

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

---

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

Ю.С. Шугай, И.С. Веселовский, Д.Б. Ситон, Д. Бергманс

**ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РЕКУРРЕНТНЫХ ПОТОКОВ  
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-10/874

Москва, 2011

**ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РЕКУРРЕНТНЫХ ПОТОКОВ  
СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-10/874

## Аннотация

В статье представлен иерархический подход к прогнозированию квазистационарных высокоскоростных потоков солнечного ветра (СВ), позволяющий объединить разнородные входные данные в одну систему. Использовались данные о суточных значениях площадей корональных дыр, рассчитанные по изображениям Солнца в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, а также информация об измеренной скорости потоков СВ за предыдущие обороты Солнца. Площади корональных дыр рассчитывались по изображениям, полученным прибором SWAP со спутника PROBA2 в спектральном диапазоне с центром на длине волны 17.4 нм и прибором AIA с космического аппарата SDO с центром на длинах волн 19.3 нм и 17.1 нм. Для прогноза были взяты данные за 2010 год, период роста 24-го цикла солнечной активности. На первом уровне иерархии было получено несколько простых модельных оценок скорости потоков СВ на основе входных данных каждого типа. На втором уровне иерархии из полученных оценок формировался окончательный прогноз скорости СВ на 3 дня вперед. Предложенный иерархический подход позволяет повысить точность прогноза скорости СВ. Кроме того, при такой методике прогнозирования пропуски в данных одного космического аппарата не оказывают критического влияния на конечный результат прогнозирования всей системы в целом.

Yu. S. Shugay, I. S. Veselovsky, D. B. Seaton, D. Berghmans

**HIERARCHICAL APPROACH TO FORECAST RECURRENT SOLAR WIND STREAMS**

Preprint MSU SINP N 2011-10/874

## Abstract

**Abstract** - The article presents a hierarchical approach for the predicting of high-speed quasi-stationary solar wind streams. This approach integrates various types of data in a single forecasting system by means of an ensemble of experts. Daily values of coronal hole areas obtained from solar images taken in the ultraviolet spectral range and information about solar wind velocity from previous solar rotation were used. The images for coronal hole area calculation were obtained from satellite PROBA2/SWAP in the spectral range centered at a wavelength of 17.4 nm and the AIA instrument of SDO spacecraft centered at wavelengths of 19.3 nm and 17.1 nm. The data from May to December 2010 which corresponds to the rising phase of the 24-th solar activity cycle was used. At the first level of hierarchy several simple model estimates of the solar wind velocity were obtained using the input data of each type. At the second level of hierarchy the final forecast of solar wind velocity was formed based on these estimates. Described method allows improving the forecast accuracy and shows robust results on examination data set with periods of rapid change of SW flow recurrence. In addition, the data gaps from one spacecraft do not have a critical impact on the final forecasting result of the whole system.

© Ю.С. Шугай, И.С. Веселовский, Д.Б. Ситон, Д. Бергманс  
© НИИЯФ МГУ, 2011, <http://www.sinp.msu.ru>

## **Введение**

Известно, что повторяющиеся (рекуррентные) высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП СВ) существуют длительное время и приводят к заметным, особенно в высоких широтах, но не очень сильным рекуррентным геомагнитным возмущениям, имеющим длительный характер порядка нескольких или даже многих дней вплоть до целого оборота Солнца (Chapman и Bartels, 1940; Sheeley et al., 1976; Harvey and Sheeley, 1978). Высокоскоростные потоки СВ наблюдаются в течение всего солнечного цикла и даже в период минимума, хотя максимальные значения их скорости могут быть ниже, чем в период спада солнечного цикла. Каждое отдельное геомагнитное возмущение от прохождения такого потока СВ мало по сравнению с возмущением от корональных выбросов масс, однако, их суммарное влияние может быть значительным. Таким образом, прогнозирование рекуррентных квазистационарных потоков СВ представляет собой актуальную задачу.

Известно, что существует заметная связь между прохождением низкоширотных корональных дыр (КД) по диску Солнца и регистрацией рекуррентных ВСП СВ на околоземной орбите (Nolte et al., 1976; Harvey and Sheeley, 1978; Wang and Sheeley, 1990; Cranmer 2009). КД обычно определяют как области униполярного магнитного поля, которые в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах проявляются как области пониженной интенсивности из-за низкой плотности и температуры плазмы. Хорошо известно, что такие параметры как площадь, интенсивность, местоположение КД влияют на параметры ВСП СВ, регистрируемые на околоземной орбите. Высокая корреляция наблюдается между площадью/интенсивностью КД и скоростью СВ в период спада солнечного цикла (Nolte et al., 1976; Robbins et al., 2006; Obridko et al., 2009). На величину корреляции влияет также выбор спектрального диапазона, геометрический размер и форма области, используемые для определения параметров корональных дыр (Shugai et al., 2009).

Для автоматического выделения КД на изображениях Солнца в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах применяются как простые алгоритмы, основанные на пороговой интенсивности, так и более сложные алгоритмы (Vrsnak et al., 2007, Obridko et al., 2009, Barra et al., 2009; Krista and Gallagher, 2009). Обзор алгоритмов обработки солнечных изображений представлен в работе (Aschwanden, 2010). В последнее время используются данные в различных спектральных диапазонах и с разных космических аппаратов (Madjarska and Wiegmann, 2009; Del Zanna et al., 2009; Scholl and Habbal, 2008). Такие данные позволяют получить дополнительную информацию о параметрах КД: размерах, мелкомасштабной эволюции границ (Madjarska and Wiegmann, 2009), параметрах магнитного поля (Abramenko et al., 2009), изменении площади КД с возрастанием высоты над поверхностью Солнца (Stepanian

et al., 2008), а также представляют интерес для понимания морфологии КД при различных корональных температурах.

Для оценки и прогнозирования скорости СВ на несколько суток вперед по параметрам КД используются различные эмпирические соотношения (Robbins et al., 2006; Veselovsky et al., 2006b; Vrsnak et al., 2007; Luo et al., 2008; Obridko et al., 2009) и искусственные нейронные сети (Dolenko et al., 2007). Существуют подходы для прогнозирования квазистационарных ВСП СВ, использующие измерения магнитного поля на фотосфере и основанные на эмпирических соотношениях (Wang and Sheeley, 1990; Eselevich et al., 2009), а также и с применением искусственных нейронных сетей (Wintoft and Lundstedt, 1999). Например, в широко известной полуэмпирической модели Wang-Sheeley-Argе (Wang and Sheeley, 1990; Arge and Pizzo, 2000) используется предположение о сохранении магнитного потока при расширении солнечного ветра и в качестве граничных параметров магнитного поля используется потенциальная модель магнитного поля короны, определяемая по данным о магнитном поле на фотосфере.

