется поверхностью источника. Его высота является свободным параметром, обычно принимают 2–2.5 радиуса от центра Солнца. Структура полярностей на этом уровне принимается фиксированной и выносится солнечным ветром радиально во внешние области гелиосферы. Исходным наблюдательным материалом для расчетов являются синоптические карты радиального поля, получаемые из ежедневных магнитограмм, в которых регистрируется поле по лучу зрения (продольное поле), посредством пересчета в приближении, что магнитные поля в фотосфере преимущественно вертикальной направленности (см. обсуждение данной проблемы в недавно вышедшей статье [Leka et al., 2017]).

Заметим, что, помимо PFSS, существуют другие модели, которые частично или полностью свободны от недостатков PFSS. Их подробное рассмотрение выходит за рамки данной работы, и поэтому ограничимся только перечислением некоторых из них.

Это, в частности, модель CSSS (Current Sheet Source Surface — поверхность источника с токовым слоем) [Zhao, Hoeksema, 1995], адаптивная трехмерная МГД-модель (AMR SIP-CESE MHD — Adaptive Mesh Refinement Solar InterPlanetary space-time Conservation Element and Solution Element Magnetohydrodynamic Model) [Feng et al., 2012a, b], глобальная модель короны MAS (Magnetohydrodynamics Around a Sphere) [Mokic et al., 1999; Riley et al., 2003].

Для задач расчета параметров солнечного ветра на основе PFSS-расчетов солнечной короны Wang and Sheeley [1992] и Arge and Pizzo [2000] разработали эмпирическую модель, получившую название WSA-модели, которая активно используется в различных задачах, связанных с предсказанием космической погоды. Именно данная модель используется в качестве первого приближения и граничных условий в современных трехмерных МГД-моделях [Hayashi et al., 2015].

Наиболее «продвинутым» прогностическим кодом современности для расчета параметров солнечного ветра, используемым в режиме реального времени в американском центре предсказания космической погоды (NOAA/SWPC — National Oceanic and Atmospheric Administration/ Space Weather Prediction Center) в Боулдере, является Enlil, названный так по имени верховного шумерского божества, бога ветра. Enlil разработана Dusan Odstrcil (Колорадский университет, Боулдер) в сотрудничестве с другими учеными [Odstrcil, Pizzo, 1999a, b; Odstrcil et al., 2002, 2003, 2004] и использует трехмерную МГД-модель гелиосферы, описывающую движение плазмы солнечного ветра и поведение содержащегося в нем магнитного поля со временем. Внутренняя граница модели находится на расстоянии 20–30 радиусов от Солнца и ее параметры обычно определяются расчетами с использованием модели WSA. Внешняя граница может достигать 10 а. е. и более, но для практических нужд наибольшее значение имеют расчеты для орбиты Земли. По гелиошироте модель оперирует в диапазоне  $\pm 60^\circ$ . Последней на момент написания обзора модификацией WSA-Enlil является модель WSA-Enlil+Cone [Mays et al., 2015], которая дополнена возможностями предсказания условий взаимодействия с Землей КВМ, которые наблюдаются коронографами (в том числе с космических аппаратов STEREO) на расстояниях до 20 радиусов Солнца и геометрия распространения которых в межпланетном пространстве аппроксимируется конусом. Пример работы комплекса программ WSA-Enlil+Cone показан на рис. 1, который представляет собой скриншот экрана при загрузке соответствующего сайта.

Однако необходимо заметить, что, как бы ни были сложны и универсальны методы и модели прогноза параметров космической погоды, 100%-й точности прогнозов они обеспечить не в состоянии [Mays et al., 2015]. Одна из причин такого положения заключается в достоверности самих исходных данных.

WSA-ENLIL SOLAR WIND PREDICTION

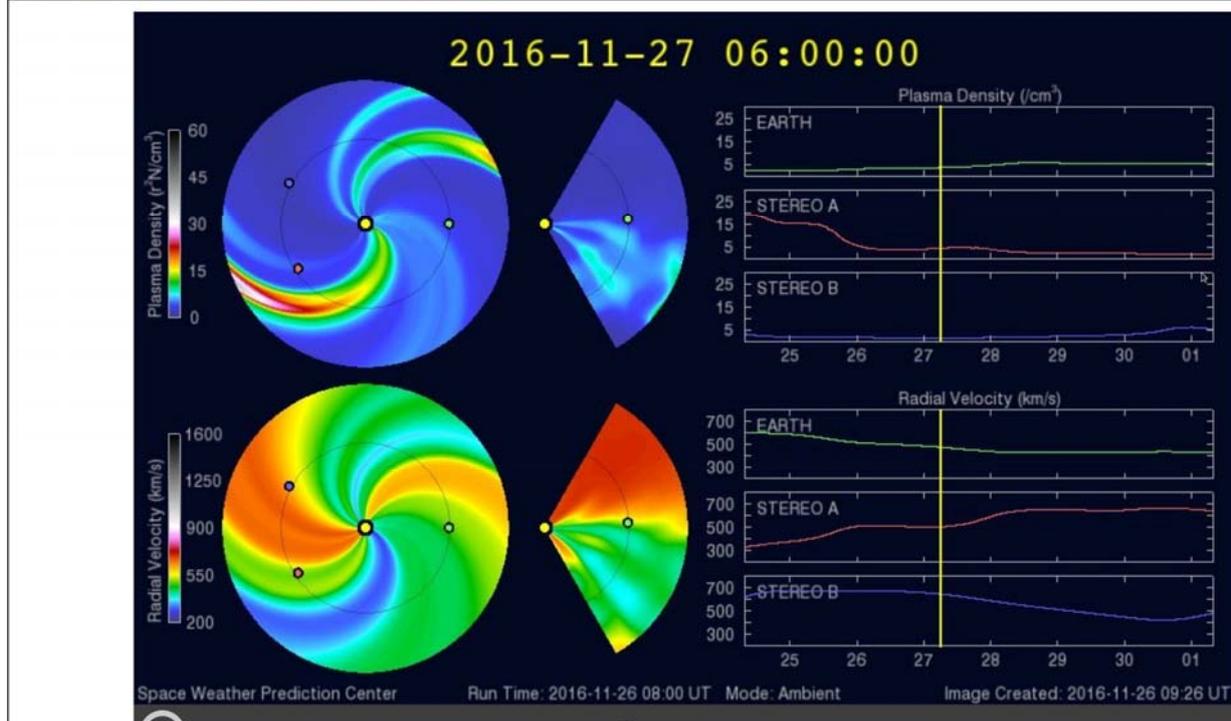


Рис. 1. Скриншот экрана компьютера при загрузке с сайта NOAA/SWPC (<http://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction>) результатов прогноза плотности плазмы (верхняя панель) и радиальной скорости (нижняя панель) солнечного ветра по модели WSA-Enlil+Cone. Показаны результаты расчетов для Земли (отдельные сектора справа), а также для двух спутников STEREO

