

АПРОБАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА «СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ» НА ПРИМЕРЕ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГОДОВОГО ЧИСЛА ВОЛЬФА

А. А. Чекмарев, А. В. Игнатов

Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Россия

Поступила в редакцию 25 марта 2014 г.

Аннотация: Рассмотрены возможности описания динамики и предсказания годового числа Вольфа на основе стохастических моделей, применимость которых для задачи прогнозирования справедлива с определяемой в процессе их построения вероятностью. Модели оптимизируются по списку предикторов и математической структуре. Прогностические расчеты представляются в виде поля вероятности. Оценено возможное влияние планет на изменчивость числа Вольфа. Приведены результаты контрольного ретроспективного прогнозирования на период 2000-2011 годы и прогнозы на 2012-2023 годы.

Ключевые слова: солнечная активность, число Вольфа, стохастическое моделирование, регрессионный анализ, прогнозирование.

Abstract: The article presents capacity to describe dynamics and predict the annual sunspot number (Wolf number) on the basis of stochastic models, which are important for the aim of forecasting within the theoretical frequency worked out in the process of their modeling. The models are optimized within the list of predictors and mathematical structure. Prognostic data is represented in the form of probability space. Possible influence of planets on the instability of the sunspot number is evaluated. There are also the results of the control retrospective forecasting for 2000-2011 and forecasts on the period of 2012-2023.

Key words: solar activity, Wolf number, stochastic modeling, regression analysis, prediction.

Активность Солнца, проявляющаяся в изменчивости отдельных его характеристик, с давних пор привлекала внимание исследователей как с позиции научного интереса к самому этому явлению, так и как к вероятному фактору влияния на различные процессы, происходящие на нашей планете [8, 9, 10, 11, 12]. В настоящее время сохранение интереса к закономерностям динамики и прогнозу характеристик активности Солнца в значительной степени обусловлено тем, что многие исследователи пытаются связывать с ней часть важных для человечества вариаций параметров климатической системы Земли [2, 4, 5, 6].

Наиболее известный индикатор солнечной активности – число Вольфа. Специализированные наблюдения за этим параметром ведутся с 1849 года, а регулярные данные об оценках его годовых значений можно найти в литературе или в сети Интернет за период, начинающийся с

1700 года. Главная закономерность в межгодовой изменчивости числа Вольфа – это так называемый «11-летний цикл», представляющий собой квазипериодические колебания этой переменной со средним периодом около 11 лет. Однако наблюдаемая динамика данного параметра имеет более сложный характер. Это обстоятельство обуславливает необходимость рассмотрения динамики числа Вольфа как процесса, для описания и прогнозирования которого требуется применение, соответственно, и более сложных моделей.

В рамках данной статьи при анализе и моделировании закономерностей динамики годового числа Вольфа попытаемся сравнить между собой правдоподобность следующих гипотез.

1. Активность Солнца обусловлена только его собственными внутренними автоколебательными и другими процессами, проявление которых внешне отражается в наблюдаемой межгодовой изменчивости числа Вольфа.

2. Переменность годового числа Вольфа обусловлена исключительно воздействием планет, которое осуществляется путем гравитационного или иного их влияния на Солнце.

3. Активность Солнца – это внутренний процесс, в определенной степени модулированный внешним воздействием, величина которого связана с положением планет солнечной системы на их орбитах.

Для проверки и сравнения названных гипотез будем строить множество моделей зависимости числа Вольфа от его возможных предикторов. Под моделью здесь будет пониматься описание взаимосвязи, с помощью специализированного программного обеспечения, между значениями одной переменной, рассматриваемой как функция, и значениями других переменных, рассматриваемых как ее аргументы. Из множества таких моделей будем отбирать лучшие. В качестве критерия используем коэффициент детерминации. Если среди наиболее существенных предикторов в отобранных моделях будут находиться только параметры самого Солнца, то будем считать, что более вероятна 1-я гипотеза, если только координаты планет – то более вероятна 2-я гипотеза. Если же в списке предикторов будут и те, и другие параметры, то приоритет отдается 3-й гипотезе. Далее, лучшие модели будем использовать для расчета прогностических оценок числа Вольфа.

Исходные данные и методы исследования

Для проверки сформулированных гипотез необходимо организовать соответствующую поставленную задачу выборку данных. Ориентируясь на доступные материалы, в такую выборку включим данные о временной динамике годового числа Вольфа и значениях гелиоцентрических координат, задающих положение в пространстве планет Солнечной системы, в моменты времени, соответствующие 1 июля каждого года.

Особенностью данных о числе Вольфа является их разное качество в разное время. Приближенный учет этой разницы будем осуществлять, задавая разную точность оценок числа Вольфа в различные периоды наблюдений (1700-1748 гг., 1750-1848 гг. и с 1849 года до настоящего времени).