В последнее время доступно большое количество наблюдательных данных в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, полученных с различных космических аппаратов (КА) SOHO/EIT, STEREO/SECCHI, Hinode/XRT, Proba2/SWAP and SDO/AIA. Однако, использование таких разнородных данных в одной модели не всегда возможно и не всегда улучшает качество прогноза скорости потоков СВ из-за пропусков в данных и сильных различиях в характеристиках КД, наблюдаемых в разных спектральных диапазонах на различных космических аппаратах. Следует заметить, что наблюдаемые отличия могут быть разными для крупномасштабных долгоживущих КД и небольших низкоширотных КД, живущих несколько оборотов (Шугай и Веселовский, 2007). Для улучшения качества прогноза скорости СВ на основе входных данных, получаемых из различных источников, можно использовать иерархический подход. В этом случае на втором уровне иерархии для получения окончательного прогноза комбинируются результаты различных экспертных систем первого уровня. Как известно, в ряде случаев разбиение проблемы прогнозирования на серию задач меньшего масштаба с последующим объединением полученных результатов позволяет в ряде случаев значительно повысить точность прогнозирования (Терехов, 2008; Brown, 2010). Подобный подход нами уже применялся при прогнозировании потоков СВ и показал хорошие результаты. Было показано, что иерархический подход на основе искусственных нейронных сетей позволяет улучшить прогноз скорости СВ (Shugai et al., 2007). В данной работе описан иерархический подход на основе линейных моделей, которые используют в качестве входных переменных параметры КД, рассчитанные по изображениям с разных космических аппаратов и в разных спектральных диапазонах, а также информацию о потоках СВ с предыдущих оборотов. Результаты прогнозирования сравнивались с результатами, полученными с

использованием модели Wang-Sheeley-Argе (Argе and Pizzo, 2000). Прогноз скорости СВ с использованием модели Wang-Sheeley-Argе по нескольким источникам фотосферного магнитного поля от 1 до 7 дней вперед можно найти на сайте <http://www.swpc.noaa.gov/ws/>.

### Данные и методы обработки

Ранее упоминалось, что обычно для прогнозирования скорости рекуррентных потоков СВ используется информация о параметрах КД или о значениях магнитного поля на фотосфере, получаемая с космических аппаратов или наземных обсерваторий. Однако, не стоит оставлять без внимания и такие данные, как значения скорости потоков СВ, измеряемые на околоземной орбите на предыдущих оборотах. В течение солнечного цикла существуют периоды, когда наблюдается очень хорошая корреляция между повторяющимися высокоскоростными потоками СВ в течение нескольких оборотов, а в период спада солнечной активности в течение десятка оборотов Солнца. На рисунке 1 приведен пример хорошей повторяемости потоков СВ с мая по сентябрь 2010 года. Небольшие изменения в размерах и границах КД от оборота к обороту безусловно влияют на профиль и амплитуду потоков СВ, но обычно между соседними оборотами это влияние не так велико. Конечно, процессы реконфигурации глобального магнитного поля Солнца, а также спорадические процессы на Солнце (вспышки, корональные выбросы масс) могут изменить структуру потоков СВ, наблюдаемую на предыдущем обороте, очень сильно (Veselovsky et al., 2006a). В таких случаях без текущей информации о спорадических событиях и об изменениях в параметрах КД не обойтись. В представленной работе мы использовали данные об изменении суточных значений площадей КД, полученных с разных космических аппаратов и в различных спектральных диапазонах, оставляя за рамками нашего исследования потоки СВ, связанные со спорадическими событиями.



Рис 1. Черная кривая внизу - наблюдаемые значения скорости СВ. Кривыеверху - значения коэффициентов корреляции между наблюдаемой скоростью СВ и рассчитанной как среднее по двум соответствующим значениям скорости за два предыдущих оборота. Черная кривая для периода оборота, равного 28 дням, светло-серая кривая – 27 дням и серая кривая - 29 дням.

В работе использовались изображения Солнца, полученные прибором SWAP (Sun Watcher with Active Pixels and Image Processing) со спутника PROBA2 (PRoject for OnBoard Autonomy) в спектральном диапазоне с центром на длине волны 17.4 нм (Berghmans et al., 2006; Halain et al., 2010). Также мы работали с данными, полученными с космической обсерватории SDO (Solar Dynamics Observatory) (Hurlburt et al., 2010). Использовались изображения, полученные прибором AIA (Atmospheric Imaging Assembly) с центром на длинах волн 19.3 нм и 17.1 нм. Данные собирались и обрабатывались в стандартном текстовом формате fits с периодом одно изображение в день. В работе использовались калиброванные изображения уровня «level1», полученными с инструмента SWAP, и уровня «synoptic level 1.5» с инструмента AIA, размером 1024x1024. Была создана программа автоматической загрузки непрерывной последовательности изображений хорошего качества и расположенных по центру поля зрения со спутника PROBA2/SWAP. Поле зрения инструмента SWAP (54'x54') больше поля зрения инструмента AIA (41'x41'). Изображения Солнца с КА SDO/AIA были приведены к размеру изображений со спутника PROBA2/SWAP.

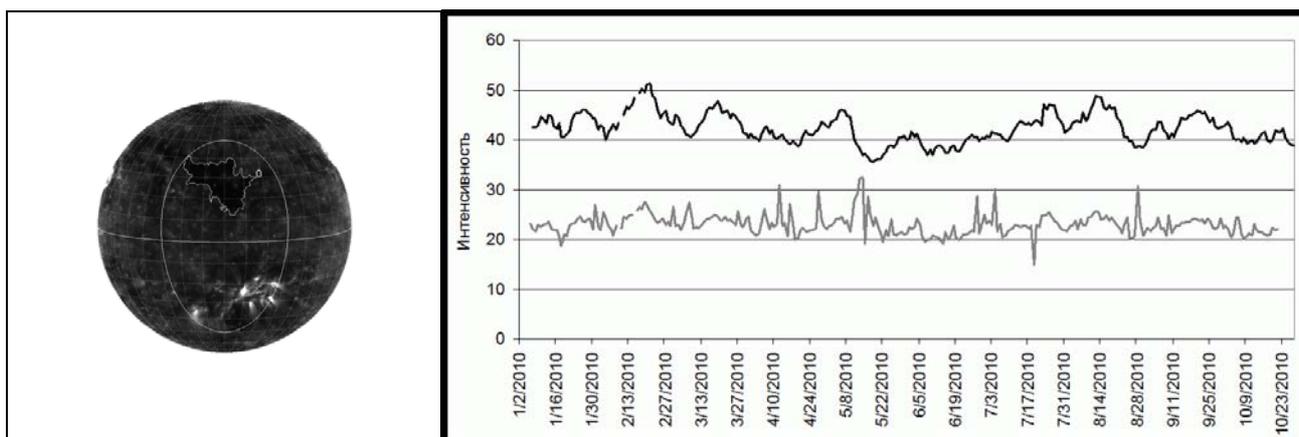


Рис 2. Слева - изображение Солнца без учета лимба, полученное с КА PROBA2/SWAP на длине волны 17.4 нм 23 августа 2010. На изображении выделена корональная дыра, которая была определена по области, величина которой по долготе была равна  $\pm 30^\circ$  от центрального меридиана Солнца, а по широте составляла  $\pm 50^\circ$  от солнечного экватора. Справа – значения средней интенсивности изображения Солнца без учета лимба для данных с КА PROBA2/SWAP с января по октябрь 2010 года. Серая кривая – после масштабирования без ограничения максимальной интенсивности изображения, черная кривая – с ограничением максимальной интенсивности на уровне 190.

Интенсивность всех изображений линейно масштабировалась в диапазон (0-255) для удобства сравнения параметров КД, полученных с разных КА и в различных диапазонах длин волн. Максимальная интенсивность изображений для каждого космического аппарата и для разных длин волн изменяется в разных диапазонах. Например, за период с апреля по декабрь 2010 года максимальная интенсивность изображений, получаемых с PROBA2/SWAP, менялась от 240 до 380, с SDO/AIA – от 6487 до 16685 для длины волны 19.4 нм и от 3838 до 16619 для длины

волны 17.1 нм. Это связано характеристиками прибора, а также с изменением яркости Солнца за счет прохождения по диску активных областей и КД, возникновения и исчезновения ярких рентгеновских точек, с нагревом магнитных петель, со вспышками и т.д.