**ПРОБЛЕМА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА: ПОЛНОДИСКОВЫЕ МАГНИТОГРАММЫ И СИНОПТИЧЕСКИЕ КАРТЫ**

Магнитограммы разных обсерваторий могут различаться весьма значительно. На примере анализа полнодисковых магнитограмм это показано, в частности, в [Demidov et al., 2008], где можно найти также достаточно подробный библиографический обзор проблемы сравнения наблюдений солнечных магнитных полей в различных обсерваториях и в разных спектральных линиях. Подробный анализ синоптических карт по данным семи обсерваторий выполнен в недавней работе [Riley et al., 2013]. Вывод работы весьма неутешителен — данные разных обсерваторий могут различаться очень значительно, от 4–5 раз в некоторых комбинациях обсерваторий и вплоть до 20 раз (см. верхнюю правую панель на рис. 9 в статье [Riley et al., 2013]) в исключительных случаях. Причем эти соотношения варьируют как со временем, так и с положением на диске Солнца (зависят от гелиошироты). Последний факт особенно существен для задач космической погоды, поскольку магнитные поля в полярных областях оказывают значительное влияние на результаты расчетов. Сопоставление данных наземных (в основном на примере SOLIS, а также магнитографа обсерватории Маунт-Вилсон) и космических наблюдений сол-

нечных магнитных полей выполнено, в частности, в работе [Pietarila et al., 2013].

Начало дискуссии о возможном влиянии проблем в измерении солнечных магнитных полей на задачи космической погоды, в частности на расчеты структуры короны и параметров солнечного ветра, положено работой [Wang, Sheeley, 1995], в которой для коррекции магнитограмм стэнфордской обсерватории (Wilcox Solar Observatory, WSO) предложено использовать найденный Ulrich [1992] корректирующий коэффициент

$$K=4.5-2.5\sin^2\rho,$$

где  $\rho$  — гелиоцентрический угол. Позднее [Ulrich et al., 2009] эта формула была модифицирована:

$$K=4.15-2.82\sin^2\rho,$$

и в таком виде использовалась для одной из перекалибровок магнитограмм SOHO/MDI. Однако против подобной коррекции наблюдений в линии FeI 5250 Å (а именно в этой линии выполняются измерения в WSO) выступили авторы работ [Svalgaard et al., 1978; Svalgaard, 2006; Demidov, Balthasar, 2009, 2012]. Вывод работ [Svalgaard et al., 1978; Svalgaard, 2006] о необходимости коррекции данных обсерватории WSO на постоянный (по времени и по диску) фактор 1.85 из-за насыщения сигнала магнитографа был подтвержден в более позднем исследовании [Riley et al., 2013].

Остановимся подробнее на результатах недавней работы [Hayashi et al., 2016], специально посвященной анализу различий расчетов (выполненных в потенциальном приближении, т. е. по модели PFSS)

структуры гелиосферы и параметров солнечного ветра на орбите Земли при использовании синоптических карт четырех обсерваторий: WSO, GONG, SDO/HMI и Huairou Solar Observation Station (HSOS). Для анализа был использован кэррингтоновский оборот 2144 (с 21 ноября по 19 декабря 2013 г.) в эпоху максимума солнечной активности. Одна из причин выбора данного кэррингтоновского оборота — близкая к нулевой гелиоширота Земли, что позволило исключить различия во влиянии магнитных полей в полярных областях, корональные дыры в которых, как хорошо известно, оказывают существенное влияние на расчеты гелиосферы.

Вопрос о наблюдениях магнитных полей в полярных областях Солнца, оказывающих значительное влияние на конфигурацию короны и межпланетного магнитного поля, является, действительно, принципиально важным. Интерпретация наблюдений магнитных полей на больших расстояниях от центра диска вообще является сложной научной проблемой (см., например, [Solanki et al., 1998; Demidov et al., 2015]), а наблюдения полярных областей осложнены еще и тем, что они периодически (каждые полгода) вообще оказываются вне поля зрения (эффект гелиошироты Земли). Поэтому отсутствие данных для полярных областей Солнца приходится каким-то образом компенсировать, например посредством экстраполяции более низкоширотных полей [Petrie, 2015]. В некоторых случаях (модель ADAPT — Air Force Data Assimilative Photospheric Flux Transport [Arge et al., 2010]) магнитные поля в полярных областях восстанавливаются с помощью расчетов в рамках моделей переноса магнитного потока (flux transport models).

Поскольку пространственное разрешение синоптических карт четырех обсерваторий сильно различается, все данные были приведены к разрешению карт WSO, т. е. число точек на синоптической карте 72 (долгота) и 30 (синус широты). При этом авторами [Hayashi et al., 2016] была применена важная процедура — из всех синоптических карт для коррекции несбалансированного магнитного потока были вычтены соответствующие средние (по всей карте) значения напряженности  $\Delta B$ . Такая процедура коррекции смещения нулевого уровня практически не оказала никакого влияния на данные WSO и HMI ( $\Delta B = -0.08$  Гс и  $-0.11$  Гс соответственно), но заметно сказалась на данных HSOS ( $\Delta B = -1.13$  Гс) и GONG ( $\Delta B = -1.21$  Гс). Не исключено, что именно этим можно объяснить не вполне достоверные прогнозы WSA-Enlil+Cone, в которых используются в основном данные GONG.

Применение процедуры такой коррекции нулевого уровня привело к тому, что результаты расчетов корональных дыр, соответствующих областям с силовыми линиями магнитного поля, открытыми в межпланетное пространство, оказались сильно различающимися (в случае GONG и HSOS практически до неузнаваемости). Это наглядно видно из заимствованного из [Hayashi et al., 2016] рис. 2 (рис. 4 в первоисточнике), на котором темным цветом показаны области расположения корональных дыр. При этом верхняя панель соответствует расчетам без

коррекции синоптических карт, а нижняя — при коррекции смещения нуля. Видно, что панели для HMI и WSO практически не различаются, а панели для GONG и HSOS имеют мало общего.

