

К ПРОГНОЗАМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК: СОСТОЯНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПОДХОДЫ

Г.Я. Смольков, В.П. Максимов, Д.В. Просовецкий, А.М. Уралов,
И.А. Бакунина, Г.В. Руденко, Р.А. Сыч, С.А. Анфиногентов, И.И. Мышьяков

ON SOLAR FLARE FORECAST: CURRENT STATUS, PROBLEMS AND APPROACHES

G.Ya. Smolkov, V.P. Maksimov, D.V. Prosovetsky, A.M. Uralov,
I.A. Bakunina, G.V. Rudenko, R.A. Sych, S.A. Anfinogentov, I.I. Myshyakov

*Памяти В.П. Нефедьева посвящается
Dedicated to the memory of V.P. Nefediev*

К настоящему времени разработаны различные методы и накоплен большой опыт прогнозирования солнечной активности. Большинство научных центров дают прогнозы солнечных вспышек на основе сведений о структуре и динамике магнитных полей, определяемых либо по прямым измерениям поля на уровне фотосферы, либо косвенными методами по изображениям Солнца в хромосферных спектральных линиях и излучению в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Прогноз должен давать ответ на три вопроса: где и когда произойдет вспышка, и какую мощность она будет иметь. В работе обсуждаются возможные ответы, исходя из результатов теоретических и радиогелиографических исследований предвспышечной стадии развития активных областей в микроволновом излучении, выполненных в ИСЗФ СО РАН.

To date, various methods of solar activity forecast have been developed and wide experience in this area has been accumulated. Most scientific centres forecast solar flares using information on magnetic field structure and dynamics determined from direct measurements of the field at the photospheric level or by indirect methods from solar images in chromospheric spectral lines and UV and X-radiation. The forecast must provide answers to three questions of where and when a flare will occur and what power it will have. This paper discusses possible answers, reasoning from results of ISTP SB RAS theoretical and radio-heliographic studies of the preflare stage of the development of active regions in microwave radiation.

Введение

Солнечные вспышки характеризуются взрывным высвобождением энергии, в результате чего возникают потоки плазмы и заряженных частиц высокой энергии, а также повышенное рентгеновское и ультрафиолетовое излучение, которые могут приводить к возмущениям в околоземном космическом пространстве, выводу из строя наземных, бортовых и спутниковых технологических систем, угрожать здоровью и жизни людей. Заблаговременный прогноз солнечных вспышек позволяет существенно снизить негативные последствия таких процессов.

Оправдываемость (надежность) прогноза зависит от качества и полноты наблюдательных данных при мониторинге солнечной активности. Полное временное покрытие в пределах одной обсерватории невозможно в силу естественного ограничения светового дня и погодных условий. Поэтому для прогнозов используются данные мировой сети солнечных обсерваторий и данные, регистрируемые космическими аппаратами. Предусмотрены обмен информацией в реальном масштабе времени между ведущими прогностическими центрами, обработка и анализ наблюдательных данных.

Результаты прогноза должны давать ответ на три вопроса: где и когда произойдет вспышка, и какую мощность она будет иметь. Такой подход сложился в Центре прогноза космической погоды NOAA (NOAA Space Weather Prediction Center): «For the first time, we can tell two to three days in advance when and where a solar flare will occur and how large it will be» (Впервые мы можем сказать с заблаговременностью 2–3 дня, когда и где произойдет вспышка, и какую мощность она будет иметь) [Reinard, 2010]. Предполагается возможность предсказания вспышек с

заблаговременностью 2–3 дня, а также увеличение этой заблаговременности путем регистрации звуковых волн в скрученном фрагментарном магнитном поле групп солнечных пятен.

Существующие методы прогноза солнечных вспышек позволяют ответить на вышеупомянутые вопросы с различной степенью детальности и надежности. Наиболее уверенно определяется активная область (АО), в которой произойдет вспышка. Однако из рассмотрения выпадают случаи, когда вспышечно-активная область находится за лимбом. Для ответа на вопрос, когда произойдет вспышка, разработаны методы краткосрочного прогноза (заблаговременность 1–3 дня) и предупреждения (заблаговременность 0–24 ч) [например, Ишков, 1998]. Мощность вспышки обычно характеризуется интенсивностью всплеска рентгеновского излучения.