Для расчета площадей КД использовались изображения Солнца без учета лимба (рис.2, слева) и вычислялась их средняя интенсивность. После масштабирования изображений, полученных со спутника PROBA2/SWAP, в диапазон (0, 255) были обнаружены резкие изменения средней интенсивности изображения Солнца без учета лимба, в основном увеличение на 15-60% в течение 1-5 дней (рис.2, справа, серая кривая). Такие изменения не наблюдались для величины средней интенсивности всего изображения до масштабирования. Было найдено, что такие изменения антикоррелировали с максимальной интенсивностью изображений, то есть при падении максимальной интенсивности до 240-260, средняя интенсивность масштабированного изображения возрастала. Гистограммы распределения интенсивности последовательных изображений с различной максимальной интенсивностью различаются в основном протяженностью хвоста распределения. Однако, хвост распределения может оказывать значительное влияние на поведение среднего значения интенсивности после линейного масштабирования. Изображения с максимальной интенсивностью около 350 сжимаются при масштабировании в диапазон 0 до 255 и среднее значение интенсивности уменьшается, тогда как среднее значение интенсивности изображений с максимальной интенсивностью 240-260 при масштабировании практически не меняется. Для большинства изображений, полученных с PROBA2/SWAP, максимальная интенсивность около 350 и при падении максимальной интенсивности наблюдаются резкое возрастание средней интенсивности изображения после масштабирования.

Различия в хвосте распределения гистограммы интенсивности могут быть связаны с существованием и исчезновением небольших ярких точек в основании петель или ярких рентгеновских точек, а также с поворотом или захождением за лимб ярких петель. Был проведен анализ интегрального распределения интенсивности изображений, усредненного за четыре месяца с учетом стандартного отклонения. Анализ показал, что удаление всего 0.5% самых ярких точек с изображений Солнца без учета лимба соответствует ограничению диапазона интенсивности на уровне 190 для изображений, полученных с PROBA2/SWAP. Такое ограничение на максимальную интенсивность позволяет решить проблему резких изменений средней интенсивности при масштабировании в диапазон от 0 до 255 (рис.2, справа, черная кривая). Таким образом, линейное масштабирование в диапазон (0, 255) проводилось при ограничении максимальной интенсивности изображения на уровне 190. После такой процедуры поведение величин средней интенсивности изображения Солнца без лимба до и после масштабирования совпадают.

Подобная процедура была проведена и для изображений, полученных с КА SDO/AIA. Перед масштабированием в диапазон (0, 255) максимальная интенсивность изображения ограничивалась на уровне 3300 для длины волны 19.3нм и 2200 для длины волны 17.1нм. Выбранные пороги для ограничения интенсивности представляются свободными от значительных флуктуаций для всего анализируемого временного интервала, так как они вычислялись по данным, усредненным за четыре месяца (с июля по сентябрь) с учетом стандартного отклонения.

Параметры КД (количество, координаты, площадь, интенсивность и др.) вычислялись с помощью модифицированного алгоритма, описанного в работе (Persiantsev et al., 2006). Корональными дырами считались только те области на изображениях, чей размер был больше 0.4% от диска Солнца, а интенсивность была ниже пороговой. Пороговая интенсивность вычислялась как  $I_{mean} * k$ , где  $I_{mean}$  - значение средней интенсивности изображения без учета яркости лимба, а  $k$  - значение порогового коэффициент, разное для различных КА и спектральных диапазонов: 0.4 для SWAP и SDO/AIA для длины волны 17.1 нм, 0.3 для SDO/AIA с центром на длине волны 19.3 нм. Для прогнозирования потоков СВ использовалась относительная величина площади КД, которая вычислялись путем нормирования на размер изображения Солнца без лимба.

На изображениях, полученных в спектральных диапазонах с центрами на длинах волн 17.1 нм или 17.4 нм, каналы солнечных волокон имеют интенсивность и размер, сходный с небольшими КД. Поэтому эти объекты невозможно отличить друг от друга без дополнительной информации, применяя алгоритм, основанный на пороговой интенсивности (Scholl and Habbal, 2008; Barra et al., 2009). Мы использовали изображения, полученные в линии Н-альфа, для определения местоположения волокон. Изображения в линии Н-альфа накладывались на изображения в ультрафиолетовом диапазоне. Площади КД, которые по расположению совпадают или частично совпадают с местоположением каналов волокон, удалялись из суммарной площади КД, найденной при анализе изображения. Данные, полученные в линии Н-альфа, были взяты с сайта Global High Resolution H-alpha Network ([http://swrl.njit.edu/ghn\\_web/](http://swrl.njit.edu/ghn_web/)). Для прогнозирования скорости потоков СВ на околоземной орбите наиболее существенную и точную информацию дает центральная область изображения Солнца (Рис.2, слева). Поэтому для вычисления площади КД использовалась область, величина которой по долготе была равна  $\pm 30^\circ$  от центрального меридиана Солнца, а по широте составляла  $\pm 50^\circ$  от солнечного экватора, для учета площадей КД, которые в период роста солнечного цикла могут располагаться на высоких и средних широтах.

В работе использовались среднесуточные параметры солнечного ветра, которые регистрировались на космическом аппарате ACE (Advanced Composition Explorer) и были взяты с сайта <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>.

Исследование проводилось на данных за период с мая по декабрь 2010 года, соответствующий фазе роста 24-го солнечного цикла. Данные были разбиты на два набора: тренировочный набор данных с мая по сентябрь и экзаменационный набор данных с октября по декабрь. Тренировочный набор использовался для подбора параметров моделей прогнозирования, а экзаменационный набор - для проверки качества и устойчивости работы предлагаемой методики прогнозирования.

### **Методика прогнозирования**

Суть предлагаемой методики состоит в том, что на первом уровне иерархии для решения задачи прогнозирования мы используем не одну модель, а несколько моделей меньшей сложности, а на втором уровне мы объединяем полученные прогнозы в один. Каждая из моделей может использовать различные входные данные и алгоритмы прогнозирования. Способы организации моделей можно разделить на параллельные и последовательные. В данной работе мы использовали параллельную организацию моделей. Обычно параллельную организацию моделей называют комитетом или ансамблем, а сами участвующие модели – экспертами. Каждый эксперт представляет собой некоторый метод решения одной и той же задачи. При параллельной организации отдельных моделей каждый из участников с тем или иным качеством решает одну и ту же задачу, а их совместное использование (комитет) служит для повышения итогового качества решения.

Комбинирование прогнозов отдельных моделей позволяет уменьшить итоговую ошибку прогнозирования (Jacobs et al, 1991; Brown, 2010; Hansen and Nelson, 2002; Терехов, 2008). Как известно, квадрат средней ошибки комитета из  $L$  экспертов меньше среднего значения квадратов индивидуальных ошибок:

$$E_L^2 = \left[ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \varepsilon_i \right]^2 \leq \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \varepsilon_i^2,$$

и если ошибки экспертов не коррелируют, то ошибка комитета

$$E_L = \frac{1}{\sqrt{L}} \langle E_1 \rangle,$$

где  $\langle E_1 \rangle$  - средняя ошибка одного эксперта.

Таким образом, итоговую точность прогнозирования можно улучшить, если повысить точность каждой отдельной модели и, одновременно, обеспечить статистическую независимость ошибок различных членов комитета (Терехов, 2008). Для проверки статистической независимости

распределения ошибок на практике используют значения линейной корреляции всех пар моделей из комитета. Чем больше похож данный член комитета на остальных, тем меньшую пользу он приносит, тем меньше должен быть его вес в принятии итогового решения. Для выполнения условия нескоррелированности ошибок желательно, чтобы эксперты были разнородными.

Для получения разнородных моделей обычно используются специальные, среди которых можно выделить использование различающихся наборов входных переменных. В простейшем случае все эксперты учитываются с равным весом, поскольку считаются одинаково надежными, а уровень их ошибок – примерно одинаковым. На практике эксперты могут оказаться неравноценными, и более качественные результаты можно получить, если вычислять вес эксперта, в соответствии, с величиной которого учитывать принятое данным экспертом решение. Метод вычисления веса эксперта зависит от типа задачи.

Описанный подход может применяться при решении задач большого объема, задач, в которых используется множество разнородных данных, а также при значительных пропусках в одной из последовательности используемых данных и т.д. Простота моделей первого уровня облегчает анализ полученных результатов.

## **Эксперты**

Иерархический подход к прогнозированию рекуррентных потоков СВ был реализован следующим образом. На первом уровне иерархии использовалось несколько простых экспертов для оценки скорости потоков СВ. Эксперты первой группы следили за изменениями потоков СВ от оборота к обороту. Эксперты второй группы, следили за изменениями площадей КД на масштабе времени порядка нескольких суток.

Одна из оценок использовала простое правило: поведение величины скорости СВ в каждом последующем обороте Солнца похоже на предыдущий, то есть наблюдается полная повторяемость потоков СВ. Как известно, вращение солнечной фотосферы дифференциальное, полярные области вращаются медленней. Период вращения Солнца относительно земного наблюдателя (синодический период) составляет почти 27 дней на экваторе и 32 дня у полюсов. В среднем период вращения близок к 27 суткам и во многих земных явлениях часто проявляется 27-дневная периодичность (Sheeley et al., 1976; Shnirman et al., 2010). Эту двадцати семидневную периодичность можно наблюдать и в потоках СВ, измеряемых на околоземной орбите. Корональные дыры, источники высокоскоростных потоков СВ, в основном вращаются как твердотельные объекты с периодом 27 дней, однако не для всех КД и не во все периоды солнечного цикла это так (Shnirman et al., 2010). Наблюдается как дифференциальное вращение КД, так и изменение периода вращения КД. В своем исследовании мы рассчитывали данные

для трех периодов 27, 28 и 29 дней. Однако использовали периоды вращения, равные 28 и 29 дням, так как на тренировочном наборе данных между значениями скорости потоков СВ, сдвинутыми друг относительно друга на 28-29 дней, наблюдалась несколько лучшая корреляция (рис.1).

Эксперт №1 вычислял текущее значение скорости СВ как среднее по двум соответствующим значениям скорости за два предыдущих оборота Солнца по формуле:

$$V(t) = \frac{V(t-t_0) + V(t-2*t_0)}{2} \quad (1)$$

где  $t_0$  период вращения,  $t_0=29$  дней.

Для эксперта №2 выражение (1) вычислялось при значениях  $t_0$ , равных 28 и 29 дням, а потом бралось их среднее значение. Такой эксперт будет надежнее работать при внезапном изменении периода вращения источника высокоскоростных потоков СВ.

В качестве экспертов №3, 4 и 5 на первом уровне иерархии были применены простые линейные модели. Данные о значениях площадей КД, рассчитанные по изображениям, полученным со спутника PROBA2/SWAP на длине волны 17.4 нм и с космического аппарата SDO/AIA на длинах волн 19.3 нм и 17.1 нм, использовались в качестве входных переменных.

Скорость СВ вычислялось как линейная функция от площади КД по формуле:

$$V(S_i, t) = V_{\min} + A_i * S_i(t-t_{i0}) \quad (2)$$

где  $S_i(t-t_{i0})$  относительная площадь КД за время  $t_{i0}$  до момента прогнозирования, рассчитанная для  $i$ -го космического аппарата и спектрального диапазон;  $V_{\min}$  – минимальная скорость СВ, равная для анализируемого периода 300 км/с;  $A_i$  – подбираемый параметр, разный для изображений, полученных с различных космических аппаратов и на различных длинах волн и вычисляемый методом наименьших квадратов на тренировочном наборе данных. Время задержки  $t_{i0}$  бралось равным от 3 до 4 дней в зависимости от величины текущего значения площади КД.

Эксперт №3 использовал для прогнозирования скорости СВ выражение (2), где  $S_i(t-t_{i0})$  – площадь КД, рассчитанная по изображениям с космического аппарата SDO/AIA на длине волны 19.3 нм, а значение коэффициента  $A$  равно 50.

Эксперт №4 прогнозировал скорость СВ по значениям площади КД, вычисляемым по изображениям со спутника PROBA2/SWAP на длине волны 17.4 нм. Значение коэффициента  $A$ , рассчитанное на тренировочном наборе данных, было равно 80.

Эксперт №5 для прогноза скорости СВ использовал площади КД, рассчитанные по изображениям с SDO/AIA на длине волны 17.1 нм. Однако, корреляции между полученными значениями площади КД и наблюдаемой скоростью СВ на тренировочном наборе данных была ниже у эксперта №5, чем эксперта №4. Поскольку эксперты использовали изображения Солнца,

полученные в одном спектральном диапазоне, то было решено оставить только эксперта №4 для последующего составления комитетов.

Таким образом, на первом уровне иерархии были получены четыре экспертные оценки скорости потоков СВ на основе разнородных данных.

### **Комитеты**

Результаты прогнозирования экспертов объединялись в окончательный прогноз скорости потоков СВ.

Всех экспертов можно было считать одинаково надежными, так как уровень относительной ошибки и среднеквадратичного отклонения на тренировочном наборе данных был примерно одинаковым для всех четырех экспертов.

Эксперты №1 и 2 не являются независимыми, так как построены на сходных входных параметрах, скорости СВ за предыдущий оборот. Значение коэффициента корреляции между ошибками на тренировочном наборе для экспертов №1 и 2 было достаточно велико, около 0.7. Это означает, что эксперт №1 сильно похож на эксперта №2.

Эксперты № 3 и 4 также не могут быть полностью независимыми. Они используют для прогноза скорости СВ один и тот же параметр, площадь КД. Однако, площади КД, полученные в разных спектральных диапазонах, а значит при различных корональных температурах, могут иногда значительно отличаться, что и наблюдается в поведении величины прогноза экспертов № 3 и 4 на графиках рисунка 3. Значение коэффициента корреляции между ошибками на тренировочном наборе для экспертов №3 и 4 было меньше, чем для экспертов №1 и 2. Мы использовали экспертов № 3 и 4 в одном комитете вместе и создали такой комитет, где эксперты №3 и 4 будут использоваться независимо.

Пары экспертов №1-3 и №2-4 работают с различными входными данными и являются достаточно разнородными для использования в одном комитете. Значение коэффициента корреляции между ошибками на тренировочном наборе было около 0.25. Однако, назвать и эти пары абсолютно независимыми нельзя, особенно в период высокой рекуррентности, связанный с потоками СВ из крупномасштабных долгоживущих КД.

К сожалению, получить на практике полностью независимые экспертные оценки очень трудно, а иногда и невозможно. Однако, как будет показано ниже, использование экспертных оценок, не обладающих полной независимостью, уже достаточно для того, чтобы улучшить качество и надежность прогноза в данном случае.

Было создано два комитета. Комитет №1 вычислял величину окончательного прогноза скорости СВ как среднее от значений прогноза экспертов №2, 3 и 4, то есть прогноз каждого

эксперта учитывался с равным весом. Эксперт №1 в этом комитете не используется, так как сильно похож на эксперта №2.

