

УДК 523.94, 523.9

Крупномасштабные магнитные поля Солнца по наблюдениям в видимых и инфракрасных линиях и некоторые проблемы космической погоды

М.Л. Демидов¹, И. Ханаока², Т. Сакураи²

¹ ФГБУН Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
demid@iszf.irk.ru

² Солнечная научная обсерватория, Национальная астрономическая обсерватория Японии, Митака, Токио, Япония
yoichoro.hanaoka@nao.ac.jp

Поступила в редакцию 19 октября 2021 г.

Аннотация. Одним из наиболее актуальных направлений современной науки, имеющим к тому же важный прикладной аспект, является космическая погода (КП) – исследование и прогноз физических условий в межпланетном космическом пространстве, обусловленных процессами на Солнце. В настоящее время достигнут значительный прогресс в прогнозировании таких важных параметров КП, как скорость и плотность солнечного ветра. Но некоторые проблемы по-прежнему далеки от решения. Одна из таких проблем – противоречие в рассчитанных по различным моделям и наблюдаемых значениях напряженности межпланетного магнитного поля (ММП). Попытки устранить такое различие, например посредством корректировки магнитограмм, носят довольно искусственный характер и не дают стабильного результата. Основной целью настоящей работы, наряду с задачей сопоставления солнечных полнодисковых магнитограмм, получаемых в различных обсерваториях, является попытка разрешения данного противоречия посредством использования новых наблюдений, выполненных в инфракрасных линиях. Такие линии, как известно, отличаются более высокой чувствительностью к слабым магнитным полям (а именно слабые крупномасштабные магнитные поля определяют параметры ММП), чем линии видимого диапазона. Измерения в инфракрасных линиях Fe I 1564.8 нм, Si I 1082.7 нм, He I 1083.0 нм выполняются на инструменте IRmag (Infrared Stokes spectro-polarimeter) Национальной астрономической обсерватории Японии (NAOJ). Используемые наблюдения в линиях видимого диапазона выполнены на инструментах GONG, SDO/HMI, Wilcox Solar Observatory (WSO), Солнечном телескопе оперативных прогнозов Саянской солнечной обсерватории (СТОП ССО). Обнаружено, что систематические различия в магнитограммах, выполненных в различных линиях, могут быть очень значительными и достигать фактора 2–5. Показано, что при использовании в расчетах ММП наблюдений в линии Si I 1082.7 нм удается в значительной степени устранить противоречие между модельными расчетами и экспериментальными результатами.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля, спектральные линии, корона, гелиосфера, космическая погода

1 Введение

Актуальные проблемы современной физики Солнца в контексте солнечно-земных связей заключаются не только в поиске механизмов нагрева короны, но и в понимании природы корональных магнитных полей. Прямые измерения корональных магнитных полей в настоящее время очень ограничены. Но поскольку такие поля формируются в фотосферных слоях, важным способом изучения полей в короне является моделирование, основанное на наблюдениях магнитных полей в фотосфере. Однако известно, что измерения фотосферных магнитных полей, выполняемые в разных спектральных линиях в разных обсерваториях, часто показывают различные (иногда значительно) результаты

(см., например, [Demidov et al., 2008](#); [Riley et al., 2014](#), а также недавнюю работу [Demidov et al., 2018](#) и приведенные в ней ссылки). Важно отметить, что эти различия зачастую не постоянны по диску Солнца, а испытывают центрo-лиmбовые вариации (ЦЛВ).

Исследования проблемы значительных различий при наблюдениях в разных спектральных линиях (обусловленных такими факторами, как различная чувствительность к магнитному полю, к плотности плазмы и температуре) и обсерваториях показали, что анализ таких различий может являться мощным инструментом для изучения свойств магнитных силовых трубок. Такие исследования важны также в контексте космической погоды, поскольку любые различия на магнитограммах и синоптических картах, которые наблюдаются в данных разных спектральных линий, имеют прямое влияние на результаты расчета межпланетного магнитного поля в гелиосфере.

Один хорошо известный пример проблемы такого рода, имеющей долгую историю ([Wang, Sheeley, 1995](#)), – это наличие существенной разницы (в два раза и более) между наблюдаемой напряженностью межпланетного магнитного поля вблизи орбиты Земли и расчетными значениями, основанными на использовании данных солнечной обсерватории имени Дж. Уилкокса (WSO – Wilcox Solar Observatory). Для устранения такого противоречия [Wang, Sheeley \(1995\)](#) предложили использовать корректировку измерений в линии Fe I 525.02 нм, предложенную ранее [Ulrich \(1992\)](#) и основанную на сопоставлении измерений в обсерватории Маунт-Вилсон (Mount Wilson Observatory) в этой линии и в менее чувствительной к магнитному полю линии Fe I 523.29 нм. Используемый в этих работах поправочный коэффициент имеет вид:

$$K = 4.5 - 2.5 \sin^2(r), \quad (1)$$

где r – гелиоцентрический угол.