В целом ситуацию с прогнозом гелиогеофизической обстановки по ряду причин еще нельзя назвать удовлетворительной. Несмотря на быстрое увеличение объема данных, необходимых для прогноза вспышек, основные принципы прогноза и его оправдываемость все еще нуждаются в существенном улучшении. Повышения качества прогноза вспышек можно ожидать путем соединения современных наблюдений солнечных магнитных полей с достижениями компьютерного моделирования [Петрукович и др., 2008].

В ИСЗФ достигнуты определенные успехи в эффективном прогнозировании вспышек. Для ответа на вышеупомянутые вопросы предполагается следующее:

- 1) радиогелиографический критерий потенциальной вспышечной опасности АО;
- 2) оценка времени и места возникновения вспышки при анализе радиоисточников в короне АО

над нейтральной линией магнитного поля, а также феноменологической связи между волновыми явлениями в корональных петлях и подготовкой вспышки;

3) оценка свободной магнитной энергии (разности между энергией магнитного поля с непотенциальной и потенциальной конфигурациями) при восстановлении топологии магнитного поля в атмосфере АО по его наблюдениям на уровне фотосферы.

Результаты и подход

Существующая практика прогноза вспышечной активности все еще слабо учитывает данные о микроволновом излучении, содержащем важную информацию о структуре короны активных областей (АО). При детальном анализе большого количества микроволновых изображений активных областей, производящих мощные рентгеновские вспышки, по данным CCRT [Grechnev et al., 2003] и NoRH были обнаружены квазистационарные источники, ассоциирующиеся с нейтральной линией фотосферного магнитного поля, – нейтральные источники [Uralov et al., 1998]. На частоте 17 ГГц нейтральные источники распознаются по их расположению в тех местах линии инверсии вертикальной составляющей восстановленного в нижней короне магнитного поля, где горизонтальная составляющая имеет максимум [Uralov et al., 2006]. Установлено, что нейтральный источник появляется под корональным токовым слоем в магнитных петлях, основания которых находятся в зоне движений сильных магнитных полей. В этих петлях нередко генерируется микроволновое излучение мощных вспышек. Формирование коронального выброса массы происходит на фазе роста интенсивностей микроволнового и жесткого рентгеновского всплесков [Uralov et al., 2008]. Яркие нейтральные источники обнаружены только в АО, производящих мощные, длительные рентгеновские вспышки. Использование данных на частотах CCRT и NoRH позволило выявить тонкий предвспышечный признак – смещения центров интенсивности и круговой поляризации, обусловленные визуальной трансформацией нейтральных источников в источник микроволнового излучения над пятном или наоборот [Смольков и др., 2008].

Поляризованное микроволновое излучение АО в их предвспышечном состоянии обладает рядом характерных признаков, позволивших выявить радиогелиографический критерий для краткосрочного прогноза их вспышечной продуктивности с довольно высокой степенью оправданности [Максимов и др., 1988; 1996; Maksimov et al., 1990a, b]. Для учета особенностей генерации и распространения излучения в короне АО на видимой стороне Солнца выделяются долготные зоны I–II–III–IV с характерным для каждой зоны «нормальным» (обусловленным только условиями распространения радиоизлучения в магнитосфере спокойной АО) распределением поляризации (S-униполярное для зоны II и E-биполярное для зоны III). Границы зон определяются по результатам статистического исследования появления (исчезновения) поляризованного микроволнового излучения при восходе (заходе) невспышечных АО из-за лимба (за лимб) и явления смены

знака поляризации. Границы зон являются индивидуальными для каждой АО и зависят от гелиографических координат, протяженности, угла наклона оси группы пятен к экватору, магнитного класса АО. Границы зон – функция угла между направлением поля в области генерации излучения и лучом зрения. Все эти факторы учтены в эмпирических формулах. Отклонение от нормального распределения поляризации – признак подготовки вспышки (S-конфигурация для униполярных АО во всех долготных зонах никогда не является вспышечноопасной, мультиполярная P-конфигурация вспышечноопасна во всех долготных зонах). Оценки вспышечной продуктивности АО для всех вспышек, для вспышек балла 1N и вспышек балла >1B в долготных зонах II и III показали следующее.