Излишне оптимистично ожидать, что может быть найдена близкая к детерминированной зависимость числа Вольфа от каких-либо выше указанных предикторов. Такая зависимость, если она действительно существует, будет, скорей всего, стохастической, т.е. складывающейся из определяемой значениями предикторов и чисто случай-

ной составляющей наблюдаемой изменчивости числа Вольфа. Соответственно, применяемые для описания таких зависимостей модели также должны быть стохастическими, а результаты расчетов (прогнозы) по ним желательно представлять в виде оценки распределения ожидаемых значений предсказываемой переменной.

В качестве инструмента для построения и проверки описательной и предсказательной способности таких моделей используем программу «Стохастическое моделирование» [3], специально разработанную для решения подобного рода задач. Эта программа аппроксимирует заданные таблично функции многих переменных, оптимальными моделями, подбирая в процессе их построения список наиболее существенных аргументов (предикторов) и наиболее подходящий математический оператор. Для описания зависимости функций от их аргументов программа использует модели, математическая структура которых формируется на основе трех различных подходов. Каждому подходу соответствует свой тип модели.

Первый тип – это модели локального осреднения данных. Модельные оценки зависимых переменных строятся путем локального (в пространстве аргументов) осреднения (фильтрации) эмпирических оценок функции. При этом делаются некоторые минимальные предположения о гладкости моделируемой функции, обусловленные выбором свойств фильтра, задающего алгоритм осреднения.

Второй тип – модели глобальной математической аппроксимации данных. Математическая структура таких моделей определяется произвольным формальным выбором аналитической аппроксимирующей функции (с требующими определения коэффициентами по исходным данным), на всей области изменчивости ее аргументов. Наиболее простые модели данного типа – модели множественной линейной регрессии.

Третий тип – модели объяснения изменчивости данных. Обобщенная запись математической структуры этих моделей формально совпадает со структурой моделей второго типа, но в отличие от них для конкретного объекта соотношения между переменными должны быть не произвольно заданы, а логически выведены из содержательных законов и гипотез, объясняющих наблюдаемую изменчивость функций в зависимости от их аргументов.

Одной из важных особенностей программы «Стохастическое моделирование» является оценивание параметров надежности моделей. Использо-

зование этих параметров при прогностических расчетах даже на основе не очень надежной модели позволяет увеличивать достоверность предсказания до практически приемлемого уровня с минимальными потерями его точности. Для повышения надежности прогнозной оценки она строится как логическая сумма двух дополнительных событий – «модель применима» и «модель неприменима» для прогностических расчетов. В результате такой операции надежность прогноза увеличивается, а ожидаемая его точность соответственно уменьшается. Это важный аспект методики, так как ненадежный прогноз, как, в частности, подчеркивает А. П. Резников [7], может принести значительно больше вреда, чем даже отсутствие прогноза.

Моделирование динамики числа Вольфа

Для выполнения первой части исследования сформируем выборку из наиболее достоверных сведений о числе Вольфа. Для этого обучающий ряд наблюдений ограничим отрезком времени с 1849 по 1999 годы. Оставшиеся до настоящего времени значения переменных (с 2000 по 2011 годы) включим в контрольную выборку для последующего сравнения предсказаний по построенным моделям с независимыми фактическими данными.

Модели предсказания числа Вольфа по его известным предыдущим значениям с заблаговременностью в один год

Для построения авторегрессионных моделей включим в список возможных аргументов текуще-

го значения числа Вольфа $[W(t), t - \text{год}]$ двадцать пять его предыдущих значений, и выполним процедуру поиска наиболее существенных предикторов, используя разные модели локальной аппроксимации (модели 1-го типа) зависимости функции многих аргументов и разные критерии их оптимальности. В результате получаем группу близких по качеству моделей, чаще всего, с четырьмя аргументами, сдвинутыми по времени относительно функции не более чем на 6 лет.

Если же для аппроксимации динамики числа Вольфа использовать более наглядную классическую модель множественной линейной регрессии (модели 2-ого типа), то в качестве 3 и 4-го аргументов подключаются переменные со сдвигом в 10 и 11 лет – $W(t-10)$ и $W(t-11)$, что напрямую говорит о наличии в данных примерно 10-11-летнего цикла. Однако качество этой модели по сравнению с вышеназванными моделями, улавливающими и нелинейный характер зависимостей, оказывается несколько хуже.

Наиболее существенными предикторами во всех рассмотренных моделях являются аргументы $W(t-1)$ и $W(t-3)$. Зависимость от них имеет слабо выраженный нелинейный характер. Примерный вид этой зависимости показан на рисунке 1.