В последующем [Tran et al. \(2005\)](#) и [Ulrich et al. \(2009\)](#) предприняли еще несколько попыток пересмотреть магнитограммы WSO (и косвенно других инструментов) с целью учета насыщения линии Fe I 525.02 нм в сильном магнитном поле. Наиболее широкое распространение получило несколько модифицированное выражение для корректировки, предложенное в [Ulrich et al. \(2009\)](#):

$$K = 4.15 - 2.82 \sin^2(r). \quad (2)$$

Однако некоторые авторы ([Svalgaard et al., 1978](#); [Shrauner, Scherrer, 1994](#); [Demidov, Balthasar, 2009, 2012](#)) возражают против такой коррекции измерений в линии Fe I 525.02 нм.

Это означает, что проблема еще не решена и новые наблюдения солнечных магнитных полей в разных спектральных линиях полезны и приветствуются. Поэтому очень хорошо, что с апреля 2010 г. полнодисковые магнитограммы в трех инфракрасных спектральных линиях (Fe I 1564.8 нм, Si I 1082.7 нм, He I 1083.0 нм) начали получать с помощью инфракрасного спектрополяриметра IRmag (InfraRed magnetograph) в обсерватории Митака (Mitaka) Национальной астрономической обсерватории Японии (NAOJ) ([Sakurai et al., 2018](#)). Естественно, что такие новые наблюдения интересно проанализировать с точки зрения возможности их приложения к исследованиям крупномасштабных магнитных полей, а также сравнить их с наблюдениями в линиях видимого диапазона, которые предоставляются другими обсерваториями. Имеет смысл обсудить с использованием нового ряда данных и некоторые аспекты космической погоды. Некоторые из приведенных ниже результатов были частично представлены на конференции по солнечной поляризации SPW9 ([Demidov et al., 2019](#)).

2 Сопоставление крупномасштабных магнитных полей Солнца, наблюдаемых в инфракрасных (IRmag) и видимых (GONG, SDO/HMI, STOP SSO) спектральных линиях

Сравнение магнитограмм IRmag в трех спектральных линиях, полученных одновременно или квази-одновременно, показало их хорошее соответствие (коэффициенты корреляции близки к единице), но коэффициенты регрессии варьируют от 2 до 6 в зависимости от выбранной комбинации линий. Эти систематические различия могут быть вызваны разной глубиной формирования соответствующих спектральных линий и/или особенностями калибровки, которые подробно рассмотрены в [Sakurai et al. \(2018\)](#). Некоторый разброс точек (коэффициенты корреляции все же отличаются от единицы) обусловлен имеющими место незначительными центрo-лиmбовыми вариациями отношений напряженностей и зависимостью этих отношений от величины напряженности магнитного поля. На примере линий Si I 1082.7 нм и Fe I 1564.8 нм эти зависимости показаны на рис. 1.

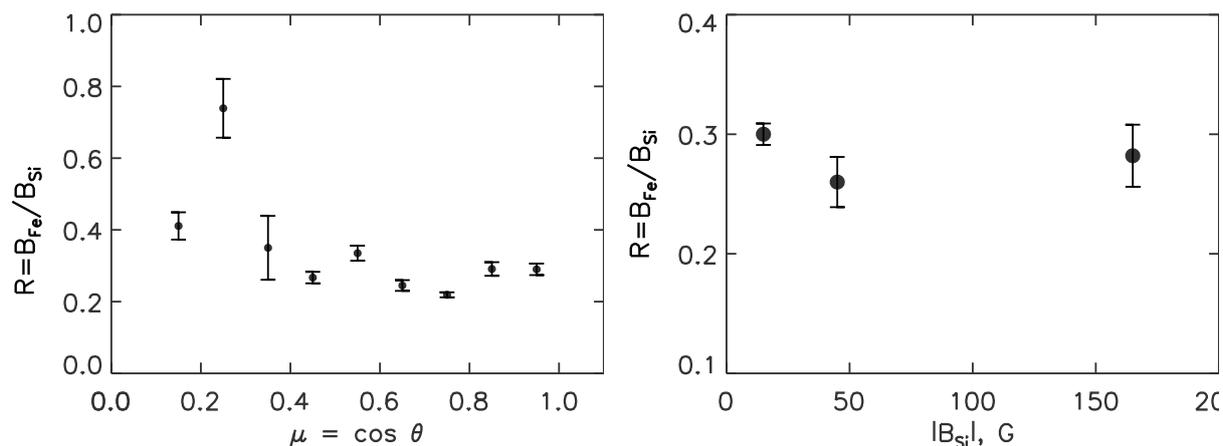


Рис. 1. Зависимость отношения напряженностей ($R = B_{\text{Fe}}/B_{\text{Si}}$) от положения на солнечном диске $\mu = \cos\theta$, где θ – гелиоцентрический угол (левая панель а), и от напряженности магнитного поля в линии Si I 1082.7 нм (правая панель б)