Комитет №2 прогнозировал значение скорости СВ, используя информацию о среднем за четыре дня значении наблюдаемой скорости СВ. Если средняя скорость была меньше 380 км/с, то использовалось среднее от значений прогноза экспертов №2 и 4, а если больше, то среднее из оценок экспертов №1 и 3. Таким образом, в комитете №2 при выборе экспертов учитывалась информация о среднем значении текущей скорости СВ. В данном комитете эксперты №3 и 4, а также эксперты №1 и 2 используются независимо друг от друга.

Следует заметить, что эксперты № 1 и 2 прогнозировали скорость СВ на 29 и 28 дней вперед, соответственно, а №3 и 4 на три дня вперед. Поэтому максимальный горизонт прогноза комитетов составляет 3 дня. Работа каждого из экспертов и комитетов проверялась на экзаменационном наборе данных с октября по декабрь 2010 года. Этот период соответствует изменению периодической структуры высокоскоростных потоков СВ, которая наблюдалась с мая 2010 года, как видно из рис. 1. Одна из причин такого изменения связана с перестройкой глобального магнитного поля Солнца, которое повлекло за собой уменьшение размеров одной КД и появление другой.

### **Результаты прогнозирования**

Для прогнозирования скорости СВ были построены четыре простые экспертные системы, описанные в предыдущем разделе, и получен прогноз скорости СВ на экзаменационном наборе данных с октября по декабрь 2010 (Рис. 3). Мы разбили экзаменационный набор на два: один с 1 по 31 октября, а другой с 1 ноября по 7 декабря (для краткости, мы обозначим его «ноябрь»). Это было сделано для того, чтобы понять, как меняются результаты прогнозирования на экзаменационном наборе данных, то есть насколько устойчиво прогнозирует наша система.

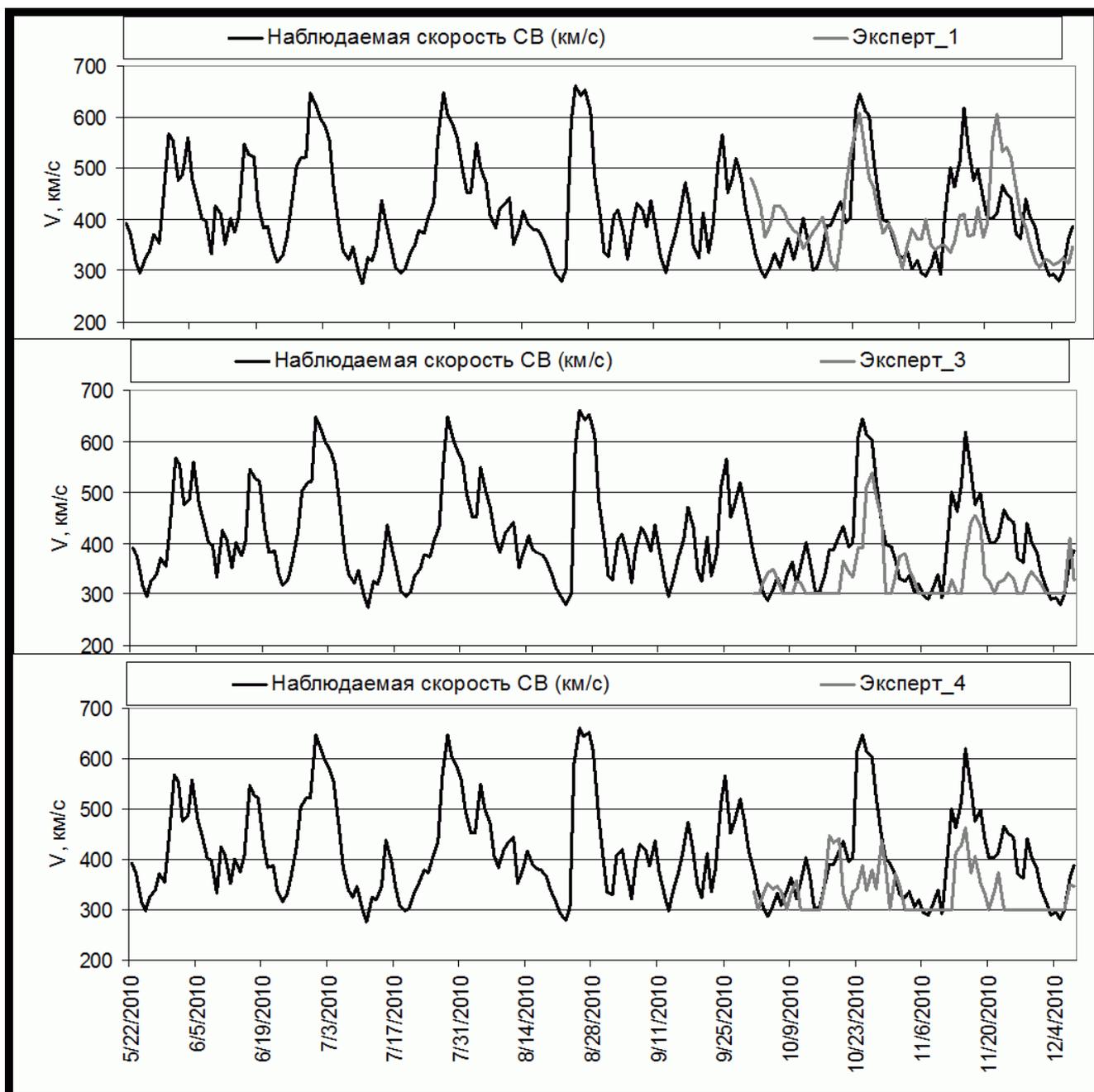


Рис. 3 Черная кривая на всех графиках - среднесуточные значения наблюдаемой скорости СВ; серые кривые - прогноз скорости СВ экспертом №1 (верхний график), №3 (средний график) и №4 (нижний график). Период с октября по декабрь 2010 года соответствует экзаменационному набору данных.

Для каждой экспертной системы (таблица 1) были рассчитаны коэффициенты корреляции (КК) и среднеквадратичное отклонение (СКО) между прогнозом и наблюдаемыми значениями скорости СВ. Полученные результаты демонстрируют, что ни один из экспертов не показал лучших результатов сразу на двух экзаменационных наборах. Кроме того, для экспертов №3 и 4 были получены более высокие значения коэффициента корреляции, тогда как эксперты №1 и 2 показывают более низкое среднеквадратичное отклонение.

Таблица 1 Коэффициенты корреляции и среднеквадратичное отклонение между прогнозом и наблюдаемыми значениями скорости СВ, рассчитанные на экзаменационном наборе данных для четырех экспертов.

	Эксперт 1		Эксперт 2		Эксперт 3		Эксперт 4	
Ошибки	КК	СКО	КК	СКО	КК	СКО	КК	СКО
октябрь	<b>0.66</b>	<b>76</b>	<b>0.63</b>	<b>77</b>	<b>0.76</b>	<b>85</b>	<b>0.28</b>	<b>109</b>
ноябрь	<b>0.40</b>	<b>88</b>	<b>0.42</b>	<b>84</b>	<b>0.48</b>	<b>91</b>	<b>0.64</b>	<b>89</b>

На следующем уровне иерархии были построены комитеты №1 и 2, которые на основе частных прогнозов экспертов давали окончательный прогноз среднесуточного значения скорости СВ на трое суток вперед.

Таблица 2 Коэффициенты корреляции и среднеквадратичное отклонение между прогнозом и наблюдаемыми значениями скорости СВ, рассчитанные на экзаменационном наборе данных для двух комитетов.

	Комитет 1		Комитет 2	
Ошибки	КК	СКО	КК	СКО
октябрь	<b>0.85</b>	<b>72</b>	<b>0.87</b>	<b>57</b>
ноябрь	<b>0.73</b>	<b>74</b>	<b>0.71</b>	<b>65</b>

Для каждого из двух комитетов (табл. 2) были рассчитаны коэффициенты корреляции и среднеквадратичное отклонение между прогнозом и наблюдаемыми значениями скорости СВ для двух экзаменационных наборов данных. Из таблицы 2 видно, что каждый комитет улучшил прогноз любого эксперта и по значениям КК, и по значениям СКО на двух наборах экзаменационных данных. Комитет №2 демонстрирует более низкие значения СКО и практически такие же значения КК, как и комитет №1. Кроме того, из сравнения таблиц 1 и 2 видно, что комитеты показывают более устойчивый прогноз по сравнению с экспертами первого уровня иерархии на всем экзаменационном наборе. Значения ошибок прогнозирования у экспертов за октябрь и ноябрь меняются намного сильнее, чем у комитетов. Особенно важно, что устойчивая работа комитетов наблюдается в период октября-декабря 2010 года, когда в рекуррентной структуре высокоскоростных потоков СВ наблюдаются значительные изменения. Таким образом, использование иерархического подхода позволило повысить качество прогнозирования и в смысле точности, и в смысле устойчивости.

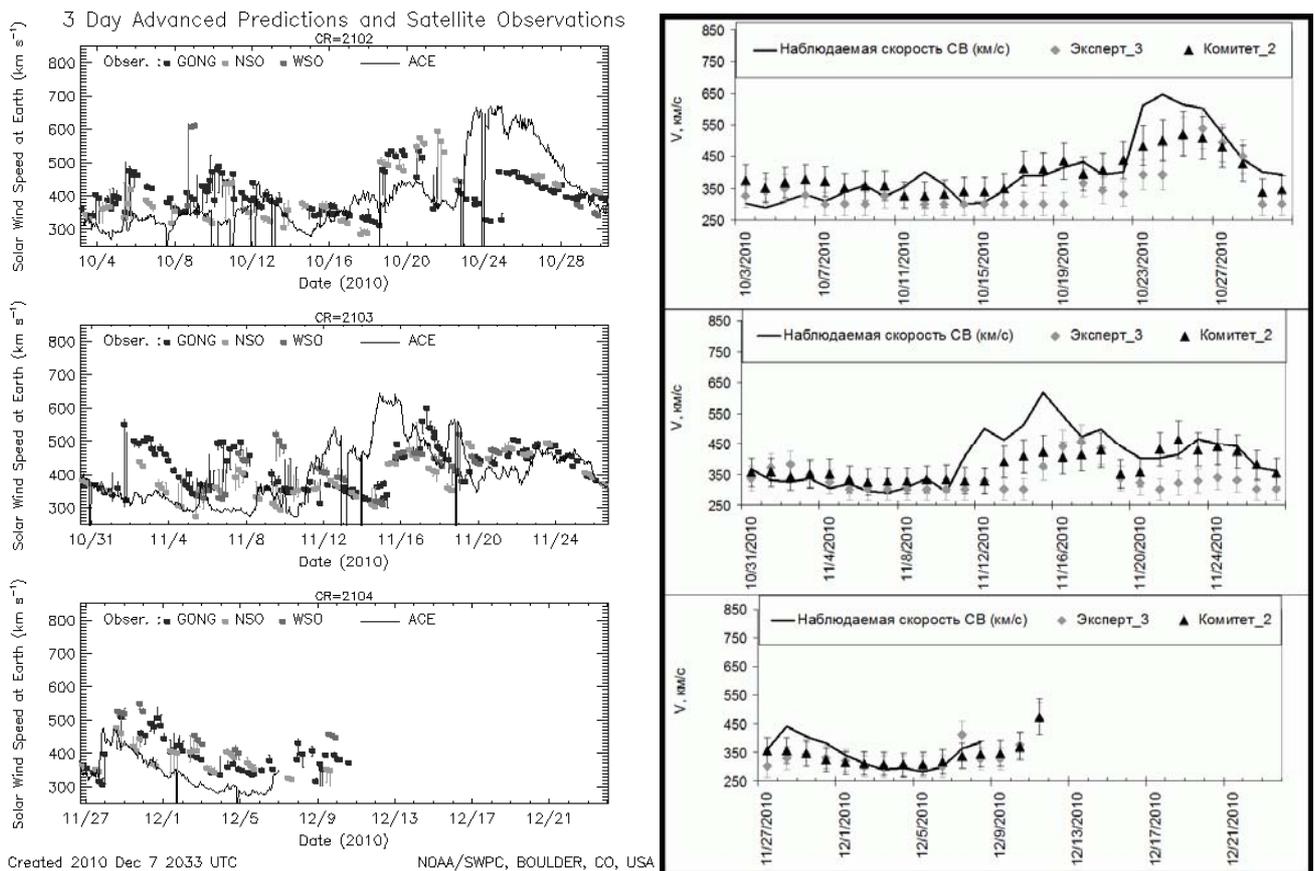


Рис.4 Слева - прогноз скорости СВ на три дня вперед, сделанный на основе модели Wang-Sheeley-Arge за три кэрингтоновских оборота с октября по декабрь 2010 года. Графики взяты с сайта <http://www.swpc.noaa.gov/ws/>. Черная кривая – наблюдаемая среднечасовая скорость СВ, точки - прогноз скорости СВ, сделанный по данным фотосферного магнитного поля с различных обсерваторий. Справа – прогноз скорости СВ на три дня вперед, сделанный на основе комитета №2 (черные треугольники) и эксперта № 3 (серые ромбы). Черная кривая справа - наблюдаемые среднесуточные значения скорости СВ. На графики нанесена средняя относительная ошибка прогнозирования.

Как видно из таблиц 1 и 2, наиболее хорошие результаты прогнозирования скорости СВ показал комитет №2. Прогнозы комитета №2 и эксперта №3, работающего с площадью КД по данным SDO/AIA, сравнивались с прогнозом, полученным с использованием модели Wang-Sheeley-Arge. Модель Wang-Sheeley-Arge использует данные о фотосферном магнитном поле с трех различных обсерваторий и сетей (GONG, NSO и WSO) (рис.4, слева). Из рисунка 3 видно, что комитет №2 лучше прогнозирует скорости СВ от 300 до 450 км/с и первый высокоскоростной поток СВ с амплитудой около 650 км/с, чем модель Wang-Sheeley-Arge, в период с октября по декабрь 2010 года. Однако, максимальная амплитуда высокоскоростных потоков не была спрогнозирована с высокой точностью ни одним из методов, оба метода предсказали меньшую амплитуду скорости. Если посмотреть на графики прогноза экспертов (рис.3), то видно, что уже на уровне всех экспертов прогноз амплитуды высокоскоростного потока СВ, регистрируемого с 11 по 18 ноября на околоземной орбите, сильно занижен, что

сказывается на работе комитета в целом. Следует заметить, что КД сложной формы, располагалась около трех активных областей (сверху и снизу). Наблюдалась вспышка класса M5.4 7 ноября и девять вспышек класса C 12 ноября, связанных с активными областями NOAA 11121 и 11123, расположенной под КД на 20-25° южной широты. Поэтому недостаточная точность прогнозирования, скорее всего, связана с простотой используемых моделей, а также с ограниченностью входной информации для описания сложного периода перестройки глобального магнитного поля Солнца, сопровождающегося спорадической активностью.