Показателен в работе [Hayashi et al., 2016] также рис. 10, который иллюстрирует сравнение с реальными наблюдениями результатов расчетов радиальной компоненты магнитного поля у орбиты Земли для различных рядов данных при использовании коррекции смещения нулевого уровня и без такой коррекции. Легко увидеть, что без использования коррекции (правомочность которой в том виде, как это сделано в [Hayashi et al., 2016], по моему мнению, далеко не очевидна), результаты расчетов для GONG и HSOS от экспериментальных данных отличаются весьма значительно.

Существование значительных проблем с контролем нулевого уровня на телескопе SMAT (Solar Magnetism and Activity Telescope) HSOS было выявлено при непосредственном участии автора. В результате нескольких экспериментов с использованием полуволновой фазовой пластинки (аналогично тому, как это уже много лет [Demidov et al., 2002] делается на телескопе СТОП Саянской солнечной обсерватории) были обнаружены [Demidov et al., 2016] значительные смещения нулевого уровня в магнитограммах SMAT, причем разные для разных положений на диске. На рис. 3 показано сопоставление данных HSOS и SDO/HMI без учета контроля нулевого уровня (левая панель) и с учетом (правая панель). Как видно, после коррекции смещения нулевого уровня данные HSOS стали соответствовать данным SDO/HMI значительно лучше.

Таким образом, можно сделать вывод, что корректный учет многочисленных инструментальных эффектов, которые могут исказить реальные данные наблюдений, особенно учет положения нулевого уровня, является необходимой процедурой. Поэтому данные наблюдений на инструментах, где такой процедуре уделяется соответствующее внимание (в WSO контроль нуля выполняется по измерениям в немагнитной линии FeI 5124 Å, на СТОП ССО — с использованием полуволновой пластинки), следует признать более надежными. Это подтверждается и рис. 4, на котором показаны заимствованные из [Tlatov et al., 2016] результаты сопоставления расчетных и реально наблюдаемых значений скорости солнечного ветра на орбите Земли. Данные наблюдений получены на телескопе СТОП в Кисловодске.

Знание скорости солнечного ветра на орбите Земли имеет особо важное значение, поскольку доказано (см., например, [Newell et al., 2007, 2016] и цитируемые там статьи), что этот параметр хорошо коррелирует с индексами геомагнитной активности. При сопоставлении наблюдаемых значений скорости солнечного ветра с рассчитанными в различных моделях (в частности, [Owens et al., 2008; McGregor et al., 2011]) были выявлены существенные расхождения, что послужило поводом для перекалибровки модельных расчетов.

Недавно в дискуссии о влиянии исходных данных наблюдений на результаты расчетов в рамках задач космической погоды, помимо сопоставления

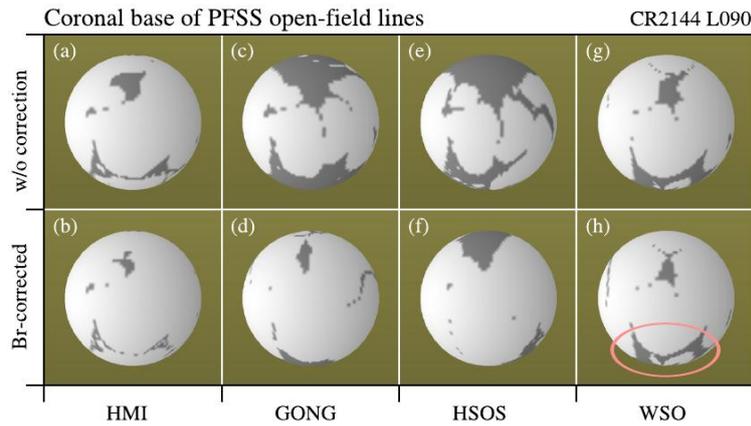


Рис. 2. Рассчитанные в приближении PFSS соответствующие корональным дырам области на поверхности Солнце, откуда исходят открытые силовые линии магнитного поля. Показаны результаты расчетов с использованием синоптических карт четырех обсерваторий без коррекции нулевого уровня (верхняя панель) и с коррекцией (нижняя панель). Обращают на себя внимание существенные изменения в результате коррекции данных GONG и HSOS. Рисунок взят из статьи [Hayashi et al., 2016]

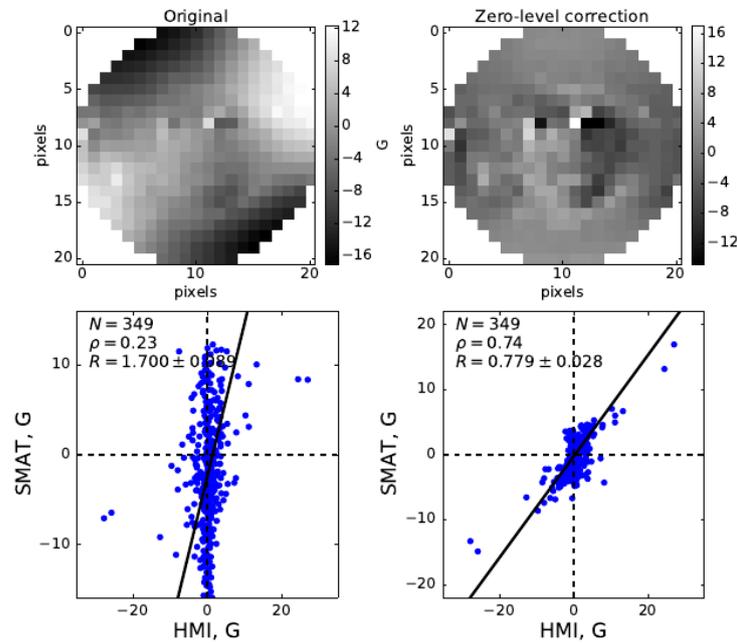


Рис. 3. Иллюстрация эффективности учета влияния смещения нулевого уровня на данные наблюдений SMAT HSOS. Вверху слева показана исходная магнитограмма, а справа — скорректированная за смещение нулевого уровня. Внизу приводится сопоставление магнитограмм (scatter plots) SMAT – SDO/HMI: слева — исходная магнитограмма SMAT, справа — после коррекции нулевого уровня

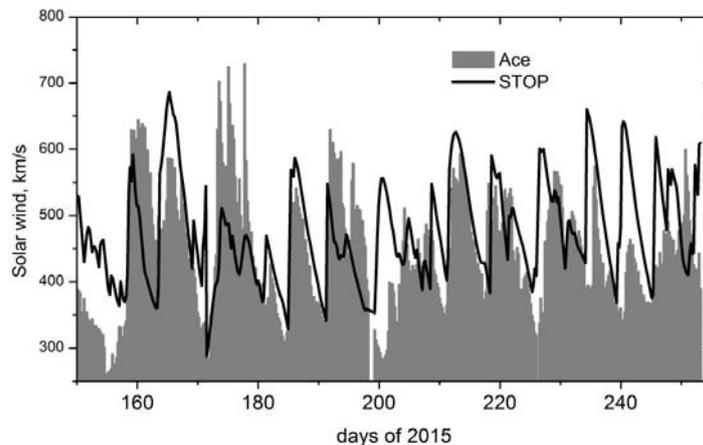


Рис. 4. Сравнение измерений скорости солнечного ветра на спутнике ACE (Advanced Composition Explorer) в точке L1 со значениями, рассчитанными по данным наблюдений на телескопе СТОП в Кисловодске. Рисунок взят из статьи [Tlatov et al., 2016]

различных рядов данных, появился новый аспект, связанный с особенностями конструирования синоптических карт (поскольку для построения одной карты используются наблюдения в разные дни). Показано [Bertello et al., 2014; Pevtsov et al., 2015], что влияние таких неопределенностей может быть существенным. Наконец, начала обсуждаться [Weinzierl et al., 2016; Pevtsov et al., 2016] идея запуска космического аппарата с магнитографом полного диска Солнца на орбиту Земли в точку Лагранжа L5, чтобы уточнить достоверность прогнозов космической погоды и увеличить их заблаговременность. Нет сомнений, что в случае реализации этого проекта (безусловно, очень сложного, поскольку точка L5 находится от Земли на расстоянии в 10 раз больше, чем L1, что сопряжено с ограничениями на массу полезной нагрузки и телеметрию), программа по космической погоде поднимется на принципиально новый уровень. Детальное обсуждение научных инструментов для аппаратов в точках L1 и L5, включая магнитографы полного вектора с достаточно высоким пространственным (угловым) разрешением, приведено в недавно вышедшей работе [Kraft et al., 2016]. Угловое расстояние в  $60^\circ$  между лучом из центра Солнца в точку L5 и линией Солнце–Земля позволит покрыть наблюдениями до 67 % всей поверхности Солнца и, по сравнению с 3–4 днями при наблюдениях только с Земли и из точки L1, обеспечить большую — до 6–7 дней — заблаговременность наблюдений активных областей и процессов, которые могут представлять опасность для Земли.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К сожалению, в России исследования космической погоды практически полностью лишены собственной экспериментально-наблюдательной базы и необходимого финансирования. Многочисленные обсуждения и проекты так и остались только разговорами или решениями на бумаге и мало к чему привели в практической плоскости. Осознавать это тем более печально, что в свое время (60–70-е гг. прошлого века) и в этом вопросе, как и во многих других, у российской науки были приоритет и определенный авторитет. Но кое-что все-таки делается и в наше кризисное время, и это отрадно.

В плане тематики данного обзора — использование наблюдений солнечных магнитных полей для задач космической погоды — приятно констатировать, что дополнительно к давно и достаточно эффективно работающему телескопу СТОП Саянской солнечной обсерватории недавно была создана сеть аналогичных телескопов нового поколения, с гораздо более высоким пространственным разрешением наблюдений и меньшим временем регистрации магнитограмм полного диска. Такие инструменты установлены в Усурийске, Иркутске и в Кисловодске.

Исходя из выполненного анализа (далеко не полного, естественно), можно сделать вывод, что полнодисковые наблюдения магнитных полей в интересах задач космической погоды совершенно необходимы и очень эффективны. Необходимы до-

полнительные исследования с целью поиска наиболее достоверных данных. Перспективным кажется развивающееся новое направление — использование для задач прогноза космической погоды не только продольных магнитограмм и синоптических карт радиального поля, но и полновекторных магнитограмм и соответствующих синоптических карт [Liu et al., 2017]. Нет сомнений, что в этом направлении скоро будут получены новые интересные результаты.

Автор выражает благодарность рецензентам за положительные рецензии и содержащиеся в них ценные замечания и советы, учет которых позволил, как надеется автор, значительно улучшить излагаемый материал.

Работа выполнена благодаря частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 7 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике» и Программы фундаментальных исследований СО РАН П.16.1 «Фундаментальные проблемы процессов космической погоды, включая процессы на Солнце, в межпланетной среде, магнитосфере и атмосфере Земли» (проект П.16.3.3 «Методы и инструменты астрофизического эксперимента»).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Коваленко В.А. Солнечный ветер. М.: Наука, 1983. 272 с.  
 Ломов В.М. Сто великих научных достижений России. М.: Вече, 2013. 431 с.  
 Пещерев В.С., Григорьев В.М., Свидский П.М. и др. Солнечный телескоп оперативных прогнозов // *Автометрия*. 2013. Т. 49, № 6. С. 62–69.  
 Понявин Д.И., Пудовкин М.И. Прогноз геомагнитной активности по наблюдениям магнитных полей Солнца // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1988. Т. 28. С. 695–698.  
 Пудовкин М.И., Козелов В.П., Лазутин Л.Л. и др. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений. Л.: Наука, 1977. 312 с.  
 Altschuller M.D., Newkirk J.Jr. Magnetic fields and the structure of the corona. I. Methods of calculating coronal fields // *Solar Phys.* 1969. V. 9. P. 131–149. DOI: 10.1007/BF00145734.  
 Arge C.N., Pizzo V.J. Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A5. P. 10.465–10.479.  
 Arge C.N., Henney C.J., Koller J., et al. Air Force Data Assimilative Photospheric Flux Transport (ADAPT) Model // 12<sup>th</sup> International Solar Wind Conference. AIP Conference Proc. 2010. V. 1216. P. 343–346. DOI: 10.1063/1.3395870.  
 Balasubramaniam K.S., Pevtsov A. Ground-based synoptic instrumentation for solar observations // *Proc. SPIE*. 2011. V. 8148. P. 814809-1–814809-18. DOI:10.1117/12.892824.  
 Bertello L., Pevtsov A.A., Petrie G.J.D., Keys D. Uncertainties in solar synoptic magnetic flux maps // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 2419–2431. DOI: 10.1007/s11207-014-0480-3.  
 Cade W.B.III, Chan-Park C. The origin of «Space Weather» // *Space Weather*. 2015. V. 13. P. 99–103. DOI: 10.1002/20145SW001141.  
 Carrington R.C. Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859 // *MNRAS*. 1859. V. 20. P. 13–15.  
 Cid C., Palacios J., Saiz E., Guerrero A., Cerrato Y. On extreme geomagnetic storms // *J. Space Weather Space Climate*. 2014. V. 4, id. 28. 10 p.

- Cliver E.W., Kamide Y., Ling A.G. Mountains Versus Valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A2. P. 2413–2424. DOI: 10.1029/1999JA900439.
- Demidov M.L. Aspects of the zero level problem of solar magnetographs // *Solar Phys.* 1996. V. 164. P. 381–388. DOI: 10.1007/BF00146649.
- Demidov M.L., Balthasar H. Spectropolarimetric observations of solar magnetic fields and the SOHO/MDI calibration issue // *Solar Phys.* 2009. V. 260, N 2. P. 261–270.
- Demidov M.L., Balthasar H. On multi-line spectropolarimetric diagnostics of the quiet Sun's magnetic fields. Statistics, inversion results, and effects on SOHO/MDI magnetogram calibration // *Solar Phys.* 2012. V. 276, N 1–2. P. 43–59.
- Demidov M.L., Golubeva E.M., Balthasar H., et al. Comparison of solar magnetic fields measured at different observatories: Peculiar strength ratio distribution across the disk // *Solar Phys.* 2008. V. 250, N 2. P. 279–301.
- Demidov M.L., Veretsky R.M., Kiselev A.V. On the peculiarities of manifestation of kG magnetic elements in observations of the Sun with low spatial resolution // *Proc. IAU Symp.* 2015. V. 305. P. 86–91. DOI: 10.10117/S1743921315004561.
- Demidov M.L., Wang, X.F., Hou J.F., Wang D.G., Kiselev A.V., Kuzanyan K.M. On the cross-calibration of the Huairou Solar Observation full disk longitudinal magnetograms with data sets from STOP/SSO and SDO/HMI // *Proc. SPW-8*. (In print).
- Demidov M.L., Zhigalov V.V., Peshcherov V.S., Grigoryev V.M. An investigation of the Sun-as-a-star magnetic field through spectropolarimetric measurements // *Solar Phys.* 2002. V. 209, N 2. P. 217–232. DOI: 10.1023/A:1021292424679.
- Feng X., Jiang C., Xiang C., et al. A Data-driven model for the global coronal evolution // *Astrophys. J.* 2012. V. 758, N 1. id. 62. 13 p. DOI: 10.1088/0004-637X/758/1/62.
- Feng X., Yang L., Xiang C., et al. Validation of the 3D AMR SIP-CESE Solar Wind Model for four Carrington rotations // *Solar Phys.* 2012. V. 279, N 1. P. 207–229. DOI: 10.1007/s11207-012-9969-9.
- Hayashi K., Hoeksema J.T., Liu Y., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) vector magnetic field pipeline: Magnetohydrodynamics simulation module for the global solar corona // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 1507–1529.
- Hayashi K., Yang S., Deng Y. Comparison of potential field solutions for Carrington rotation 2144 // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. V. 121. P. 1046–1062. DOI: 10.1002/2015JAO21757.
- Hoeksema J.T. Structure and evolution of the large-scale solar and heliospheric magnetic fields: PhD Thesis. Stanford Univ., CA. Publication Date: 09/1984.
- Kraft S., Puschmann K.G., Luntama J.P. Remote sensing optical instrumentation for enhanced space weather monitoring from the L1 and L5 Lagrange points // *Intern. Conference on Space Optics (ICSO 2016)*. 18–21 October 2016. 8 p.
- Leka K.D., Barnes G., Wagner E.L. Evaluating (and improving) estimates of the solar radial magnetic field component from line-of-sight magnetograms // *Solar Phys.* 2017. V. 292, id. 36. 26 p. DOI: 10.1007/s11207-017-1057-8.
- Levine R.H., Altschuller M.D., Harvey J.M. Solar sources of the interplanetary magnetic field and solar corona // *J. Geophys. Res.* 1977. V. 82. P. 1061–1065.
- Liu Y., Hoeksema T., Sun X., Hayashi K. Vector magnetic field synoptic charts from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) // *Solar Phys.* 2017. V. 292, id. 29. 14 p. DOI: 10.1007/s11207-017-1056-9.
- Mays M.K., Taktakishvili A., Pulkkinen A., et al. Ensemble modelling of CMEs using the WSA-ENLIL+Cone Model // *Solar Phys.* 2015. V. 290. P. 1715–1814. DOI: 10.1007/s11207-015-0692-1.
- McGregor S.L., Hughes W.J., Arge C.N., et al. The distribution of solar wind speeds during solar minimum: Calibration for numerical solar wind modeling constraints on the source of the slow solar wind // *J. Geophys. Res.* V. 116. A03101. DOI: 10.1029/2010JA015881.
- Mikić Z., Linker J.A., Schnack D.D., et al. Magnetohydrodynamic modeling of the global solar corona // *Phys. Plasmas.* 1999. V. 6, N 5. P. 2217–2224. DOI: 10.1063/1.873474.
- Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. A nearly universal solar wind – magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, A01206. DOI: 10.1029/2006JA012015.
- Newell P.T., Liou K., Gjerloev J.W., et al. Substorm probabilities are best predicted from solar wind speed // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2016. V. 146. P. 28–37.
- Obridko V.N., Kharshiladze A.F., Shelting D.V. Calculating solar wind parameters from solar magnetic field data // *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*. 1996. P. 366–374. (ASP Conf. Ser. V. 95).
- Odrščil D., Pizzo V.J. Three-dimensional propagation of coronal mass ejections (CMEs) in a structured solar wind flow. 1. CME launched within the streamer belt // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N A1. P. 483–492.
- Odrščil D., Pizzo V.J. Three-dimensional propagation of coronal mass ejections (CMEs) in a structured solar wind flow. 2. CME launched adjacent the streamer belt // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104, N A1. P. 493–503.
- Odrščil D., Linker J.A., Lionello R., et al. Merging of coronal and heliospheric numerical two-dimensional MHD models // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A12. P. SSH-14-1–SSH-14-11. DOI: 10.1029/2002JA009334.
- Odrščil D. Modelling 3-D solar wind structure // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32. P. 487–306. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00332-6.
- Odrščil D., Riley P., Zhao X.P. Numerical simulation of the 12 May interplanetary CME event // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A02116. 8 p. DOI: 10.1029/2003JA010135.
- Owens M.J., Spence H.E., McGregor S., et al. Metrics for solar wind prediction models: Comparison of empirical, hybrid, and physics-based schemes with 8 years of L1 observations // *Space Weather*. 2008. V. 6. S08001. DOI: 10.1029/2007SW000380.
- Petrie G., Ettinger S. Polar field reversals and active region decay // *Space Sci. Rev.* 2015. DOI: 10.1007/s11214-015-0189-0.
- Pevtsov A.A. The need for synoptic solar observations from the ground // *Coimbra Solar Physics Meeting: Ground-based Solar Observations in the Space Instrumentation Era*. 2016. P. 71–85. (ASP Conf. Ser. V. 504).
- Pevtsov A.A., Bertello L., MacNeice P. Effect of uncertainties in solar synoptic magnetic flux maps in modelling of solar wind // *Adv. Space Res.* 2015. V. 56. P. 2719–2726.
- Pevtsov A., Bertello L., MacNeice P., Petrie G. What if we had a magnetograph at Lagrangian L5? // *Space Weather*. 2016. V. 14. P. 1–6. DOI: 10.1002/2016SW001471.
- Pietarila A., Bertello L., Harvey J.W., Pevtsov A.A. Comparison of ground-based and space-based longitudinal magnetograms // *Solar Phys.* 2013. V. 282. P. 91–106. DOI: 10.1007/s11207-012-0138-y.
- Riley P., Linker J.A., Mikić Z., et al. Using an MHD simulation to interpret the global context of a coronal mass ejection observed by two spacecraft // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2003. V. 108, N A7. P. SSH 2-1. DOI: 10.1029/2002JA009760.
- Riley P., Ben-Nun M., Linker J.A., et al. Multi-observatory inter-comparison of line-of-sight synoptic solar magnetograms // *Solar Phys.* 2013. V. 289. P. 769–792. DOI: 10.1007/s11207-013-0353-1.
- Rudenko G.V. Extrapolation of solar magnetic field within the potential-field approximation from full-disk magnetograms // *Solar Phys.* 2001. V. 198. P. 5–30.

Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity // *J. Geophys. Res.* 1973. V. 78, N 1. P. 92–108. DOI: 10.1029/JA078i001p00092.

Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness N.E. A model of interplanetary and coronal magnetic field // *Solar Phys.* 1969. V. 6. P. 442–455. DOI: 10.1007/BF00146478.

Solanki S.K., Steiner O., Buente M., et al. On the reliability of Stokes diagnostics of magnetic elements away from solar disk center // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 333. P. 721–731.

Svalgaard L. How good (or bad) are the inner boundary conditions for heliospheric solar wind modelling // Presentation at 2006 SHINE Workshop.

Svalgaard L., Duvall T.L.Jr., Scherrer P.H. The strength of the Sun's polar field // *Solar Phys.* 1978. V. 58. P. 225–239. DOI: 10.1007/BF00157268.

Tlatov A.G., Pashenko M.P., Ponyavin D.I., et al. Forecast of solar wind parameters according to STOP magnetograph observations // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016. V. 56, N 8. P. 1095–1103. DOI: 10.1134/S0016793216080223.

Ulrich R.K. Analysis of magnetic fluxtubes on the solar surface from observations at Mt. Wilson of  $\lambda$  5250 and 5233 // Seventh Cambridge Workshop: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun. 1992. P. 265–267. (ASP Conf. Ser. V. 26).

Ulrich R.K., Bertello L., Boyden J.E., Webster L. Interpretation of solar magnetic field strength observations // *Solar Phys.* 2009. V. 255, N 1. P. 53–78.

Wang Y.-M., Sheeley N.R.Jr. On potential field models of the solar corona // *Astrophys. J.* 1992. V. 392. P. 310–319.

Wang Y.-M., Sheeley N.R. Solar implications of Ulysses interplanetary field measurements // *Astrophys. J. Lett.* 1995. V. 447. P. L143–L146. DOI: 10.1086/309578.

Weinzierl M., Mackay D., Yeeatles A., Pevtsov A.A. The possible impact of L5 magnetograms on non-potential solar coronal magnetic fields simulations // *Astrophys. J.* 2016. V. 828, id. 102. 12 p. DOI: 10.3847/0004-637X/828/2/102.

Zhao X., Hoeksema J.T. Prediction of the interplanetary magnetic field strength // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100, N A1. P. 19–33. DOI: 10.1029/94JA02266.

## REFERENCES

Altschuller M.D., Newkirk J.Jr. Magnetic fields and the structure of the corona. I. Methods of calculating coronal fields. *Solar Phys.* 1969, vol. 9, pp. 131–149. DOI: 10.1007/BF00145734.

Arge C.N., Pizzo V.J. Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A5, pp. 10.465–10.479.

Arge C.N., Henney C.J., Koller J., et al. Air Force Data Assimilative Photospheric Flux Transport (ADAPT) Model. *12<sup>th</sup> International Solar Wind Conference.* 2010, pp. 343–346. DOI: 10.1063/1.3395870. (AIP Conference Proc. vol. 1216).

Balasubramaniam K.S., Pevtsov A. Ground-based synoptic instrumentation for solar observations. *Proc. SPIE.* 2011, vol. 8148, pp. 814809-1–814809-18. DOI:10.1117/12.892824.

Bertello L., Pevtsov A.A., Petrie G.J.D., Keys D. Uncertainties in solar synoptic magnetic flux maps. *Solar Phys.* 2014, vol. 289, pp. 2419–2431. DOI: 10.1007/s11207-014-0480-3.

Cade W.B.III, Chan-Park C. The origin of «Space Weather». *Space Weather.* 2015, vol. 13, pp. 99–103. DOI: 10.1002/20145SW001141.

Carrington R.C. Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *MNRAS.* 1859, vol. 20, pp. 13–15.

Cid C., Palacios J., Saiz E., Guerrero A., Cerrato Y. On extreme geomagnetic storms. *J. Space Weather Space Climate.* 2014, vol. 4, id. 28, 10 p.

Cliwer E.W., Kamide Y., Ling A.G. Mountains Versus Valleys: Semiannual variation of geomagnetic activity. *J.*

*Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A2, pp. 2413–2424. DOI: 10.1029/1999JA900439.

Demidov M.L. Aspects of the zero level problem of solar magnetographs. *Solar Phys.* 1996, vol. 164, pp. 381–388. DOI: 10.1007/BF00146649.

Demidov M.L., Balthasar H. Spectropolarimetric observations of solar magnetic fields and the SOHO/MDI calibration issue. *Solar Phys.* 2009, vol. 260, no. 2, pp. 261–270.

Demidov M.L., Balthasar H. On multi-line spectropolarimetric diagnostics of the quiet Sun's magnetic fields. Statistics, inversion results, and effects on SOHO/MDI magnetogram calibration. *Solar Phys.* 2012, vol. 276, no. 1–2, pp. 43–59.

Demidov M.L., Golubeva E.M., Balthasar H., et al. Comparison of solar magnetic fields measured at different observatories: Peculiar strength ratio distribution across the disk. *Solar Phys.* 2008, vol. 250, no. 2, pp. 279–301.

Demidov M.L., Veretsky R.M., Kiselev A.V. On the peculiarities of manifestation of kG magnetic elements in observations of the Sun with low spatial resolution. *Proc. IAU Symp.* 2015, vol. 305, pp. 86–91. DOI: 10.1011/S1743921315004561.

Demidov M.L., Wang, X.F., Hou J.F., Wang D.G., Kiselev A.V., Kuzanyan K.M. On the cross-calibration of the Huairou Solar Observation full disk longitudinal magnetograms with data sets from STOP/SSO and SDO/HMI. *Proc. SPW-8.* (In print).

Demidov M.L., Zhigalov V.V., Peshchero V.S., Grigoryev V.M. An investigation of the Sun-as-a-star magnetic field through spectropolarimetric measurements. *Solar Phys.* 2002, vol. 209, no. 2, pp. 217–232. DOI: 10.1023/A:1021292424679.

Feng X., Jiang C., Xiang C., et al. A data-driven model for the global coronal evolution. *Astrophys. J.* 2012, vol. 758, no. 1, id. 62, 13 p. DOI: 10.1088/0004-637X/758/1/62.

Feng X., Yang L., Xiang C., et al. Validation of the 3D AMR SIP-CESE Solar Wind Model for four Carrington rotations. *Solar Phys.* 2012, vol. 279, no. 1, pp. 207–229. DOI: 10.1007/s11207-012-9969-9.

Hayashi K., Hoeksema J.T., Liu Y., et al. The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) vector magnetic field pipeline: Magnetohydrodynamics simulation module for the global solar corona. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, pp. 1507–1529.

Hayashi K., Yang S., Deng Y. Comparison of potential field solutions for Carrington rotation 2144. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 1046–1062. DOI: 10.1002/2015JAO21757.

Hoeksema J.T. Structure and evolution of the large-scale solar and heliospheric magnetic fields: *PhD Thesis.* Stanford Univ., CA. Publication Date: 09/1984.

Kovalenko V.A. *Solnechnyi veter* [Solar Wind]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 272 p. (In Russian).

Kraft S., Puschmann K.G., Luntama J.P. Remote sensing optical instrumentation for enhanced space weather monitoring from the L1 and L5 Lagrange points. *Intern. Conference on Space Optics (ICSO 2016).* 18–21 October 2016, 8 p.

Leka K.D., Barnes G., Wagner E.L. Evaluating (and improving) estimates of the solar radial magnetic field component from line-of-sight magnetograms. *Solar Phys.* 2017, vol. 292, id. 36. 26 p. DOI: 10.1007/s11207-017-1057-8.

Levine R.H., Altschuller M.D., Harvey J.M. Solar sources of the interplanetary magnetic field and solar corona. *J. Geophys. Res.* 1977, vol. 82, pp. 1061–1065.

Liu Y., Hoeksema T., Sun X., Hayashi K. Vector magnetic field synoptic charts from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI). *Solar Phys.* 2017, vol. 292, id. 29, 14 p. DOI: 10.1007/s11207-017-1056-9.

Lomov V.M. *Sto velikikh nauchnykh dostizhenii Rossii* [100 Great Scientific Advances of Russia]. Moscow, Veche Publ., 2013. 431 p. (In Russian).

Mays M.K., Taktakishvili A., Pulkkinen A., et al. Ensemble modelling of CMEs using the WSA-ENLIL+Cone

Model. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, pp. 1715–1814. DOI: 10.1007/s11207-015-0692-1.

McGregor S.L., Hughes W.J., Arge C.N., et al. The distribution of solar wind speeds during solar minimum: Calibration for numerical solar wind modeling constraints on the source of the slow solar wind. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 116, A03101. DOI: 10.1029/2010JA015881.

Mikić Z., Linker J.A., Schnack D.D., et al. Magnetohydrodynamic Modeling of the global solar corona. *Phys. Plasmas.* 1999, vol. 6, no. 5, pp. 2217–2224. DOI: 10.1063/1.873474.

Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. A nearly universal solar wind — magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, A01206. DOI: 10.1029/2006JA012015.

Newell P.T., Liou K., Gjerloev J.W., et al. Substorm probabilities are best predicted from solar wind speed. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2016, vol. 146, pp. 28–37.

Obriadko V.N., Kharshiladze A.F., Shelting D.V. Calculating solar wind parameters from solar magnetic field data. *Solar Drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances.* 1996, pp. 366–374. (*ASP Conf. Ser.*, vol. 95).

Odstrčil D., Pizzo V.J. Three-dimensional propagation of coronal mass ejections (CMEs) in a structured solar wind flow. 1. CME launched within the streamer belt. *J. Geophys. Res.* 1999, vol. 104, no. A1, pp. 483–492.

Odstrčil D., Pizzo V.J. Three-dimensional propagation of coronal mass ejections (CMEs) in a structured solar wind flow. 2. CME launched adjacent the streamer belt. *J. Geophys. Res.* 1999, vol. 104, no. A1, pp. 493–503.

Odstrčil D., Linker J.A., Lionello R., et al. Merging of coronal and heliospheric numerical two-dimensional MHD models. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, pp. SSH-14-1–SSH-14-11. DOI: 10.1029/2002JA009334.

Odstrčil D. Modelling 3-D solar wind structure. *Adv. Space Res.* 2003, vol. 32, pp. 487–306. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00332-6.

Odstrčil D., Riley P., Zhao X.P. Numerical simulation of the 12 May interplanetary CME event. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A02116, 8 p. DOI: 10.1029/2003JA010135.

Owens M.J., Spence H.E., McGregor S., et al. Metrics for solar wind prediction models: Comparison of empirical, hybrid, and physics-based schemes with 8 years of L1 observations. *Space Weather.* 2008, vol. 6, S08001. DOI: 10.1029/2007SW000380.

Peshcherov V.S., Grigoryev V.M., Bevzov A.N., Budnikov K.I., Vlasov S.V., Zotov A.A., Kotov V.N., Kitov A.K., Lubkov A.A., Lylov S.A., Perebeinos S.V., Svidsky P.M. Solar telescope for operative prediction. *Avtometriya* [Autometrics]. 2013, vol. 49, no. 6, pp. 62–69. (In Russian).

Petrie G., Ettinger S. Polar field reversals and active region decay. *Space Sci. Rev.* 2015. DOI: 10.1007/s11214-015-0189-0.

Pevtsov A.A. The need for synoptic solar observations from the ground. *Coimbra Solar Physics Meeting: Ground-based Solar Observations in the Space Instrumentation Era.* 2016, pp. 71–85. (*ASP Conf. Ser.*, vol. 504).

Pevtsov A.A., Bertello L., MacNeice P. Effect of uncertainties in solar synoptic magnetic flux maps in modelling of solar wind. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 56, pp. 2719–2726.

Pevtsov A., Bertello L., MacNeice P., Petrie G. What if we had a magnetograph at Lagrangian L5? *Space Weather.* 2016, vol. 14, pp. 1–6. DOI: 10.1002/2016SW001471.

Pietarila A., Bertello L., Harvey J.W., Pevtsov A.A. Comparison of ground-based and space-based longitudinal magnetograms. *Solar Phys.* 2013, vol. 282, pp. 91–106. DOI: 10.1007/s11207-012-0138-y.

Ponyavin D.I., Pudovkin M.I. Geomagnetic activity prediction from observation of solar magnetic fields. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy]. 1988, vol. 28, pp. 695–698. (In Russian).

Pudovkin M.I., Kozelov V.P., Lazutin L.L., Troshichev O.A., Chertkov A.D. *Fizicheskie osnovy prognozirovaniya magnitosferykh vozmushchenii* [Physical grounds for prediction of magnetospheric disturbances]. Leningrad, Nauka Publ., 1977. 312 p. (In Russian).

Riley P., Linker J.A., Mikić Z., et al. Using an MHD simulation to interpret the global context of a coronal mass ejection observed by two spacecraft. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2003, vol. 108, no. A7, pp. SSH 2-1. DOI: 10.1029/2002JA009760.

Riley P., Ben-Nun M., Linker J.A., et al. Multi-observatory inter-comparison of line-of-sight synoptic solar magnetograms. *Solar Phys.* 2013, vol. 289, pp. 769–792. DOI: 10.1007/s11207-013-0353-1.

Rudenko G.V. Extrapolation of solar magnetic field within the potential-field approximation from full-disk magnetograms. *Solar Phys.* 2001, vol. 198, pp. 5–30.

Russell C.T., McPherron R.L. Semiannual variation of geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1973, vol. 78, no. 1, pp. 92–108. DOI: 10.1029/JA078i001p00092.

Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness N.E. A model of interplanetary and coronal magnetic field. *Solar Phys.* 1969, vol. 6, pp. 442–455. DOI: 10.1007/BF00146478.

Solanki S.K., Steiner O., Buente M., et al. On the reliability of Stokes diagnostics of magnetic elements away from solar disk center. *Astron. Astrophys.* 1998, vol. 333, pp. 721–731.

Svalgaard L. How good (or bad) are the inner boundary conditions for heliospheric solar wind modelling. *Presentation at 2006 SHINE Workshop.* 2006.

Svalgaard L., Duvall T.L.Jr., Scherrer P.H. The strength of the Sun's polar field. *Solar Phys.* 1978, vol. 58, pp. 225–239. DOI: 10.1007/BF00157268.

Tlatov A.G., Pashenko M.P., Ponyavin D.I., et al. Forecast of solar wind parameters according to STOP magnetograph observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016, vol. 56, no. 8, pp. 1095–1103. DOI: 10.1134/S0016793216080223.

Ulrich R.K. Analysis of magnetic fluxtubes on the solar surface from observations at Mt. Wilson of  $\lambda$  5250 and 5233. *Seventh Cambridge Workshop: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun.* 1992, pp. 265–267. (*ASP Conf. Ser.*, vol. 26).

Ulrich R.K., Bertello L., Boyden J.E., Webster L. Interpretation of solar magnetic field strength observations. *Solar Phys.* 2009, vol. 255, no. 1, pp. 53–78.

Wang Y.-M., Sheeley N.R.Jr. On potential field models of the solar corona. *Astrophys. J.* 1992, vol. 392, pp. 310–319.

Wang Y.-M., Sheeley N.R. Solar implications of Ulysses interplanetary field measurements. *Astrophys. J. Lett.* 1995, vol. 447, pp. L143–L146. DOI: 10.1086/309578.

Weinzierl M., Mackay D., Yeates A., Pevtsov A.A. The possible impact of L5 magnetograms on non-potential solar coronal magnetic fields simulations. *Astrophys. J.* 2016, vol. 828, id. 102, 12 p. DOI: 10.3847/0004-637X/828/2/102.

Zhao X., Hoeksema J.T. Prediction of the interplanetary magnetic field strength. *J. Geophys. Res.* 1995, vol. 100, no. A1, pp. 19–33. DOI: 10.1029/94JA02266.