Столь высокой корреляции вряд ли можно ожидать от сравнения измерений, выполненных разными инструментами. Поэтому интересно знать, в какой степени данные IRmag соответствуют наблюдениям на других инструментах. Результаты сравнения магнитограммы IRmag, полученной в линии Si I 1082.7 нм, с одной из магнитограмм SDO/HMI (Solar Dynamics Observatory/Helioseismic and Magnetic Imager) (линия Fe I 617.3 нм) представлены на левой панели рис. 2. На правой панели этого рисунка показано сопоставление магнитограммы IRmag в линии Fe I 1564.8 нм с магнитограммой GONG (Global Oscillation Network Group) (линия Ni I 676.8 нм). В обоих случаях наблюдения выполнены 15 января 2013 г. Видно, что при довольно хорошей корреляции ($\rho = 0.91$) данные SDO/HMI показывают напряженности магнитного поля почти в два раза слабее IRmag ($R = 0.52$). Для данных GONG и IRmag в линии Fe I 1564.8 нм имеем $\rho = 0.74$ и очень близкие ($R \approx 1.0$) значения напряженности магнитного поля.

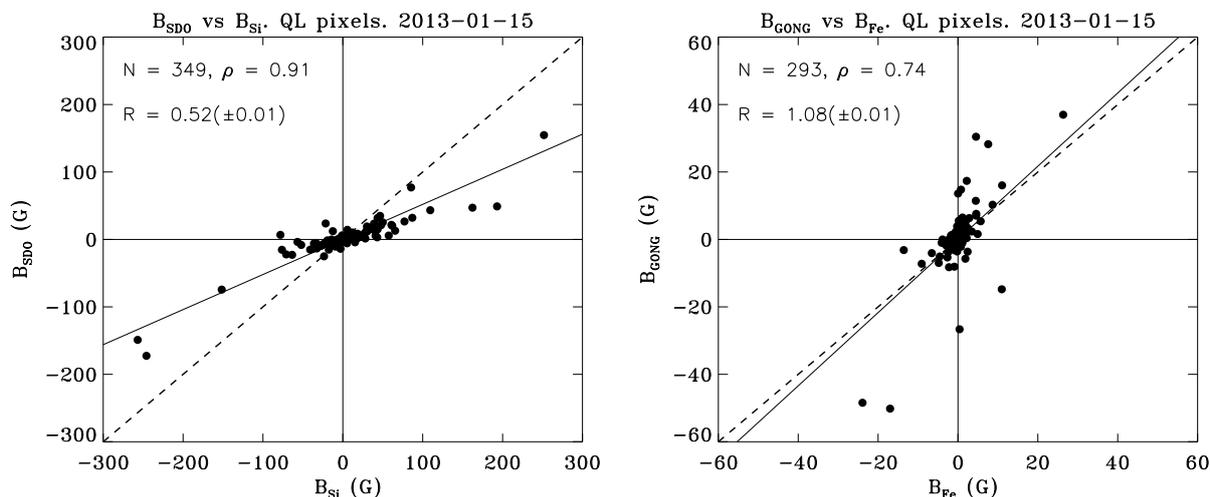


Рис. 2. Диаграммы рассеяния для магнитограммы IRmag в линии Si I 1082.7 нм (ось X) и полученной в то же время магнитограммы SDO/HMI (спектральная линия Fe I 617.3 нм) (левая панель), а также для магнитограммы IRmag в линии Fe I 1564.8 нм (ось X) и магнитограммы GONG (линия Ni I 676.8 нм) (правая панель). Наблюдения 15 января 2013 г. N – количество пар точек (пикселей), ρ – коэффициент корреляции, R – коэффициент линейной регрессии (сплошная линия). Пунктирная линия соответствует случаю $R = 1.0$

Мы также сравнили данные IRmag с магнитограммами в видимом свете из других обсерваторий. В частности, для сравнения с наблюдениями Солнечного телескопа оперативных прогнозов Саян-