В итоге следует заметить, что полученный прогноз комитета №2 на ноябрь в целом дает достаточно высокое значение КК, равное 0.71, при значении СКО равном 65 км/с (Табл.2).

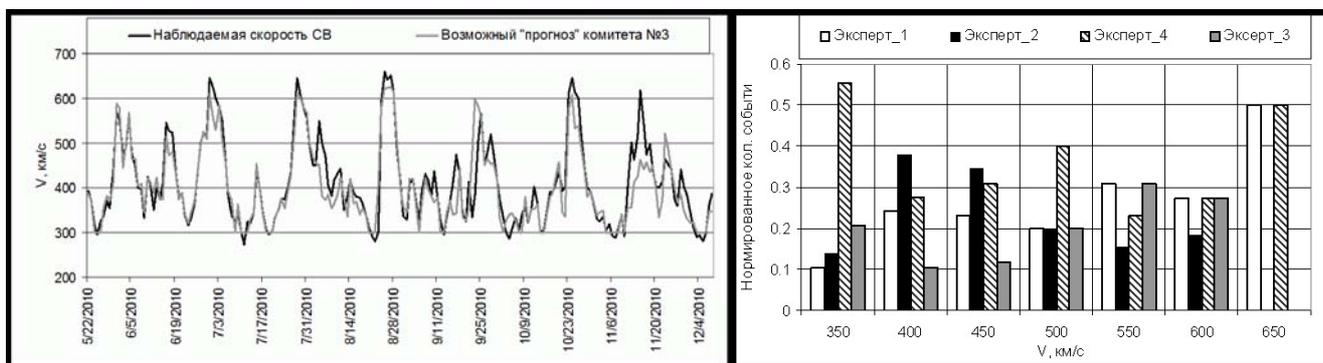


Рис. 5 Слева на рисунке: черная кривая - среднесуточные значения наблюдаемой скорости СВ; серая кривая - «прогноз» скорости СВ комитетом №3. Справа – гистограмма распределения наблюдаемых скоростей СВ, которые «прогнозирует» каждый из экспертов комитета №3, нормированная на количество событий отдельно по каждому диапазону скоростей. Эксперт №1 – белые столбцы, №2 – черные столбцы, №3 – серые столбцы и №4 – столбцы со штриховкой.

Мы попробовали оценить потенциал описанных экспертных систем, построив оценку скорости СВ, выбирая в каждый момент времени прогноз одного из четырех экспертов, который показывает результат наиболее близкий к прогнозируемой величине скорости СВ. На рисунке 5 слева представлена такая оценка, назовем ее «прогнозом» комитета №3. Качество работы комитета №3, естественно, намного лучше, чем комитета №2, так как мы используем для построения прогноза значение самой прогнозируемой величины. Для комитета №3 значения КК равны 0.98 и 0.89, а значения СКО – 30 км/с и 48 км/с, соответственно, для данных за октябрь и ноябрь 2010 года. Это свидетельствует о том, что в экспертных модулях заложен больший потенциал, чем мы используем сейчас. Поэтому дальнейшая работа по созданию новых объединяющих экспертов правил, которые позволят улучшить точность прогноза нашей экспертной системы, выглядит перспективной. Следует заметить, что период с 11 по 18 ноября все равно прогнозируется с меньшей точностью, так как связан с ограниченностью входной информации.

На рисунке 5 (справа) представлена гистограмма распределения скоростей СВ, которые прогнозирует каждый из экспертов комитета №3, за весь период исследования с апреля по декабрь 2010 года. То есть можно сказать, что это гистограмма тех скоростей солнечного ветра, которые каждый из экспертов прогнозирует наиболее хорошо. Гистограммы нормировались на количество событий в каждом из диапазонов скоростей для удобства сравнения. Анализируя гистограмму, можно сказать, что для прогнозирования низкоскоростных потоков СВ (до 350 км/с), комитет №3 использует в основном эксперта №4, на основе данных со спутника PROBA2/SWAP, а самые высокоскоростные потоки СВ, больше 600 км/с, прогнозируются только экспертами №1 и 4. Эксперт №2 в основном используется для прогноза потоков СВ со скоростью от 350 до 500 км/с, но наряду с другими экспертами. Эксперт №3, основе данных с КА SDO/AIA на длине волны 19.3 нм, используется для прогноза скоростей СВ от 500 до 600 км/с вместе с экспертами № 1 и 4. Четко выделить одного эксперта, который хорошо прогнозирует скорость СВ, особенно для диапазона скоростей от 400 до 600 км/с, затруднительно. Поэтому подход, при котором ответы всех экспертов учитываются с равным весом в принятии итогового решения, вполне оправдан в рамках нашего исследования. Однако такая информация, собранная за значительный временной интервал, может представлять интерес для формирования правил объединения прогнозов экспертов в единое решение, особенно при возрастании количества экспертов в комитете.

Изложенная выше информация определяет пути дальнейшего улучшения качества прогноза комитета экспертов. Один из путей – это повышение точности уже существующих моделей. Другой путь – это дополнение комитета новыми алгоритмами, в том числе искусственными нейронными сетями, а также новыми данным, которые смогут улучшить работу системы. Кроме того, планируется применить новые правила комбинирования результатов прогнозирования экспертов для улучшения точности итогового решения. Однако следует иметь в виду, что слишком сложные модели и правила их объединения могут помешать комитету экспертов надежно работать на новых данных из-за выучивания шумов системы. В заключении, хочется отметить, что система экспертов должна время от времени обновлять значения подстраиваемых параметров на новом наборе тренировочных данных, поскольку прогнозируемые характеристики параметров потоков СВ и их источников меняются в зависимости от фазы солнечного цикла.

## **Выводы**

Предложенный иерархический подход на основе комитета экспертов, построенных на различных входных данных, позволил улучшить прогноз скорости СВ на три дня вперед по сравнению с лучшей экспертной моделью и показал устойчивую работу на экзаменационном

наборе данных. Значение коэффициента корреляции между прогнозом и наблюдаемыми значениями скорости СВ увеличилось на 12% и стало равным 0.75, а значение среднеквадратичного отклонения уменьшилось на 25% и стало равным 63 км/с на всем экзаменационном наборе данных с октября по декабрь 2010 года.

Описанный метод удобен для работы с разнородными данными, а возможность применять простые модели позволяет легко интерпретировать полученные результаты. Предложенный подход также имеет хорошие перспективы на дальнейшее улучшение качества прогноза по мере введения в комитет новых данных и новых алгоритмов (экспертов). Особенно это актуально в связи с появлением большого количества новых источников данных о Солнце, в различных спектральных диапазонах, на борту современных космических аппаратов.

SWAP - проект центра Spatial de Liege и Королевской Бельгийской Обсерватории, финансируемый Бельгийским Национальным Комитетом по Научной Политике (BELSPO). Данные с космической обсерватории SDO представлены NASA/SDO и AIA, EVE и HMI научными группами. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК № 07.514.11.4020) и гранта Бельгийской Королевской Обсерватории для приглашенных исследователей.

