

УДК 004.942+523.982.8

## ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СРЕДНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ НЕЧЕТКОГО ИНДУКТИВНОГО РАССУЖДЕНИЯ

Гусев А. А., Волошин А. Э., Яковенко Н. А.

LONG-TERM FORECASTING OF THE DYNAMICS OF MEAN SOLAR MAGNETIC FIELD WITH THE FUZZY INDUCTIVE REASONING MODEL

Gusev A. A. \*, Voloshin A. E. \*\*, Yakovenko N. A. \*

\* Kuban State University, Krasnodar, 350040, Russia

\*\* Design Bureau «Selena», Krasnodar, 350072, Russia

e-mail: gusev@ftf.kubsu.ru

*Abstract.* The accumulation of large amounts of data in a variety of domains creates a demand for the development of new tools for data processing and forecasting for decision support. The article is devoted to the long-term forecast of the mean solar magnetic field obtained with the fuzzy inductive reasoning (FIR) model. The model is generated automatically with the AimDSS computer program developed by the authors earlier. AimDSS is a cross-platform, standalone program which implements the FIR methodology for model creation. Authors generated the model for long-term mean solar magnetic field prediction until 2030. The model was evaluated against the control sample with the RMSE 0.0964. The forecast also matches the long-term solar activity forecast created by the authors with the Wolf number datasets earlier. Further study will be focused on elaboration of the constructed model with the final aim of obtaining a set of inductive models for application in different domains.

*Keywords:* decision support, long-term forecasting, data mining, fuzzy inductive reasoning, solar activity, mean solar magnetic field, magnetism.

### Введение

Новые технологии анализа данных инструментальных наблюдений призваны облегчить принятие управленческих решений на основе автоматизированного синтеза компьютерных моделей динамики значимых природных и социальных процессов.

Ранее авторами была показана [1] возможность успешного применения разработанного в Кубанском государственном университете инструментального средства синтеза моделей нечеткого индуктивного рассуждения AimDSS [2] к задаче предсказания 22-летнего цикла солнечной активности по данным оптических наблюдений солнечных пятен.

В данной публикации исследуется возможность применения данного средства к созданию моделей динамики среднего магнитного поля Солнца (СМП).

Понятие СМП введено А. Северным в 1969 г. СМП выражает среднее значение магнитного потока с диска Солнца. Систематические наблюдения СМП ведутся с 1975 г. в Wilcox Solar Observatory.

В связи со сравнительно малым периодом наблюдений СМП, а также в связи с тем, что природа магнитных вариаций на Солнце остается малоизученной до сих пор [3], к настоящему моменту для построения моделей динамики солнечной активности в первую очередь используются данные наблюдений солнечных пятен в виде рядов чисел Вольфа, а не данные СМП.

Актуальность моделирования динамики СМП обусловлена сравнительно небольшим количеством существующих моделей, а также тем, что магнитное поле Солнца определяет межпланетное магнитное поле солнечного

Гусев Александр Алексеевич аспирант кафедры оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: gusev@ftf.kubsu.ru

Волошин Андрей Эдуардович, генеральный директор АО «Конструкторское бюро «Селена»; e-mail: mail@kbselena.ru

Яковенко Николай Андреевич, д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой оптоэлектроники Кубанского государственного университета; e-mail: dean@phys.kubsu.ru

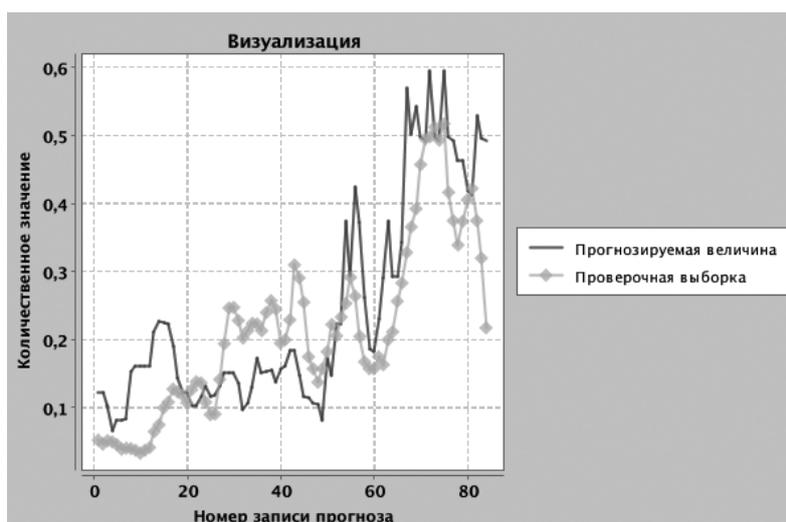


Рис. 1. Результаты моделирования динамики среднемесячных значений СМП, мкТл/400 за 2009-2015 гг.

ветра и оказывает влияние на магнитосферу Земли.

Целью данного исследования является создание долгосрочного прогноза динамики СМП с помощью разработанного авторами инструментального средства синтеза моделей нечеткого индуктивного рассуждения AimDSS.

Достижение цели исследования предполагает решение следующих задач:

- 1) выбор массива исходных данных СМП, предварительная обработка данных и определение обучающей и контрольной выборки;
- 2) определение параметров создания модели, обеспечивающих наивысшую точность прогнозирования;
- 3) прогнозирование долгосрочной динамики СМП с помощью построенной модели и анализ полученных результатов.

### Модель

Для создания нечеткой индуктивной модели динамики среднего магнитного поля Солнца в качестве обучающей выборки авторами использовались среднесглаженные нормированные данные по среднемесячным значениям СМП с 1975 по 2008 гг.