ской солнечной обсерватории (СТОП ССО) (STOP SSO – Solar Telescope for Operative Predictions of the Sayan Solar Observatory) был выбран другой день, 30 октября 2015 г., с гораздо более слабыми магнитными полями на солнечном диске. Результаты сопоставления магнитограммы STOP SSO (спектральная линия Fe I 525.02 нм) с магнитограммой IRmag в линии Si I 1082.7 нм показаны на рис. 3 (левая панель). Близкое, но все же разное время наблюдений, а также различия в двух инструментах привели к тому, что разброс точек в этом случае довольно большой ($\rho = 0.63$). Но важно отметить, что в случае STOP SSO, как и в предыдущем с SDO/HMI, наблюдаемые напряженности магнитного поля в инфракрасной линии IRmag Si I 1082.7 нм практически в два раза ($R \approx 1.8$) больше, чем в линиях видимого диапазона. На правой панели этого рисунка показано сопоставление данных STOP SSO с наблюдениями в WSO, причем в обоих случаях выполнено интерполирование исходных данных на равномерную сетку кэррингтоновских координат. Систематическое различие в этом случае (коэффициент регрессии равен 0.84) довольно незначительное и может быть объяснено различиями в процедурах калибровки и другими инструментально-методическими особенностями.

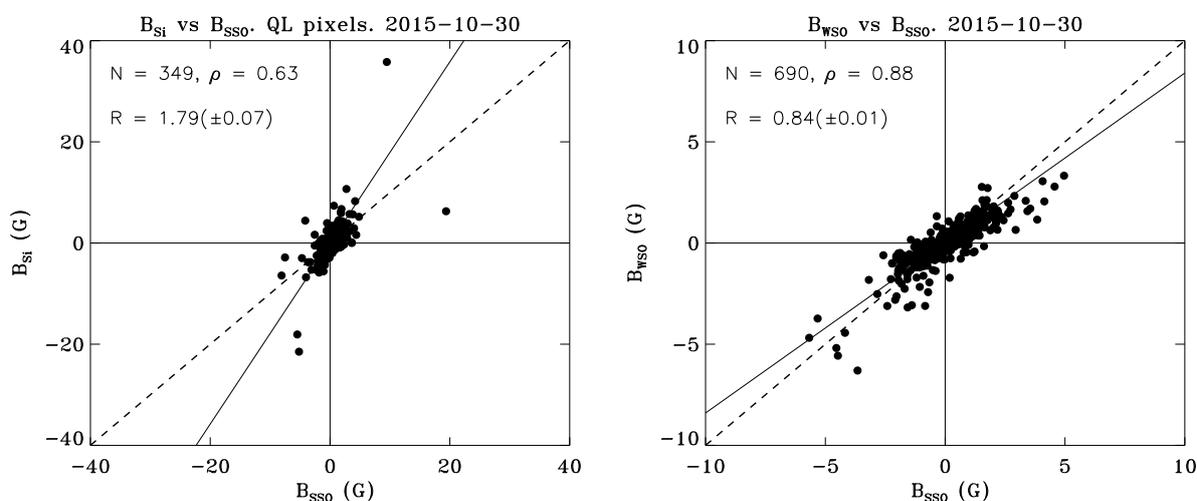


Рис. 3. График рассеяния для магнитограммы IRmag в линии Si I 1082.7 нм и магнитограммы STOP SSO в линии Fe I 525.02 нм (левая панель). Сопоставление магнитограмм STOP SSO и WSO, пересчитанных на сетку кэррингтоновских координат (правая панель). Наблюдения 30 октября 2015 г. N – количество пар точек (пикселей), ρ – коэффициент корреляции, R – коэффициент линейной регрессии (сплошная линия). Пунктирная линия соответствует случаю $R = 1.0$

В следующем разделе мы покажем, что такой же вывод справедлив не только для отдельных магнитограмм, но также для синоптических карт и других параметров, определяемых на их основе.

3 Сходство и различия данных IRmag и некоторых других обсерваторий на корональном уровне

Одним из важных применений полнораспределенных наблюдений магнитных полей Солнца является их использование для расчетов – в различных модельных допущениях – параметров короны вблизи Солнца и гелиосферы до орбиты Земли и далее. Несмотря на то, что для таких расчетов были разработаны различные очень сложные 3D МГД-модели, вплоть до настоящего времени широко используется и дает хорошие результаты для приложений космической погоды довольно старая и относительно простая модель PFSS (Potential Field Source Surface) (поверхность источника потенциального поля).

В расчетах PFSS и других моделей в качестве нижнего граничного условия используются синоптические карты фотосферных магнитных полей из наблюдений на различных инструментах. Одним из основных параметров, получаемых в результате расчетов по модели PFSS, является распределение магнитных полей на поверхности источника. Естественно, интересно проанализировать, как данные IRmag соотносятся с другими данными в этом аспекте.