Модели предсказания числа Вольфа по его известным предыдущим значениям с заблаговременностью более одного года

Анализируя структуру авторегрессионных моделей с заблаговременностью прогноза в 1 год,

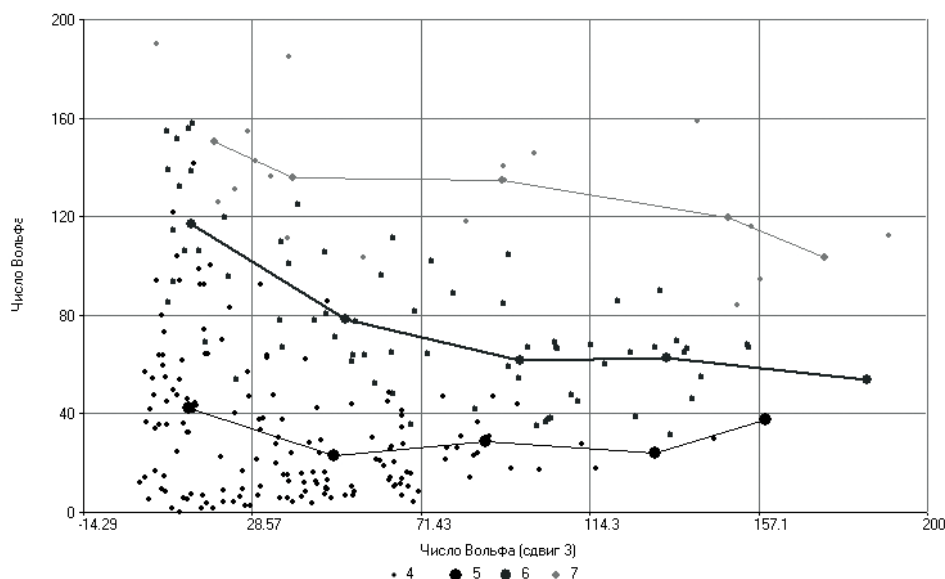


Рис. 1. Оценка зависимости числа Вольфа от двух его наиболее существенных аргументов. Обозначения: 4 – маркеры, показывающие положение пересечения медиан фактических оценок функции и 1-го аргумента в их совместных реализациях; 5-7 – средние по реализациям значения функции при значениях 2-го аргумента (число Вольфа (сдвиг 1)) в интервале: 5 – [1.4; 64.3], 6 – [64.3; 127.3], 7 – [127.3; 190.2]

Характеристики моделей с ограничением минимального запаздывания аргументов

Минимальное запаздывание (сдвиг) возможных аргументов	Число аргументов в оптимальной модели	Запаздывание (сдвиг относительно функции) аргументов	Доля объясненной дисперсии
1	4	1, 3, 5, 6	0.90
2	4	2, 4, 9, 10	0.73
3-5	4	5, 9, 10, 23	0.67
6	4	6, 10, 23, 24	0.67
7	4	7, 10, 15, 23	0.67
8-10	3	10, 17, 23	0.66
11	2	11, 14	0.61
12	3	12, 14, 21	0.51
13-15	4	15, 18, 21, 23	0.47

можно видеть, что основным свойством, на котором строится такой прогноз, является сохранение в будущем году значения числа Вольфа текущего года. Прогноз на 1 год вперед по модели зависимости числа Вольфа от его предыдущего значения уже описывает около 65 % дисперсии фактических данных. Такая модель, хотя сама и не генерирует цикличность, но отражает часть автокорреляции ряда, связанной с наличием 11-летнего цикла. Попробуем оценить разделение вклада кратковременной (на один год) и долговременной (связанной с 11-летней цикличностью) «памятью» исследуемого ряда. Для этого построим группу моделей, для которых минимальное запаздывание аргументов будет в диапазоне от 2 до 10 лет. Максимальное запаздывание ограничим сверху 25 годами. Построенные модели будем сравнивать между собой по списку наиболее существенных аргументов и по точности расчета предсказываемого значения функции. В качестве параметра, характеризующего последнее названное свойство модели, выберем долю «объясненной» моделью дисперсии ряда.

Результаты выполненной по описанной схеме работы представлены в таблице. В первой строке этой таблицы дополнительно помещены аналогичные характеристики наилучшей модели прогнозирования числа Вольфа на один годовой шаг по времени.

Анализируя приведенные в таблице данные, можно высказать следующие суждения.

1. Основная закономерность, наблюдаемая в изменчивости годового числа Вольфа в период 1849-1999 гг. и формирующая 63-67 % его дисперсии, – это «11 летняя» цикличность. В структуре моделей она явно проявляется включением в список наиболее существенных аргументов предыду-

щих чисел Вольфа с запаздыванием относительно функции на величину, кратную примерно половине периода этого цикла.

2. С закономерностью, дополнительно обуславливающей стремление к сохранению на будущий год числа Вольфа текущего года, связывается еще около 23-25 % дисперсии ряда.