В качестве проверочной выборки были взяты среднесглаженные нормированные среднемесячные значения СМП с 2009 по 2015 гг.

Для построения обеих выборок использованы данные многолетних наблюдений,

размещенные на сайте The Wilcox Solar Observatory [4].

Преобразование входных данных осуществлялось по 20 категориям нечеткого индуктивного рассуждения.

На этапе идентификации модели программой AimDSS была найдена оптимальная маска глубины 8 и сложности 7, соответствующая уравнению

$$y = f(y(t - \delta t), y(t - 2\delta t), y(t - 3\delta t), y(t - 4\delta t), y(t - 5\delta t), y(t - 7\delta t)),$$

где  $y$  — моделируемое значение среднемесячного значения СМП,  $f$  — создаваемое программой на основе паттерновой базы правил качественное отношение,  $t$  — временной параметр, соответствующий месяцу наблюдения,  $\delta t$  — 1 месяц для данного набора наблюдений.

Для оценки получившейся модели использовался критерий среднеквадратичной ошибки (RMSE), вычисляемый по формуле

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i(t) - Y_i(t))^2}{N}},$$

где  $Y(t)$  — предсказанное значение,  $y(t)$  — значение из контрольной выборки,  $N$  — количество записей.

На рис. 1 представлены результаты моделирования в программе AimDSS среднемесячной динамики СМП за 2009–2015 гг. против



Рис. 2. Результаты прогнозирования динамики среднемесячного значения СМП, мкТл/400 на 2016–2030 гг.

проверочной выборки. Величина RMSE составила 0,0964.

Для получения прогноза динамики СМП до 2030 г. использованы среднесглаженные среднемесячные нормированные данные за 1975–2015 гг. Интервал прогнозирования составил 168 записей, что соответствует 14 годам с 2016 г. по 2030 г.

В этом случае AimDSS определила оптимальную маску  $10 \times 10$ . Увеличение глубины оптимальной маски на этапе идентификации модели, на наш взгляд, вызвано увеличением объема обучающей выборки, что привело к возрастанию информационной энтропии, связанной с появлением новых сочетаний в наборе данных.

Результаты прогнозирования приведены на рис. 2.

Полученный график имеет минимум в области 60 записи прогноза, соответствующей 2021 г. и максимум в области 120 записи, соответствующей 2026 г.

Указанные экстремумы согласуются с теорией 11-летних и 22-летних циклов Солнечной активности и совпадают с полученным ранее прогнозом 22-летнего цикла солнечной активности по данным инструментальных наблюдений солнечных пятен [1].

### Заключение

С помощью разработанной программы AimDSS создана модель нечеткого индуктивного рассуждения для прогнозирования сред-

немесячной динамики среднего магнитного поля Солнца до 2030 г.

Созданный прогноз совпадает с результатами, полученными авторами ранее при прогнозировании солнечной активности по данным чисел Вольфа.

Дальнейшее изучение будет направлено на совершенствование предсказательной силы используемой методики, для чего будет изучаться эффект ввода в модель нечеткого индуктивного рассуждения дополнительных входных переменных: напряженности полярного магнитного поля Солнца, числа солнечных вспышек, корональных дыр, потока высокоэнергичных электронов и других параметров.

Интерес представляет также разработка компьютерных моделей краткосрочного прогнозирования солнечной активности в часовом и суточном временном масштабе. Такие модели могут быть использованы в автоматизированных системах управления и контроля безопасности космических полетов.

Необходимо отметить, что, несмотря на растущее применение методов компьютерного анализа данных, развитие физических теорий, объясняющих различные явления солнечной активности, является необходимым условием улучшения отбора входных данных и разработки эвристических алгоритмов определения оптимальных параметров создания моделей. Методы компьютерного моделирования в свою очередь могут быть полезны

для проверки гипотез в теоретических исследованиях.

### Литература

1. Гусев А. А., Швецова Н. А., Волошин А. Э., Яковенко Н. А. Изучение применимости инструментального средства нечеткого индуктивного рассуждения к задаче прогнозирования солнечной активности // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2016. № 4. С. 35–38.
2. Свид. 2016610899 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа принятия управленческих решений «AimDSS» / А.А. Гусев, Н.А. Швецова; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО КубГУ (RU). – №2015661290; заявл. 23.11.15; опубл. 21.01.16, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
3. Стрижак Ю. В., Понявин Д. И. Источники магнитного поля Солнца как звезды // Physics of Auroral Phenomena. 2016. Т. 39. № 1(40). С. 84–86.
4. WSO – The Wilcox Solar Observatory. Режим доступа: <http://wso.stanford.edu/> (дата обращения 31.05.2017).

### References

1. Gusev A. A., Shvetsova N. A., Voloshin A. E., Yakovenko N. A. Izuchenie primenimosti instrumentalnogo sredstva nechetkogo induktivnogo rassuzhdeniya k zadache prognozirovaniya solnechnoj aktivnosti [The study of the applicability of the tool for fuzzy inductive reasoning to the problem of solar activity prediction]. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva* [Ecological Bulletin of Research Centers of The Black Sea Economic Cooperation], 2016, no. 4, pp. 35–38. (In Russian)
2. Gusev A.A., Shvetsova N.A. *Program for management decision-making "AimDSS". Certificate of State Registration for Computer Program no. 2016610899 Russian Federation.* (In Russian)
3. Strizhak U. V., Poniavin D. I. Istochniki magnitnogo polya Solnca kak zvezdy [The sources of the magnetic field of the Sun as a star]. *Physics of Auroral Phenomena*, 2016, vol. 39, no. 1(40), pp. 84–86. (In Russian)
4. WSO – The Wilcox Solar Observatory. URL: <http://wso.stanford.edu>