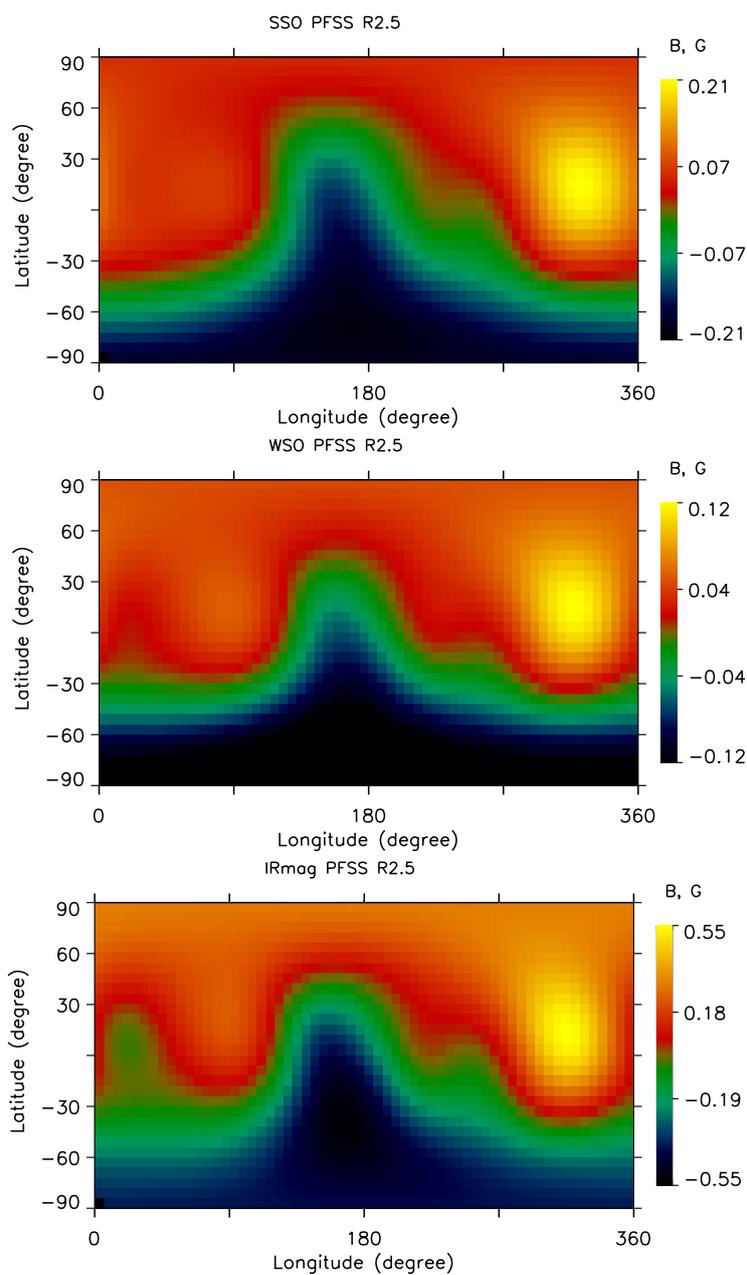


Рис. 4. Распределение напряженности магнитного поля на поверхности источника по данным SSO (верхняя панель), WSO (средняя панель) и Mitaka (нижняя) для кэррингтоновского оборота CR 2164. Расчеты выполнены в приближении радиального магнитного поля с использованием модели PFSS

Для этого на рис. 4 представлены распределения напряженностей радиальной компоненты магнитного поля на поверхности источника для случая SSO (верхняя панель), WSO (средняя панель) и Mitaka (нижняя) для кэррингтоновского оборота CR 2164. Высота поверхности источника в расчетах принималась равной 2.5 радиуса Солнца. Можно видеть, что картинки выглядят вполне аналогично, но есть некоторые отличия в поведении токового слоя. Что более важно, существенны различия в значениях напряженности магнитного поля.

Интересно отметить, что данный кэррингтоновский оборот весьма уникален, поскольку в нем наблюдалась корональная дыра, пересекающая солнечный экватор. Наряду с некоторыми другими, данный оборот исследовался в недавней работе Wang, Ko (2019).