3. На основании свойства 11-летней цикличности возможно прогнозирование этого ряда по авторегрессионным моделям с заблаговременностью от 3 до 10 лет примерно с одной и той же точностью (средняя ошибка 30-35 единиц числа Вольфа) При прогнозировании с большей заблаговременностью ошибка предсказания начинает заметно нарастать.

4. При прогнозировании с заблаговременностью на 1-2 года возможно повышение точности прогноза за счет дополнительного использования «кратковременной памяти» ряда (средняя ошибка 15-17 единиц числа Вольфа при прогнозе на 1 год вперед и 25-27 единиц – при прогнозе на два года).

Модели динамики числа Вольфа, использующие в качестве предикторов координаты положения планет

Попробуем теперь связать наблюдаемую изменчивость годового числа Вольфа с воздействием планет солнечной системы. Попытка найти статистически значимую модель зависимости числа Вольфа только от параметров, определяющих положение планет, не приводит к успеху. Наилучшая такая модель использует в качестве предикторов положение больших планет (Юпитера и Сатурна) и описывает около 5 % дисперсии годового числа Вольфа. Понятно, что такая точность описания динамики зависимой переменной не имеет какой-либо практической ценности, однако этот результат не исключает пусть слабого, но все-таки ощу-

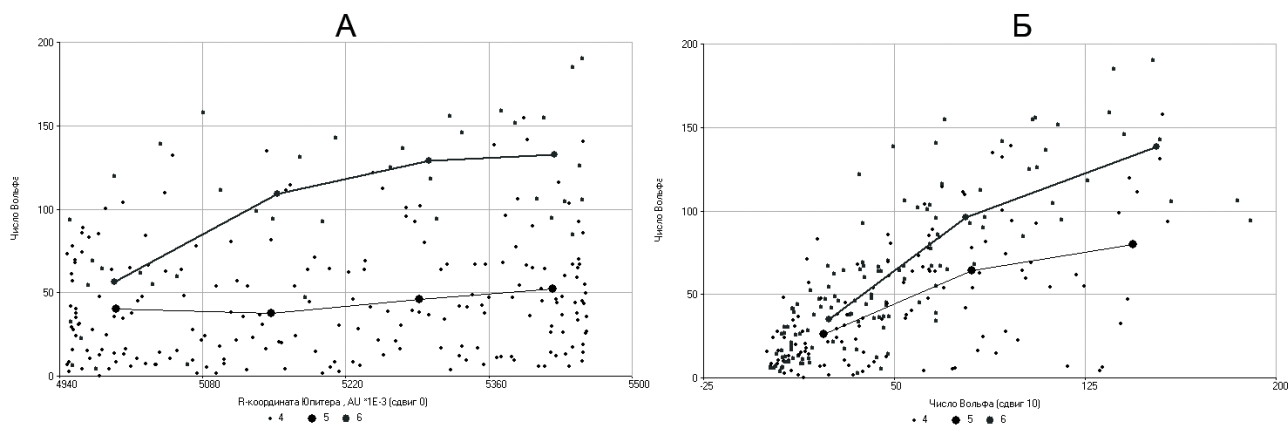


Рис. 2. Проявление влияния Юпитера на формирование числа Вольфа. Обозначения: 4 – маркеры, показывающие положение пересечения медиан фактических оценок функции и 1-го аргумента в их совместных реализациях; **А** – Средние по реализациям значения функции при значениях 2-го аргумента (число Вольфа (сдвиг 10)): в интервале: 5 – [1.4; 95.8], 6 – [95.8; 190.2]; **Б** – Средние по реализациям значения функции при значениях 2-го аргумента (расстояние от Солнца до Юпитера (R координата Юпитера), $AE \cdot 10^{-3}$ (сдвиг 10)): в интервале: 5 – [4948,5202], 6 – [5202; 5456]

тимого воздействия больших планет на солнечную активность. В связи с этим, можно попробовать более конструктивно учесть возможное влияние планет, модифицируя модели зависимости числа Вольфа от собственной предыстории за счет подключения в качестве дополнительных предикторов координат, задающих положение больших планет на их орбитах.

Влияние планет через появление их координат в списке аргументов числа Вольфа начитает проявляться для моделей с минимальной заглавременноностью больше года. Подключение координат Юпитера (и в отдельных моделях Сатурна) в качестве дополнительных аргументов в таких моделях улучшает их способность к описанию наблюдающейся изменчивости годового числа Вольфа. Доля объясненной дисперсии при этом возрастает в разных ситуациях на 5-10%. Выделяемое воздействие носит, скорее всего, гравитационный характер, так отчетливее всего проявляется в зависимости от расстояния от Солнца до самых больших по массе планет или от фазы их орбитального цикла. Статистика событий, отражающих этот эффект, не очень велика, и их конечно можно списать на случайность. Но, тем не менее, данные события происходят и требуют своего пояснения.

Анализ структуры многомерной зависимости числа Вольфа от своих наиболее существенных аргументов позволяет описать характер влияния планет на солнечную активность следующим образом. При приближении больших планет к Солнцу в период больших значений числа Вольфа вносится возмущение (по-видимому, за счет прилив-

ного гравитационного воздействия) в процесс формирования солнечных пятен такое, что их число становится меньше. Но этот эффект заметно проявляется только при условии, что значения числа Вольфа (примерно в той же фазе предыдущего 11-летнего цикла, сдвиг на 9-12 лет) были высокими, т.е. в области пиков так называемого «векового» цикла. Графики регрессий (условных средних), показанные на рисунке 2, поясняют количественные аспекты этого эффекта.

Ретроспективные прогнозы годового числа Вольфа

При решении этой задачи будем использовать весь доступный ряд, начиная с 1700 года и по 2011 год. Для того чтобы приближенно учесть разное качество оценок числа Вольфа, данные с 1700 по 1748 год будем полагать заданными с ошибкой в 30%, с 1749 по 1848 год – с ошибкой в 15%. Данные, начиная с 1849 года, будем считать точными. Первые 300 значений ряда будем использовать как обучающую выборку, последние 12 годовых значений – как контрольную выборку, на которой будем проверять соответствие составляемых прогнозов фактическим данным.

Ретроспективные прогнозы числа Вольфа на основе авторегрессионных моделей с использованием итерационной схемы расчетов

Сначала, используя обучающую выборку (300 лет), построим три авторегрессионные модели, с минимальным запаздыванием аргументов в 1, 3 и 10 лет (модели обозначим как Y_1 , Y_3 , Y_{10} соответственно). Теперь построим прогноз на

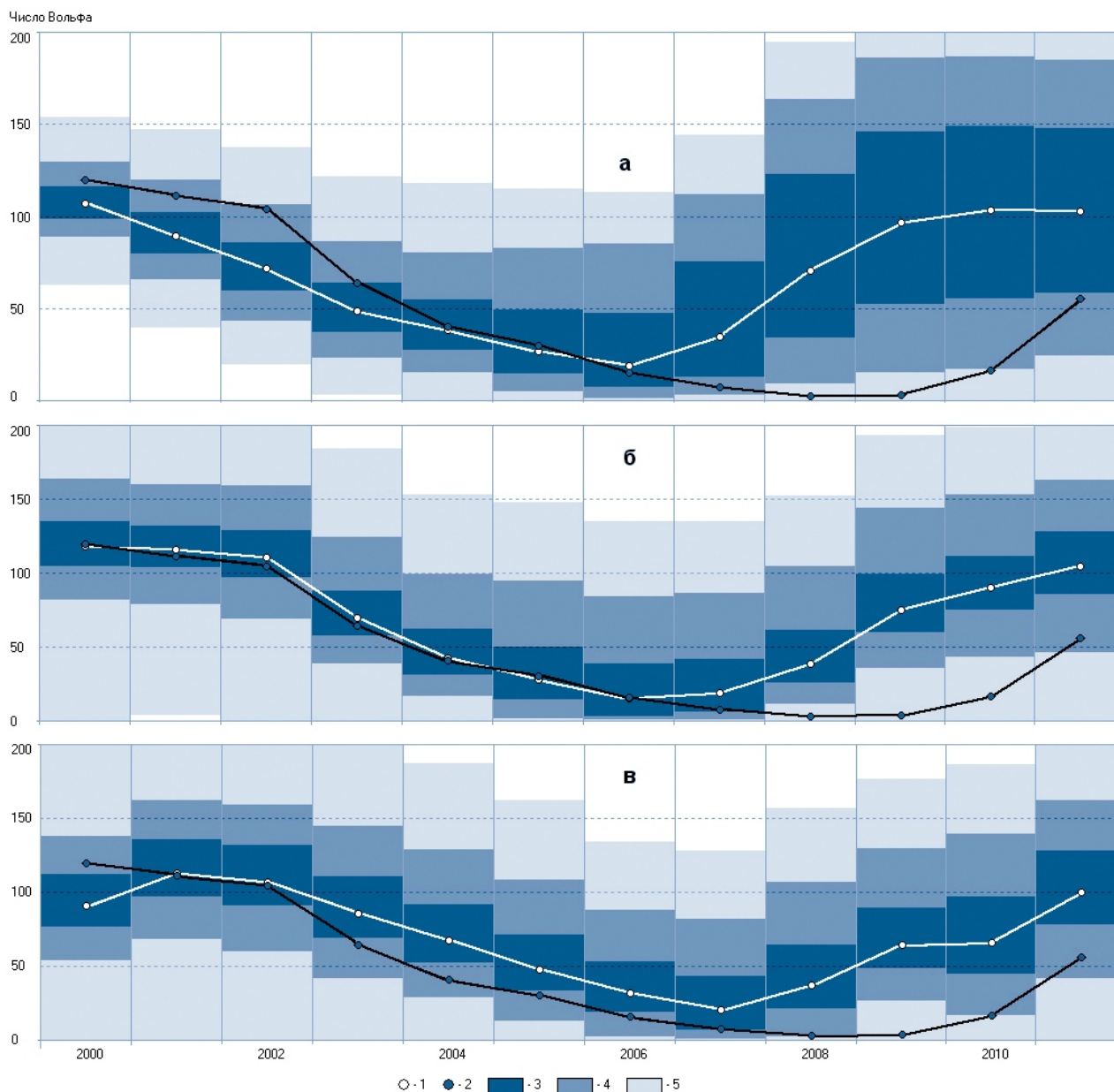


Рис. 3. Прогнозы числа Вольфа на 2000-2011 гг., выполненные по итерационной схеме с использованием различных авторегрессионных моделей: а – минимальное запаздывание аргументов 1 год; б – минимальное запаздывание 3 года; в – минимальное запаздывание 10 лет. 1 – медиана расчетной оценки числа Вольфа; 2 – медиана фактической оценки; 3-5 – доверительные интервалы оценок: [3-50 %, 4-80 %, 5 – (95-99) %]

12 лет вперед по итерационной схеме расчетов, начиная с 2000 года (рис. 3).

При применении данной схемы результаты расчета функции на предыдущих по времени шагах прогноза используются для приближенного задания ее неизвестных аргументов на последующих шагах. В этом случае вычисление оценок прогнозируемой переменной возможно с любой заблаговременностью. Но, естественно, точность таких оценок оказывается меньше, чем при точном задании значений предикторов.

Сравнение результатов прогнозирования по разным моделям на рисунке 3 позволяет видеть, что прогностические оценки как случайные величины не очень сильно различимы между собой. Тем не менее, некоторое отличие наблюдается. Такое различие связано с тем, что каждая модель обладает индивидуальными особенностями, влияющими на результаты расчетов. Объединяя прогнозы по разным моделям, относящихся к одному и тому же году, можно несколько улучшить синтетический прогноз, но эта задача требует специаль-

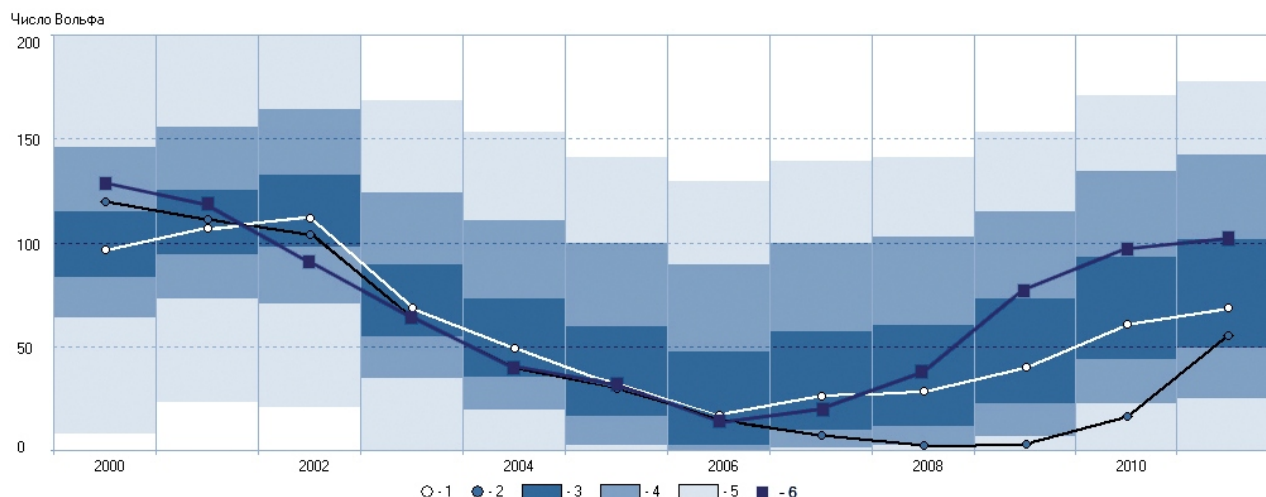


Рис. 4. Прогноз числа Вольфа на 2000-2011 гг. по итерационной схеме совместного прогнозирования переменных с минимальным запаздыванием аргументов 3 года с учетом в качестве дополнительных предикторов координат Юпитера и Сатурна. Обозначения те же, что и на рис. 3, дополнительно 6 – прогноз из работы [2]

ного решения, и она рассматривается в рамках данной статьи.

Сравнивая модельные расчеты с контрольными фактическими данными, можно сделать вывод о том, что самый лучший прогноз по итерационной схеме получился по модели УЗ. Не будем пытаться обсуждать возможные причины такого результата, просто выберем эту модель для дальнейшей модификации и попробуем ее улучшить, привлекая в качестве дополнительных предикторов координаты положения планет.

Прогноз числа Вольфа с поправкой за счет влияния больших планет

С учетом результатов предварительных исследований дополним обучающую 300-летнюю выборку данными о фазе орбитального цикла Юпитера и о расстоянии от него до Солнца и данными о фазе орбитального цикла Сатурна. Добавим также в качестве возможного предиктора расстояние между Юпитером и Сатурном. Построим по дополненным данным модель, в которой обязательными аргументами будут аргументы модели УЗ и возможными дополнительными предикторами будут названные переменные, описывающие положение больших планет. Модели, использующие такие дополнительные предикторы, заметно улучшают (главным образом, за счет Юпитера) описание динамики числа Вольфа как на обучающей, так и на контрольной выборке.

Прогноз по итерационной схеме с учетом влияния больших планет (рис. 4) дает уточнение прогноза минимума и фазы нарастания последнего 11-летнего цикла. Например, легко видеть, что меди-

ана прогноза на этом рисунке в годы истинного минимума (2008 и 2009 годы) проходит существенно ближе к фактическим значениям, числа Вольфа по сравнению со всеми вариантами прогноза, показанными на рисунке 3.

Для сравнения эффективности использованного метода прогнозирования с другими подходами был проведен поиск подходящих для сравнения результатов. Несмотря на значительное число работ в этой области имеющихся данных для корректного сравнения немного. Наиболее подходящим оказался прогноз годового числа Вольфа, построенный по итерационной схеме расчета с применением искусственных нейронных сетей, приведенный в работе [1]. На рисунке 4 этот прогноз показан на фоне наших оценок, рассчитанных по модели, учитывающей влияние больших планет. Сравнение этих результатов с фактическими данными позволяет отметить, что в период с 2000 по 2007 годы эти оценки сравнимы по величине ошибки (отклонения прогноза [1] и медианы нашего прогноза и от фактического значения). Начиная же с 2008 года, наш прогноз становится заметно точнее.

Таким образом, по совокупности результатов можно констатировать, что учет влияния планет улучшает модельное описание динамики годового числа Вольфа в прошлом и его контрольные ретроспективные прогнозы с разной заблаговременностью в период с 2000 по 2011 годы.

Прогнозы числа Вольфа на период до 2023 года

Принимая во внимание результаты анализа и ретроспективного прогнозирования числа динами-



Рис. 5. Прогнозы числа Вольфа на 2012-2023 гг. по итерационной схеме совместного прогнозирования переменных, составленные в начале 2012 года. А – прогноз по авторегрессионной модели с минимальным запаздыванием аргументов 1 год, Б – прогноз по модели с минимальным запаздыванием аргументов 9 лет и с включением в список предикторов расстояния от Солнца до Юпитера. 1 – медиана расчетной оценки числа Вольфа; 2, 3 – медиана фактической оценки; 4-6 – доверительные интервалы оценок: [4 – 50 %, 5 – 80 %, 6 – (95-99) %]; 7 – фактические значения числа Вольфа за 2012 и 2013 годы

ки числа Вольфа, перейдем к его предсказанию теперь уже на реальное будущее время. Для решения этой задачи на основе всех данных о годовых числах Вольфа за период с 1700 по 2011 год построим две модели, оптимизированные по предсказательной способности с заблаговременностью 1 год и 9 лет. Последняя модель, помимо запаздывающих чисел Вольфа, включает в список предикторов также текущее расстояние от Солнца до Юпитера. Используя две этих модели и итерационную схему расчета, составим два варианта прогноза годового числа Вольфа на период с 2012-го по 2023-й годы. Результаты этих расчетов представлены на рисунке 5.

Как можно видеть на этом рисунке прогнозы по двум разным моделям, отнесенные к одному и тому же году обладают разной точностью, хотя общая тенденция, отражающая наличие в исходных данных 11-летней цикличности совпадает в обоих вариантах. Различие вариантов прогноза, как при ретроспективных расчетах, обусловлено особенностями моделей. Модель, применявшаяся для расчетов в варианте А, при построении была ориентирована и, соответственно, оптимизирована для прогнозирования с заблаговременностью

1 год, а модель в варианте Б – для прогнозирования с заблаговременностью 9 лет.

Согласно прогнозу (вариант А), ближайший максимум годового числа Вольфа ожидается в 2014 году. Значение максимума цикла с вероятностью около 80 % лежит в пределах 70-120 единиц, и он с вероятностью около 95-99 % не должен превышать значение в 160 единиц. Что же касается минимума числа Вольфа, то назвать год минимума с высокой вероятностью на основании обоих прогнозов нельзя. Этот минимум, в соответствии с обоими прогнозами, может случиться в период с 2017 по 2020 годы. Наиболее вероятные годы минимума – 2019 и 2020. Размытость по времени ожидаемого положения минимума отражается в том, что оба прогноза ограничивают с вероятностью до 90 % значение числа Вольфа величиной примерно в 40 единиц. Если же положение минимума цикла можно было бы предсказать с точностью до одного года, то тогда с большой вероятностью можно было бы утверждать, что в этот год значение числа Вольфа не будет превышать 15 единиц. Однако в силу неустойчивости длительности основного цикла данной переменной предсказать с высокой точностью год очередного его минимума в настоящий момент пока не удастся.

Таким образом, из трех предположений о возможных факторах, определяющих динамику числа Вольфа, наиболее соответствующей наблюдаемым данным оказалась гипотеза, отдающая предпочтение внутренним факторам Солнца, но не исключающая внешнее воздействие со стороны больших планет солнечной системы, главным образом со стороны Юпитера; стохастические модели динамики числа Вольфа позволяют делать прогностические оценки этой переменной, которые, в свою очередь, могут оказаться полезными для построения календарных прогностических оценок на ближайшие годы параметров климата Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгосрочное прогнозирование индексов солнечной активности методом искусственных нейронных сетей / Н. А. Бархатов [и др.] // Известия вузов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44, № 9. – С. 806-814.
2. Егоров А. Г. Солнечная активность, барическая волна в приземной атмосфере Арктики и многолетние изменения арктического колебания / А. Г. Егоров // Метеорология и гидрология. – 2004. – № 2. – С. 27-37.
3. Игнатов А. В. Стохастическое моделирование / А. В. Игнатов, В. В. Кравченко, А. А. Чекмарев : электронный ресурс [пакет программ]. – Режим доступа : <http://irigs.irk.ru/work>.
4. Многолетние изменения концентрации озона как отражение солнечной активности / П. Н. Антохин [и др.] // Материалы Восьмого сибирского совещания по кли-

Чекмарев Аркадий Александрович
аспирант, инженер лаборатории гидрологии и климатологии Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, т. 8-914-920-48-18, E-mail: cvv32@yandex.ru

Игнатов Анатолий Васильевич
доктор географических наук, зав. лабораторией гидрологии и климатологии Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, т. 8-395-2-422-693, E-mail: ignatov@irigs.irk.ru

мато-экологическому мониторингу. – Томск : Аграф-Пресс, 2009. – С. 113-115.

5. Монин А. С. Колебания климата по данным наблюдений: тройной солнечный и другие циклы / А. С. Монин, Д. М. Сонечкин. – Москва : Наука, 2005. – 191 с.

6. Морозова А. Л. Гелиосферные процессы и погода / А. Л. Морозова, М. И. Пудовкин // Ученые записки Санкт-Петербургского государственного университета. Вопросы геофизики. – 1998. – Вып. 35, № 433. – С. 327-337.

7. Резников А. П. Предсказание естественных процессов обучающей системой / А. П. Резников. – Новосибирск : Наука, 1982. – 287 с.

8. Ривин Ю. Р. Циклы Земли и Солнца / Ю. Р. Ривин. – Москва : Наука, 1989. – 162 с.

9. Соболев Г. А. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли / Г. А. Соболев, И. П. Шестопалов, Е. П. Харин // Физика Земли. – 1998. – № 7. – С. 85-90.

10. Современная геодинамика и гелиогеодинамика. 500-летняя история аномальных явлений в природе и социуме Сибири и Монголии / под ред. С. И. Шермана. – Иркутск : Издательство Иркутского государственного технического университета, 2003. – 384 с.

11. Хромов С. П. Солнечные циклы и климат / С. П. Хромов // Метеорология и гидрология. – 1973. – № 9. – С. 93-110.

12. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь / А. Л. Чижевский. – 2-е изд. – Москва : Мысль, 1976. – 367 с.

Chekmarev Arkadiy Alexandrovitch
Postgraduate, laboratory engineer of hydrology and climatology of Institute of Geography named after V. B. Sochava SB RAS, Irkutsk, tel. 8-914-920-48-18, E-mail: cvv32@yandex.ru

Ignatov Anatoliy Vasil'yevitch
Doctor of Geographical Sciences, Head of laboratory of hydrology and climatology of Institute of Geography named after V. B. Sochava SB RAS, Irkutsk, tel. 8-395-2-422-693, E-mail: ignatov@irigs.irk.ru