1. Наибольшая плотность вспышек в обеих зонах приходится на P-конфигурацию, согласно критерию Танака–Эноме.

2. В зоне II вспышечная продуктивность для E-конфигурации выше, чем для S-конфигурации, а в зоне III – наоборот (в отличие от критерия Танака–Эноме). Этот эффект более выражен для мощных вспышек балла >1B.

3. Вспышки балла 1N, по-видимому, более или менее равновероятны как для E-, так и для S-конфигурации.

Эффективность метода проверена сравнением с методом Танака–Эноме [Tanaka et al., 1975], предложенным для прогноза протонных вспышек с использованием меньшего углового разрешения, путем выполнения ретроспективного прогноза мощных солнечных вспышек для 28 АО по двум критериям – прогнозировалось количество спокойных и возмущенных дней, а также число вспышек отдельно по баллам. При достаточном числе событий оправданность прогноза для спокойных и возмущенных дней вспышек балла 1N, 1B и 2B по предложенному нами критерию выше, чем по критерию Танака–Эноме, причем наиболее явно это проявилось в зоне III. Способ применим не только в прилиम्бовых областях, не доступных для исследования оптическими методами из-за эффектов проекции. Он позволяет также делать прогноз и для АО за 1–2 дня до ее выхода на видимую сторону Солнца и спустя 1–2 дня после захода, допуская автоматизацию оценки вероятности вспышек [Maksimov et al., 2005].

Наряду с этим установлены и другие признаки подготовки вспышек: возрастание потока излучения до величины больше 20 с.е.п. перед мощными вспышками, резкие изменения поведения излучательной способности АО, возрастание степени связи субвспышки в Ha с микроволновым всплеском [Smolkov et al., 2000]. При параллельной регистрации спектра микроволнового излучения АО на РАТАНе обнаружены явления уярчения, инверсии и понижения поляризации перед мощными вспышками [Bogod et al., 2003].

По данным радиогелиографов CCRT и NoRH выявлен двухчастотный критерий «нормальных» долготных зон, использующий положения метода прогнозирования вспышек на основе одночастотного критерия и сравнительного анализа явления смены

знака круговой поляризации. Этот критерий при использовании таблиц сопряженности и коэффициента успешности для прогнозирования уровня вспышечной активности выше M1.0 для 20 вспышечнопродуктивных АО более эффективен в сравнении со способом прогнозирования по поляризационному критерию Танака–Эноме и одночастотным способом как для данных CCPT (5.7 ГГц), так и для данных NoRH (17 ГГц). Он эффективнее тем, что улучшается прогноз отсутствия вспышки, уменьшается пропуск цели и растет коэффициент успешности [Бакунина, 2007а; Бакунина и др., 2007б, 2008]. Этот способ успешно использован при диагностике АО 10930, в которой имели место долгоживущий NLS и ряд мощных вспышек [Смольков и др., 2008].

Радиогелиографические исследования взаимосвязи между колебательными процессами в пятнах и возникновением вспышечной активности в их ближайших окрестностях [Sych et al., 2009] показали, что перед началом микроволновых радиовсплесков происходит значительное нарастание мощности осцилляций в диапазоне периодов ~2–4 мин с возникновением значимого пика мощности за 10–12 мин до всплеска. При сравнении пространственной структуры источников над пятном на различных уровнях солнечной атмосферы обнаружено, что источник осцилляций пространственно совпадает с тонкими магнитными петлями, формирующими низколежащие аркады в короне и соединяющими области противоположного по знаку магнитного поля. При этом в зависимости от регистрации излучения на разных длинах волн ожидается разное время усиления мощности трехминутных колебаний перед вспышкой, что связано с распределением по высоте источников радиоизлучения. При регистрации движущихся вверх волновых пакетов времена возмущения гирорезонансных слоев будут различаться. Если нарастание выноса энергии волнами занимает два–три цуга, максимальное время ожидания вспышек может быть ~12–30 мин. Для предупреждения о поднимающихся снизу вверх возмущениях, которые могут стать триггером для вспышек в близлежащих областях, крайне необходимо использование многочастотных радиогелиографов.