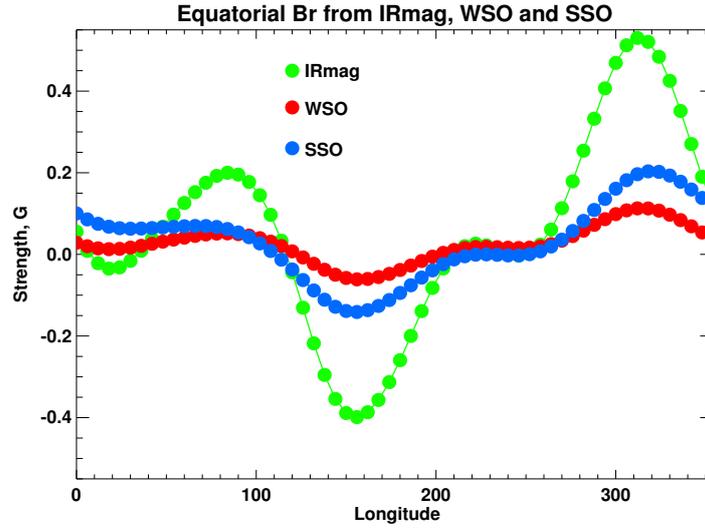


Рис. 5. Долготное распределение открытого магнитного потока B_r на поверхности источника вблизи солнечного экватора по данным трех обсерваторий: Mitaka (IRmag), WSO и SSO

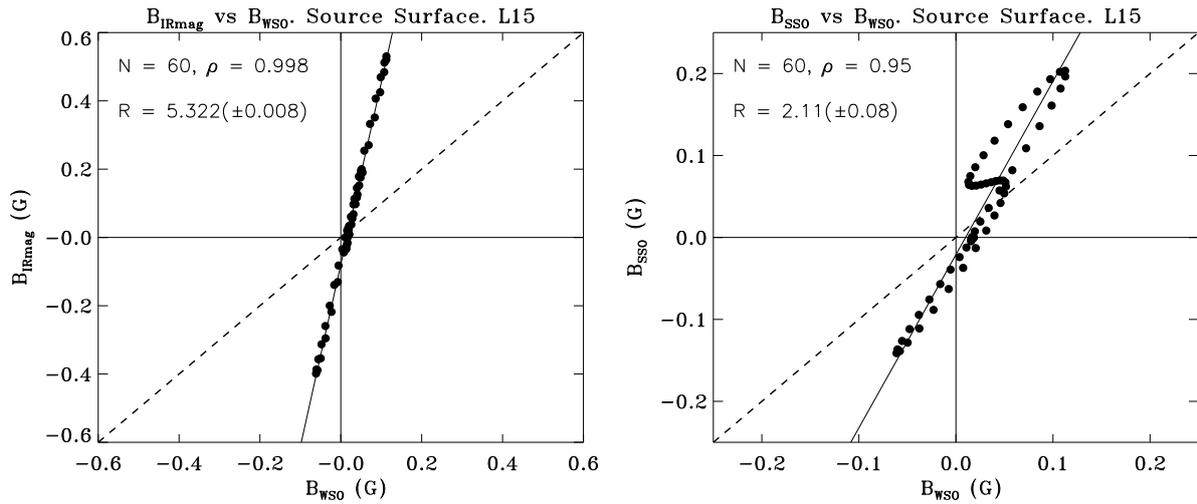


Рис. 6. Количественное сравнение кривых, представленных на рис. 4. N – число пар точек (пиксели), ρ – коэффициент корреляции, R – коэффициент линейной регрессии (сплошная линия). Пунктирная линия соответствует случаю $R = 1.0$

Чтобы проиллюстрировать сходство и различие распределений B_r на поверхности источника более подробно, была выбрана область по широте, близкая к солнечному экватору (которая является наиболее важной с точки зрения воздействия на Землю). На рис. 5 показано долготное распределение B_r для случаев IRmag, WSO и STOP SSO. Очевидно, что все три кривые показывают схожее поведение, но их амплитуды существенно различаются.

Это подтверждается количественным анализом, представленным на рис. 6, где для соответствующих комбинаций данных на графиках показаны коэффициенты корреляции и регрессии. Интересно отметить, что данные STOP SSO показывают напряженности магнитного поля на поверхности источника в два раза более сильные, чем данные WSO. Для случая IRmag коэффициент различия с данными WSO даже больше, чем в уравнении (1), и составляет ≈ 5 .