## Список Литературы

- Терехов С.А. Гениальные комитеты умных машин // Лекции по нейроинформатики 10-й Всероссийской научно-технической конференции "Нейроинформатика-2008". Сборник научных трудов. Москва. 2008. Часть 2. С. 11-42
- Шугай Ю.С., Веселовский И.С. Исследование структуры корональных дыр в различных диапазонах длин волн // Труды конф. «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности», 2007. С. 92-100.
- Abramenko V., Yurchyshyn V. and Watanabe H. Parameters of the magnetic flux inside coronal hole // Sol. Phys. 2009. V. 250. No.1. P. 43-57.
- Arge C.N., Pizzo V.J. Improvement in the prediction of solar wind condition using near-real time solar magnetic field update // J. Geophys. Res. 2000. V. 105(A5). P. 10465–10479.
- Aschwanden M. J. Image processing techniques and feature recognition in solar physics // Solar Phys. 2010. V. 262. P. 235–275.
- Barra, V., Delouille, V., Kretzschmar, M., Hochedez, J. Fast and robust segmentation of solar EUV images: algorithm and results for solar cycle 23 // Astron. Astrophys. 2009. V. 505. P. 361 – 371.
- Berghmans D., Hochedez J.-F., Defise J.M. et al. SWAP onboard PROBA2, a new EUV imager for solar monitoring// Advances in Space Research, 2006. V. 38. P. 1807-1811.
- Brown G. Ensemble Learning // Encyclopedia of Machine Learning. Ed. Sammut C. and Weeb G.I.: Springer Press, 2010, P. 312-320.
- Chapman S. and Bartels J. Geomagnetism // Oxford, Clarendon Press, 1940.
- Cranmer S. Coronal holes // Living Rev. Solar Phys. 2009. V. 6. No.3. P. 1-65.
- Del Zanna G., Andretta V., Poletto, G., et al. Multi-instrument campaigning to observe the off-limb corona // The Second Hinode Science Meeting. ASP Conference Series, 2009. V. 415, P. 315-318.
- Dolenko S. A., Orlov Yu. V., Persiantsev I. G. and Shugai Yu. S. Neural network algorithms for analyzing multidimensional time series for predicting events and their application to study of Sun-Earth relations // Pattern Recognition and Image Analysis, 2007. V. 17. No.4. P. 584-591.
- Eselevich V. G., Fainshtein V. G., Rudenko G. V., et al. Forecasting the velocity of quasi-stationary solar wind and the intensity of geomagnetic disturbances produced by it // Cosmic Research, 2009. V. 47. No.2. P. 95-113.
- Halain J.-P., Berghmans D., Defise J.-M. et al. First light of SWAP on-board PROBA2 // Proceedings of the SPIE, 2010. V. 7732. P. 77320P-77320P-11
- Hansen J.V. and Nelson R.D. Data Mining of Time Series Using Stacked Generalizers // Neurocomputing, 2002. V.43. P.173-184.
- Harvey, J. W., Sheeley, N. R. Coronal holes, solar wind streams, and geomagnetic activity during the new sunspot cycle // Sol. Phys. 1978. V. 59. P. 159-173.

- Hurlburt N., Cheung M., Schrijver C. et al. Heliophysics Event Knowledgebase for the Solar Dynamics Observatory (SDO) and Beyond // *Sol. Phys.* 2010. DOI 10.1007/s11207-010-9624-2
- Jacobs R.A., Jordan M.I., Barto A.G. Task decomposition through competition in a modular connectionist architecture: the what and where vision tasks // *Cognitive Science*, 1991. V.15. P.219-250.
- Krista L. and Gallagher P. Automatic coronal hole detection using local intensity thresholding techniques // *Sol. Phys.* 2009. V. 256. P. 87-100.
- Luo, B., Zhong, Q., Lui, S., Gong, J. A new forecasting index for solar wind velocity based on EIT 284 Å observations // *Sol. Phys.* 2008. V. 250. P. 159-170.
- Madjarska M.S. and Wiegmann T. Coronal hole boundaries evolution at small scales: I EIT 19.5 nm and TRACE 17.1nm view // *Astronomy and Astrophysics*, 2009. V. 503. P. 991-997.
- Nolte, J.T., Krieger, A.S., Timothy, A.F. et al. Coronal holes as source of solar wind // *Sol. Phys.* 46, 303-322, 1976.
- Obridko V. N., Shelting B. D., Livshits I. M. and Asgarov A. B. Contrast of Coronal Holes and Parameters of Associated Solar Wind Streams // *Solar Physics*, 2009. V. 260. No.1. P. 191-206.
- Persiantsev I. G., Ryazanov A. Yu. and Shugai Ju. S. The automatic processing and analysis of solar image sequences // *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2006. V. 16. No.1. P. 30-32.
- Robbins, S.J., Henney, C.J., Harvey, J.W. Solar Wind Forecasting with Coronal Holes // *Sol. Phys.* 2006. V. 233. P. 265-276.
- Scholl F. I and Habbal S. R. Automatic detection and classification of coronal holes and filaments based on EUV and magnetogram observation of solar disc // *Sol. Phys.* 2008. V. 248, P. 425-439.
- Sheeley N.R., Harvey J.W., Feldman W.C. Coronal holes, solar wind streams and recurrent geomagnetic disturbances 1973-1976 // *Sol. Phys.* 1976. V. 49. P. 271-278.
- Shnirman M., Le Mouél J.-L., Blanter E. Slow and Fast Rotating Coronal Holes from Geomagnetic Indices // *Sol. Phys.* 2010. V. 266. No. 1. P. 159-171.
- Shugai J.S., Guzhva A.G., Dolenko S.A., Persiantsev I.G. An algorithm for construction of a hierarchical neural network complex for time series analysis and its application for studying sun-earth relations // 8th International conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-8-2007), Yoshkar-Ola, Russia, Conference Proceedings, 2007. V.2. P.335-358.
- Shugai Yu.S., Veselovsky I.S., Trichtchenko L.D. Studying Correlations between the Coronal Hole Area, Solar Wind Velocity, and Local Magnetic Indices in the Canadian Region during the Decline Phase of Cycle 23 // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009. V. 49. No.4. P. 415–424.
- Stepanian N. N., Kuzin S. V., Fainshtein V. G. et al. Relationship Between the Coronal Holes and High-Speed Streams of Solar Wind // *Solar System Research*, 2008. V. 42. No. 1. P. 83-89.

- Veselovsky I. S., Persiantsev I. G. and Shugai Yu. S. Forecast of the solar wind velocity and the interplanetary magnetic field radial component polarity at the phase of decay of solar cycle 23 // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2006a. V. 46. No.6. P. 701-707.
- Veselovsky I. S., Persiantsev I. G., Ryazanov A. Yu., Shugai Yu. S. One-parameter representation of the daily averaged solar-wind velocity // *Solar System Res.* 2006b. V.40. No. 5. P. 427-431.
- Vrsnak B., Temmer M. and Veronig A. M. Coronal holes and solar wind high-speed streams: I. forecasting the solar wind parameters // *Sol. Phys.* 2007. V. 240. No.2. P. 315–330.
- Wang Y.-M.; Sheeley N. R., Jr. Solar wind speed and coronal flux-tube expansion // *Astrophysical Journal*, 1990. V. 355. P. 726-732.
- Wintoft P. and Lundstedt H. Neural network study of mapping from solar magnetic fields to the daily average solar wind velocity // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104(A4) P. 6729-6736.

**Ю.С. Шугай<sup>1</sup>, И.С. Веселовский<sup>1,2</sup>, Д. Б. Ситон<sup>3</sup>, Д. Бергманс<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

*<sup>3</sup>Королевская Бельгийская Обсерватория, Брюссель, Бельгия*

## **ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ РЕКУРРЕНТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2011-10/874

Работа поступила в ОНТИ 15.11.2011