Активные области характеризуются локально усиленным магнитным полем. Высокая ионизация плазмы обуславливает вмерзненность силовых линий, т. е. взаимосвязанность вещества и поля. В областях с преобладанием магнитного давления (плазменный параметр $\beta \ll 1$) движение плазмы определяется структурой поля, что характерно для пространства короны. Связанные с этими областями динамические процессы, такие как вспышки и корональные выбросы массы, могут иметь геоэффективные последствия. Источником энергии для них является магнитное поле, релаксирующее в состоянии с меньшей энергией. Поэтому для понимания физической природы явлений солнечной активности и прогнозирования ее развития необходимо знание трехмерной структуры магнитного поля АО. Исходными данными для численного моделирования объемной топологии магнитного поля в атмосфере АО служат фотосферные магнитограммы, получаемые

на основе эффекта Зеемана. При этом весьма актуальной является краевая задача расчета пространственной конфигурации магнитного поля с использованием фотосферных векторных магнитограмм высокого разрешения.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке методик восстановления поля в нелинейном бессиловом приближении [Schrijver et al., 2006; 2008]. Нами разработан алгоритм, основанный на методе оптимизации [Wheatland et al., 2000], суть которого состоит в последовательном преобразовании некоего исходного, например потенциального, поля в ограниченной области пространства к нелинейному бессиловому полю в соответствии с граничными условиями [Rudenko, Myshyakov, 2009]. Полученная таким образом информация о трехмерной структуре магнитного поля позволяет рассчитывать различные связанные с ним физические характеристики, такие как энергия и электрические токи. Этот алгоритм был применен для восстановления магнитного поля АО 10930. В конфигурации силовых линий восстановленного поля четко выделяется сигмоидная структура, характерная для предвспышечного состояния АО, которая хорошо согласуется с рентгеновским изображением петельной структуры. Экстраполяция в потенциальном приближении не дает такой степени совпадения. Иллюстрации находятся в электронном доступе на <http://bdm.iszf.irk.ru/NLFF.htm>. После того как была получена магнитограмма, в этой области через несколько часов 13 декабря 2006 г. в 02:40 UT произошла вспышка класса X3.4. С использованием информации о бессиловом и потенциальном полях в исследуемой области пространства была рассчитана свободная энергия как разность между энергиями бессилового и потенциального полей для моментов времени до вспышки и после нее (12 декабря 2006 г., 20:30 UT и 13 декабря 2006 г., 04:30 UT соответственно). Падение свободной энергии составило $3.45 \cdot 10^{32}$ эрг, что превышает теоретический порог 10^{32} эрг для вспышек такого класса и корональных выбросов массы.

Заключение

Показана возможность дать в будущем ответы на три вопроса, возникающие при прогнозировании солнечных вспышек.

Дальнейшие задачи связаны с выявлением и использованием признаков подготовки вспышек с большей заблаговременностью, т. е. с возможно большим временем ожидания, достаточным для предупреждения об опасности для наземных, атмосферных и орбитальных технологий.

Перспективы дальнейшего развития радиогелиографической диагностики вспышечной продуктивности АО связаны с созданием солнечных радиотелескопов нового поколения [Bastian et al., 1998; Smolkov et al., 2000; Lesovoi et al., 2004, 2006, 2008].

Безусловно, сохраняется необходимость круглосуточного всепогодного мониторинга солнечной активности, а также ее предметно-ориентированной рутинной диагностики специально созданным прогностическим центром с участием групп заинтересо-

ванных ведомств и организаций. Для непрерывного совершенствования основ прогнозирования необходимы новые научные исследования, поскольку проводимые в настоящее время чаще имеют поисковый характер и отличаются недостаточными средствами для выполнения оперативной деятельности.