В контексте проблем космической погоды, помимо напряженности магнитного поля на орбите Земли, которая рассчитывается по данным, представленным на рис. 4, важное значение имеет предсказание параметров солнечного ветра. Необходимым этапом для этого является расчет положения

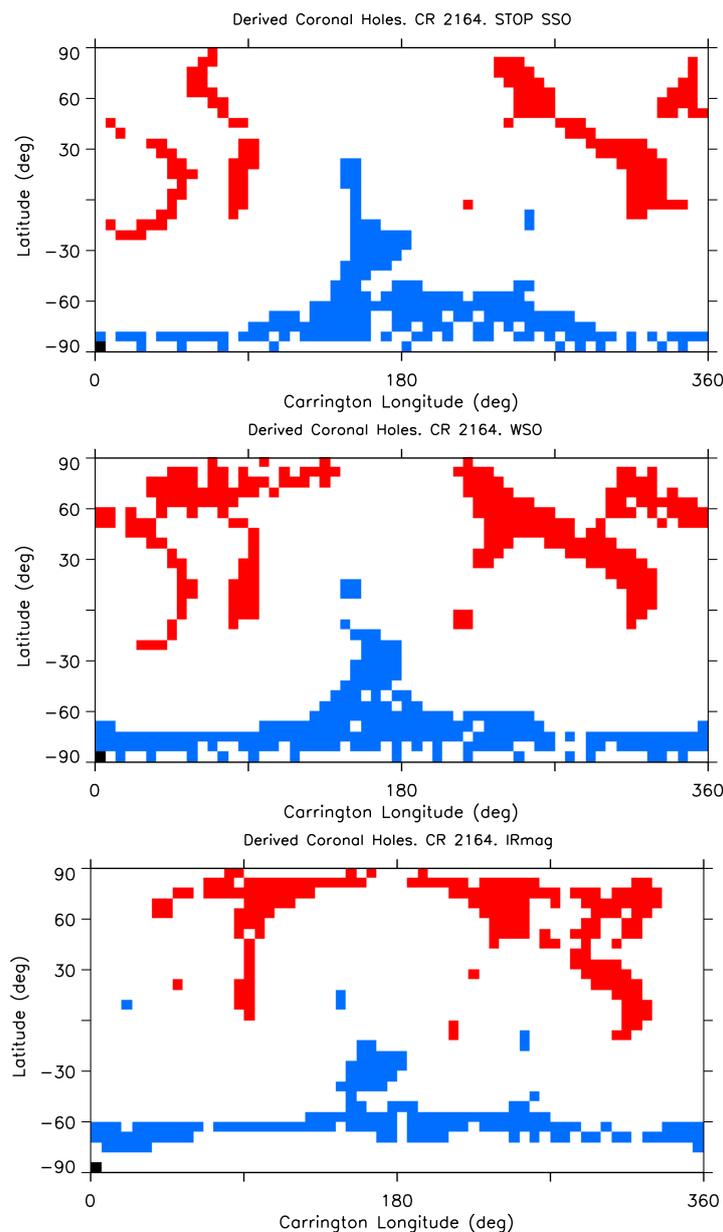


Рис. 7. Корональные дыры на поверхности Солнца, рассчитанные по данным SSO (верхняя панель), WSO (средняя панель) и Mitaka (нижняя) для кэррингтоновского оборота CR 2164. Расчеты выполнены в приближении радиального магнитного поля с использованием модели PFSS. Различный цвет корональных дыр означает различную полярность магнитного поля: красный – положительную полярность, синий (и черный для пикселя в начале координат) – отрицательную полярность. При расчетах крайние строки матриц, соответствующие полярным областям, были заполнены посредством интерполяции соседних строк с более низких широт. Размерность матриц составляет 73 (долгота) на 30 (широта) пикселей

корональных дыр, из которых солнечный ветер преимущественно и истекает. Для анализируемого в данной работе кэррингтоновского оборота CR 2164 соответствующие расчеты были выполнены для всех трех используемых источников данных (синоптических карт). Результаты представлены на рис. 7. Ясно видно, что имеют место различия, относительно небольшие между SSO и WSO и весьма существенные между SSO, WSO с одной стороны и с Mitaka с другой.

Таким образом, важный вывод, который следует из выполненного анализа, заключается в том, что наблюдения на IRmag в инфракрасной спектральной линии Si I 1082.7 нм показывают напряжен-

ности магнитного поля на уровне фотосферы и в короне (поверхность источника в расчетах находилась на расстоянии 2.5 радиуса Солнца), которые значительно (в 2–5 раз) больше, чем наблюдения с другими инструментами в линиях видимого диапазона. При этом вид и положение корональных дыр на солнечной поверхности, рассчитанные по данным наблюдений в этой линии, также существенно отличаются. Безусловно, эти факты имеют важное значение для многих аспектов космической погоды.

Благодарности. Данная работа была выполнена частично за счет гранта Visiting Joint Research при поддержке комитета координации исследований NAOJ. Работа выполнялась при бюджетном финансировании Программы фундаментальных исследований II.16. Данные SDO/HMI, GONG, WSO взяты из источников: Joint Science Operations Center¹, Global Oscillation Network Group², The Wilcox Solar Observatory³. Некоторые используемые здесь PFSS-коды взяты из предоставленного M.L. DeRosa пакета SSW⁴ (solar software).

Литература

- Demidov M.L., Balthasar H., 2009. *Solar Phys.*, vol. 260, pp. 261–270.
- Demidov M.L., Balthasar H., 2012. *Solar Phys.*, vol. 276, pp. 43–59.
- Demidov M.L., Golubeva E.M., Balthasar H., Staude J., Grigiryev V.M., 2008. *Solar Phys.*, vol. 250, pp. 279–301.
- Demidov M.L., Wang X.F., Wang D.G., Deng Y.Y., 2018. *Solar Phys.*, vol. 293, no. 10, p. 146.
- Demidov M., Hanaoka Y., Sakurai T., 2019. In Gandorfer A.M., Lagg A., Raab K. (Eds), *Proceedings of the 9th Solar Polarization Workshop SPW9*. Published open access by MPS 2020, id. 2, [doi:10.17617/2.3213520](https://doi.org/10.17617/2.3213520)
- Riley P., Ben-Nun M., Linker J.A., et al., 2014. *Solar Phys.*, vol. 289, pp. 769–792.
- Sakurai T., Hanaoka Y., Arai T., et al., 2018. *Publ. Astron. Soc. Japan*, vol. 70(4), id. 58.
- Shrauner J.A., Scherrer P.H., 1994. *Solar Phys.*, vol. 153, pp. 131–141.
- Svalgaard L., Duvall T.L., Jr., Scherrer P.H., 1978. *Solar Phys.*, vol. 58, pp. 225–239.
- Tran T., Bertello L., Ulrich R.K., Evans S., 2005. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, vol. 156, pp. 295–310.
- Ulrich R.K., 1992. In Giampapa M.S., Bookbinder J.A. (Eds), *Seventh Cambridge Workshop: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*. ASP Conf. Ser., vol. 26, pp. 265–267.
- Ulrich R.K., Bertello L., Boyden J.E., Webster L., 2009. *Solar Phys.*, vol. 255, pp. 53–78.
- Wang Y.M., Ko Y.K., 2019. *Astroph. J.*, vol. 880, p. 146.
- Wang Y.M., Sheeley N.R., 1995. *Astrophys. J. Lett.*, vol. 447, pp. L143–148.

¹ <http://jsoc.stanford.edu>

² <http://gong.nso.edu>

³ <http://wso.stanford.edu>

⁴ <http://www.lmsal.com/~derosa/pfsspack>

Large-scale solar magnetic fields from observations in the visible and infrared spectral lines and some space weather issues

M.L. Demidov¹, Y. Hanaoka², T. Sakurai²

¹ Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (ISTP SB RAS), Lermontov str., 126a, Irkutsk, 664033, Russia
demid@iszf.irk.ru

² Solar Science Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, Osawa, Mitaka, Tokio, 181-8588, Japan
yoichiro.hanaoka@nao.ac.jp

Abstract. One of the most important areas of modern science, which also has a great applied aspect, is space weather (SW) – the study and forecast of physical conditions in interplanetary space caused by processes on the Sun. At present, significant progress has been achieved in predicting such important SW parameters as velocity and density of the solar wind. But some problems are still far from being solved. One of these problems is a contradiction in the values of the interplanetary magnetic field (IMF) calculated by different models and observed ones. Attempts to eliminate such a difference, for example, by correcting magnetograms, are rather artificial and do not give a stable result. The main purpose of this study, along with comparison of solar full-disk magnetograms obtained at various observatories, is an attempt to resolve this contradiction by using new observations made in infrared lines. Such lines are known to be more sensitive to weak magnetic fields (namely, such weak large-scale magnetic fields determine the IMF parameters) than lines in the visible range. Measurements in the infrared lines such as Fe I 1564.8 nm, Si I 1082.7 nm, He I 1083.0 nm are performed with the IRmag instrument (Infrared Stokes spectro-polarimeter) of the National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ). The used observations in the lines of the visible range were carried out with the GONG, SDO/HMI, Wilcox Solar Observatory (WSO) instruments, and the Solar Telescope for Operative Predictions of the Sayan Solar Observatory (STOP SSO). It was found that systematic differences in magnetograms made in different lines can be very significant and reach a factor of 2–5. It is shown that the use of observations in the Si I 1082.7 nm line in IMF calculations makes it possible to largely eliminate the contradiction between model calculations and experimental results.

Key words: Sun, magnetic fields, spectral lines, corona, heliosphere, space weather