Работы поддержаны Сибирским отделением РАН, Лаврентьевским грантом 2010–2011 гг. СО РАН, Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 30 «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля», Минобрнауки РФ (Уникальные установки: № 01-27 – ССРТ), грантами РФФИ 10-02-00153-а, 08-02-92204-ГФЕН_а, 08-02-91860-КО_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакунина И.А. Исследование возможностей краткосрочного прогноза солнечных вспышек на основе двухчастотного критерия «нормальных» долготных зон // Труды Всеросс. конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности» / Нижний Архыз, 2006, СПбГУ, 2007а. С. 340–769.
- Бакунина И.А., Смольков Г.Я., Снегирев С.Д. Радиогелиографический двухчастотный метод прогнозирования солнечных вспышек по микроволновому излучению // Труды ВАК-2007. 2007б. С. 192–193.
- Бакунина И.А., Смольков Г.Я., Снегирев С.Д. О «геометрических» эффектах в микроволновом излучении активных областей при их прохождении по солнечному диску // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 61, № 8. С. 641–659.
- Ишков В.И. Всплывающие магнитные потоки – ключ к прогнозу больших солнечных вспышек // Изв. РАН. 1998. Т. 62, № 9. С. 1835–1839.
- Лесовой С.В., Занданов В.Г., Смольков Г.Я. и др. Модернизация Сибирского солнечного радиотелескопа // Труды Всеросс. конференции «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности» / ИЗМИРАН, 2006. С. 241–248.
- Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Занданов В.Г. и др. 10-антенный макет многоволнового радиогелиографа на базе ССРТ // Труды Международного симпозиума «МГГ-2007: Новый взгляд на солнечно-земную физику» // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12, Т. 1. С. 71–73.
- Максимов В.П., Бакунина И.А., Нефедьев В.П., Смольков Г.Я. Связь вспышечной активности с распределением поляризации микроволнового излучения групп пятен // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. М.: Наука, 1988. Вып. 83. С. 111–116.
- Максимов В.П., Бакунина И.А., Нефедьев В.П., Смольков Г.Я. Способ краткосрочного прогноза мощных солнечных вспышек // Бюллетень изобретений. 1996. № 216. Патент № 2114449 от 27.06.1998 г. С. 131–134.
- Мышьяков И.И., Руденко Г.В. Сравнение двух подходов к реализации оптимизационного метода реконструкции нелинейного бессилового поля // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 11. С. 114–119.
- Петрукович А.А., Белов А.В., Обридо В.Н. Прогноз гелиогеофизической обстановки // Плазменная гелиогеофизика / Под ред. Л.М. Зеленого, Веселовского И.С. Т. 2. М.: Физматлит, 2008. С. 235–257.
- Смольков Г.Я., Фомичев В.В., Снегирев С.Д. Радиоизлучение Солнца и космическая погода // Солнечно-земная физика. 2002. Вып. 2. С. 31–35.
- Смольков Г.Я., Алтынцев А.Т., Гречнев В.В. и др. Микроволновая диагностика и прогноз геоэффективных проявлений солнечной активности // Труды Всеросс. конференции «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования гелиогеофизической активности» / ИЗМИРАН, 2005. С. 293–303.
- Смольков Г.Я., Уралов А.М., Бакунина И.А. Радиогелиографическая диагностика потенциальной вспышечной продуктивности активных областей // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12, Т. 1. С. 40–43.
- Руденко Г.В. Экстраполяция солнечного магнитного поля в потенциальном приближении по магнитограммам полного диска // Препринт № 2-99, Иркутск: ИСЗФ. 14 с.
- Bastian T.S., Gary D.E., White S.M., Hurford G.J. Towards a frequency-agile radiotelescope (FASR) // Proc. SPIE, 1998. V. 3357. P. 609.
- Bogod V.M., Tokhchukova S.Kh. Peculiarities of the microwave emission from active regions generating intense solar flares // Astron. Lett. 2003. V. 29. P. 263–273.
- Grechnev V.V., Lesovoi S.V., Smolkov G.Ya., et al. The Siberian Solar Radio Telescope: The current state of the instrument, observations, and data // Solar Phys., 2003. V. 216, Iss.1. P. 239–272.
- Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Smolkov G.Ya., et al. Upgrade of the Siberian Solar Radio Telescope // Nobeyama Symposium “Solar Physics with the Nobeyama Radioheliograph”, <http://solar.nro.nao.ac.jp/meeting/nbsym04/>.
- Maksimov V.P., Nefedev V.P., Smolkov G.Ya., Bakunina I.A. Flare activity prediction from the polarization distribution of microwave emission of sunspot groups // Solar-Terr. Predictions / Eds. R. Thompson et al. Boulder: NOAA, 1990a. V. 1. P. 526–532.
- Maksimov V.P., Nefedev V.P., Smolkov G.Ya., Bakunina I.A. Flare activity prediction from the polarization distribution of microwave emission of sunspot groups // Proc. of Symp. on Nobeyama Radioheliograph – A New Tool for Understanding of Solar Flares / Ed. M. Masaki. Nobeyama: NRO. 1990b. P. 165–171.
- Maksimov V.P., Prosovetsky D.V. Structure of the program of short-term prediction of powerful solar flares // Chinese J. Space Sci. 2005. V. 25, N 5. P. 329–332.
- Reinard A. Solar flares can now be predicted more accurately // Astrophys. J. Lett. 2010 (in press). NOAA, http://www.noaa.gov/stories/2010/20100119_solarflare.html.
- Rudenko G.V. On the validity of application of the radial approximation for the photospheric field // Solar Phys. 2004. V. 220. P. 1–20.
- Rudenko G.V., Myshyakov I.I. Analysis of reconstruction methods for nonlinear force-free fields // Solar Phys. 2009. V. 257, Iss. 2. P. 287–304.
- Smolkov G.Ya., Maksimov V.P., Uralov A.M. Microwave signatures of flare buildup // Adv. Space Res. 2000. V. 26. P. 193–196.
- Smolkov G.Ya., Altyntsev A.T., Zandanov V.G. Towards the creation of the radioheliograph of new population // Proc. of SPIE. 2000. V. 4015. P. 197–203.
- Smolkov G.Ya. Radio-heliographic diagnostics of solar activity that governs space weather // Chinese J. Space Sci. Special Issue of China-Russia Joint Research on Space Weather. 2005. V. 25, N 5. P. 338–344.
- Schrijver C.J., De Rosa M.L., Metcalf T.R., et al. Nonlinear force-free modeling of coronal magnetic fields. Part I: A quantitative comparison of methods // Solar Phys. 2006. V. 235. P. 161–190.
- Schrijver C. J., De Rosa M.L., Metcalf T.R., et al. Nonlinear force-free field modeling of a solar active region around the time of a major flare and coronal mass ejection // Astrophys. J. 2008. V. 675. 1637–1644.
- Sych R.A., Nakariakov V.M. The pixelised wavelet filtering method to study waves and oscillations in time sequences of solar atmospheric images // Solar Phys. 2008. V. 248, Iss. 2. P. 395–408.
- Sych R., Nakariakov V.M., Karlicky M., Anfinogentov S. Relationship between wave processes in sunspots and quasi-

periodic pulsations in active region flares // *Astron. Astrophys.* 2009. V. 505. P. 791–799.

Uralov A.M., Sych R.A., Shchepkina V.L., et al. Weakly polarized microwave sources in active regions prior to large X-ray flares // *Solar Phys.* 1998. V. 183, N 2. P. 359–368.

Uralov A.M., Rudenko G.V., Rudenko I.G. 17 GHz neutral line associated sources: Birth, motion, and projection effect // *Publications of the Astron. Society of Japan.* 2006. V. 58, N 1. P. 21–28.

Uralov A.M., Grechnev V.V., Rudenko G.V., et al. Microwave neutral line associated source and a current sheet // *Solar Phys.* 2008. V. 249, Iss. 2. P. 315–335.

Tanaka H., Enome Sh. The microwave structure of coronal condensations and its relation to proton flares // *Solar Phys.* 1975. V. 40. P. 123–134.

Wheatland M.S., Sturrock P.A., Roumeliotis G. An optimization approach to reconstructing force-free fields // *Astrophys. J.* 2000. V. 540. P. 1150–1155.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск