

УДК 004.67+519.673

Н.В. Гавриловская, А.Г. Тонаж, Л.А. Хворова

**Моделирование погодных сценариев
для оценки урожайности зерновых культур
в условиях Западной Сибири***

N.V. Gavrilovskaya, A.G. Topazh, L.A. Khvorova

**Simulation of Weather Scenarios
to Assess the Yield of Grain Crops in Western Siberia**

При решении задачи прогнозирования хода продукционного процесса возникает проблема построения сценария погоды на отрезок времени от даты осуществления прогнозных расчетов до конца периода вегетации, определяющая эффективность использования моделей в системах принятия решений. В статье описывается методика формирования подобных сценариев из погодных реализаций лет-аналогов и генератором погодных данных.

Ключевые слова: моделирование, метеорологические факторы, погодный сценарий, урожайность.

Solving the problem of forecasting the course of the production process there is a problem of constructing weather scenarios on the period of time from the date of predictive calculations till the end of the growing season, which determines the efficiency of using models in decision-making systems. The article describes the method to form such scenarios using weather realizations of years-analogue and weather data generator.

Key words: modeling, meteorological factors, weather scenario, productivity.

Введение. Задача выработки плановых технологий в сельскохозяйственном производстве имеет определенную специфику. При разработке стратегии ведения сельского хозяйства экономический эффект должен быть получен на всем множестве возможных погодных реализаций в многолетнем разрезе. Однако на стадии планирования отсутствуют любые сведения о возможной погоде предстоящего года и надо принимать решения исходя из того, что погодная реализация данного года с той или иной вероятностью может быть любой из возможного набора, характерного для данной климатической зоны.

В настоящее время применяются следующие подходы и методы к решению проблемы составления прогнозов погоды [1].

1. *Статистический метод.* Данный метод связан с построением простейших эвристических (регрессионных) соотношений между входными и оцениваемыми характеристиками на основе статистической обработки данных многолетних наблюдений [2]. Его основным достоинством служит простота и общедоступность использования. Но всем существующим агрометеорологическим прогнозам присущ существенный недостаток: они имеют статический, а не динамический характер. Весь сезон вегетации

рассматривается как единое целое, и в прогнозе учитываются только интегральные характеристики погоды за исследуемый период (средние величины или суммы). При этом невозможно дать ответ на вопрос: в какой степени тот или иной конкретный временной интервал был благоприятен или неблагоприятен с точки зрения оцениваемого критерия. Установленные таким образом связи не поддаются часто физическому истолкованию, и характер связи нередко изменяется во времени. Ясно, что повышение динамичности или временной детализации агрометеорологических прогнозов при сохранении простоты формы может существенно повысить их ценность и практическую применимость.

2. *Учет периодичности в изменении метеорологических элементов.* Это одна из разновидностей статистического подхода, которая основана на статистическом анализе длительных однородных записей метеорологических факторов. При этом ставится цель установить некоторого рода периодичность или повторяемость вариаций, которую можно было бы использовать при составлении прогнозов этих элементов. Исследованиями установлено очень много разного рода периодов, продолжительностью от нескольких дней до нескольких десятилетий. Однако применяемые при этом способы нередко

* Работа выполнена при финансовой поддержке ведомственно-аналитической программы «Развитие научного потенциала Высшей школы 2009–2011 гг.» (проект №2.2.2.4/4278).

приводят к установлению периодов, которые вообще в природе не существуют. Другие же, обнаруженные и доказанные, периоды оказываются неустойчивыми во времени, что делает невозможным их прогностическое использование.

3. *Учет особенностей в ходе многолетних кризисных изменений метеорологических элементов.* Данный метод основан на том, что в некоторых районах определенные характеристики циркуляции и погоды возникают более часто в одни и те же даты того или другого месяца по сравнению с соседними датами.

4. *Учет связей между изменением метеорологических явлений и изменением солнечной активности.* Действительно, солнечная активность является одним из факторов, влияющим на атмосферу земли и, следовательно, формирующим в определенной мере характер ее общей циркуляции. Однако проведенные нами исследования цикличности солнечной активности показали, что в периодах циклов отсутствует всякая закономерность, что также делает невозможным их использование.

5. *Учет связей между состоянием некоторых центров действия атмосферы и погодой в отдельных районах Северного полушария.*

6. *Закономерности повторяемости и преемственности типов атмосферной циркуляции.* В ряде исследований, относящихся к проблеме прогнозов, ставится цель подойти к разработке методов долгосрочных прогнозов погоды исходя из типизации макросиноптических процессов, наблюдавшихся на полушарии или каком-либо его районе.

Однако немногие из имеющихся типизаций доведены до построения метода долгосрочных прогнозов, так как у большинства из них не выяснены закономерности преемственности установленных типов. Наибольшим затруднением, которое испытывалось при использовании типов для составления долгосрочных прогнозов, является предсказание типа наступающих процессов. Большинство ошибок в прогнозах погоды, составленных на подобных принципах, проистекает именно из-за ошибок в прогнозе типа.

7. *Использование аналогов.* Чтобы предсказать характер будущего макропроцесса, необходимо выявить основные действующие физические факторы, их роль и изменение во времени. Нередко эту задачу решают косвенно, изучая макросиноптические процессы, наблюдавшиеся в прошлом, и отыскивая среди них процессы, аналогичные тем, которые наблюдаются в текущем сезоне, месяце или каком-то другом периоде. В таком случае принято считать, что данные процессы обусловили аналогичные физические факторы, действовавшие с такими же весом и последовательностью. Как показала практика применения такого рода допущений, неизбежно возникает вопрос о том, какие два процесса считать аналогичными, или что можно считать критерием аналогичности.

Тем не менее построение метода прогноза на аналогах может быть важным вспомогательным средством при составлении долгосрочных прогнозов погоды любым из существующих методов.

8. *Учет длинных волн, возникающих в толще тропосферы, и связанного с ним режима погоды у земли.*

9. *Решение уравнений гидродинамики и термодинамики атмосферы.* Действительно, было бы идеальным решение задачи прогнозов погоды с помощью математических вычислений, основанных на полном решении уравнений динамики и термодинамики атмосферы. Однако такое решение задачи сопряжено с большими трудностями чисто математического характера, а также с трудностями в связи с отсутствием исходных данных нужной точности и недостаточными знаниями физической природы многих атмосферных процессов и явлений.

Современный уровень развития компьютерной техники и программного обеспечения создал предпосылки для нового подхода, который основывается на использовании компьютерных имитационных моделей.

1. Система моделирования погодных сценариев. В настоящее время для решения практических задач управления урожайностью используют достаточно простые по структуре эмпирические модели (агрометеорологические прогнозы), не требующие для разработки и эксплуатации крупных затрат средств и высококвалифицированного труда. Они просты и доступны в использовании, но крайне приближительны и неточны. Все они, как уже сказано выше, имеют статический характер, что существенно понижает их точность.

В связи с этим для обоснования плановой технологии на ближайший период может быть использована описанная в данной статье специально разработанная для этих целей система моделирования погодных сценариев.

Ясно, что величина урожая культивируемого сорта при принятой агротехнике в большой степени зависит от складывающихся в сезоне вегетации погодных условий. Поэтому успех в решении задачи прогнозирования урожаев тесно связан с возможностью получения прогнозов будущих погодных условий. Известно, что в настоящее время не существует надежных долгосрочных прогнозов погоды. Однако можно рассмотреть задачу разработки так называемых сценариев погоды с тем, чтобы, подавая смоделированные данные о погоде на вход динамической модели производственного процесса, получить на ее выходе правдоподобный результат.

Для решения проблемы разработки погодных сценариев за основу был взят и модифицирован генератор, разработанный в лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического института (Санкт-Петербург).

В модифицированной версии генератор позволяет работать в двух режимах: моделировать сценарий

погоды по данным лет-аналогов (в принципе по любой реализации фактических погодных условий) и с помощью стохастических (вероятностных) методов.

Моделирование погодных сценариев по данным лет-аналогов. В этом варианте в основу решения задачи прогнозирования положена технология определения лет-аналогов [3]. Первый этап в технологии определения лет-аналогов состоит в отнесении всей совокупности исходных объектов к определенному классу на основании исследования системы признаков или показателей, характеризующих эти объекты. Иными словами, из множества Ω всех исследуемых объектов

$$\Omega = \left\{ (X^S, Y) : X = \{x_{ij}\}, Y = \{y_S\}, \right. \\ \left. s = \overline{1, n}; i = \overline{1, l}; j = \overline{1, m}; x_{ij} \in R, y_S \in R \right\} \quad (1)$$

($X^S = \{x_{ij}^S\}$ – матрица размера $l \times m$, определенная для каждого S ; s – совокупность наблюдаемых признаков объекта, влияющих на один признак y_S) сформировать по определенным критериям подмножества $A_k \in \Omega$ – классы сходных между собой объектов – лет-аналогов вида

$$A_k = \left\{ (X^N, Y_N) : X^N \in X^S, Y_N \in Y, \right. \\ \left. N = \overline{1, a_k}, a_k \leq n \right\}, \quad (2)$$

k – количество сформированных классов, обладающих совокупностью факторов, близких между собой по влиянию на результирующий признак объекта y_N , a_k – количество лет-аналогов в соответствующем классе.

Задача второго этапа технологии заключается в том, чтобы из всех подмножеств $A_k \in \Omega$ выбрать класс объектов A_{k_0} , который лучше всего соответствует, согласно определенным критериям, новому элементу $X^{n+1} = \{x_{i_0 j}^{n+1}\}$, $i_0 = \overline{1, l_0}$; $j = \overline{1, m}$, $l_0 < l$ (l обычно принимают равным 365 дням; l_0 – номер дня, с которого производится моделирование погодного сценария).

Под объектами классификации понимаются годы, а в качестве признаков или показателей, характеризующих эти объекты, выступают агрометеорологические факторы: сумма осадков, число дней с осадками, сумма эффективных температур за определенный период вегетации и урожайность культуры.

Для оценки влияния погодных условий на формирование урожая на основе исследования совокупности агрометеорологических параметров требуется классифицировать ситуацию в определенный период вегетационного цикла, учитывая ее влияние на состояние растений, точнее на урожайность. Данная задача является типичной задачей распознавания образов. В (1) x_{ij} – значения агрометеорологических факторов; y_S – значения фактической урожайности; n – число исследуемых лет; m –

число имеющихся агрометеорологических характеристик.

Использование этого метода предполагает, что при работе модели на ее вход подаются фактические погодные данные до того момента, с которого начинается прогнозирование. Для сглатывания (сглаживания) фактических данных и данных лет-аналогов фиксируются отклонения фактических данных на дату прогноза и отклонения данных года-аналога. Эти отклонения сглаживаются с помощью динамического звена первого порядка, отфильтровывающего флуктуации.

Например, пусть отклонения фактической температуры воздуха до даты сева составляют величину $\Delta T_{real}(k)$, а присоединенных данных года-аналога – $\Delta T_{anal}(k)$. Эти отклонения сглаживаются по формуле:

$$\Delta T_{prog}(k+1) = Q \cdot \Delta T_{anal}(k) + (1-Q) \cdot \Delta T_{real}(k), \quad (3)$$

где показатель сглаживания Q изменяется в пределах $0 < Q < 1$.

Полученная в результате этого сглаженная поправка добавляется к климатической кривой, которая распространяется далее на весь период прогноза.

В данном случае речь идет не о прогнозе погоды в общепринятом значении этого слова, а о выработке некоторого правдоподобного сценария погоды на прогнозный период.

Прогноз начинается с момента сева и уточняется по мере поступления метеорологических данных. Таким образом, ход метеоусловий «адаптируется» к особенностям конкретного года.

Второй метод имеет стохастический (вероятностный) характер. Источником новых погодных реализаций служит так называемый *генератор погоды*, в котором ежедневные погодные данные, такие как максимальная и минимальная температуры воздуха, минимальная влажность воздуха, скорость ветра, осадки и коэффициент ослабления солнечной радиации, моделируются как многомерный (6-мерный) случайный нестационарный процесс [4–6]. Генерация составляющих вектора погоды для каждого нового дня происходит следующим образом. Прежде всего разыгрывается ситуация: будет ли следующий день дождливым или нет. Это событие описывается простой цепью Маркова с условными вероятностями $P(W/W)$, $P(W/D)$, $P(D/W)$, $P(D/D)$, где W и D означают, будет ли следующий день дождливым или нет, если в текущий день выпадали или не выпадали осадки. Количество осадков, выпадающих в дождливый день, рассчитывается как случайная величина, подчиняющаяся закону Γ -распределения. Среднесуточное значение скорости ветра также моделируется как случайная величина, имеющая Γ -распределение, но, разумеется, с другими параметрами. Четыре остальных метеопараметра моделируются как случайный многомерный процесс. Первоначально рассчитываются климатиче-

ские средние значения этих величин (вычленяется постоянный годовой тренд). После чего центрированные и нормированные отклонения от этого тренда определяются с помощью специального формирующего фильтра первого порядка, характеристики которого однозначно определяются через автокорреляционные матрицы процесса, идентифицированные из фактических наблюдений:

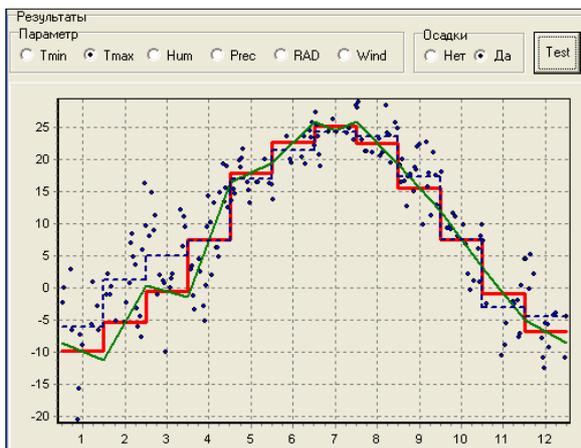
$$x(k+1) = A \cdot x(k) + B \cdot e(k), \quad (4)$$

где k – номер дня реализации; $x(k), x(k+1)$ – 4-мерные векторы; A, B – 4×4 – матрицы коэффициентов фильтра; $e(k)$ – 4-мерный дискретный белый шум.

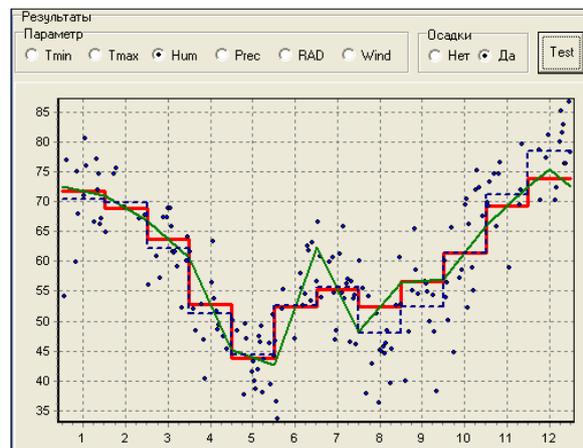
Компонентами вектора x являются метеопараметры, указанные выше. После вычисления они добавляются к климатическим нормам, образуя в целом составляющие погодного сценария. Все

входящие в модель коэффициенты так же, как и параметры Γ -распределений, оцениваются на основе хранящихся в базе данных фактических реализаций погоды за 20–30 прошлых лет. Они, разумеется, являются локально-специфическими и оцениваются для каждого локального места отдельно.

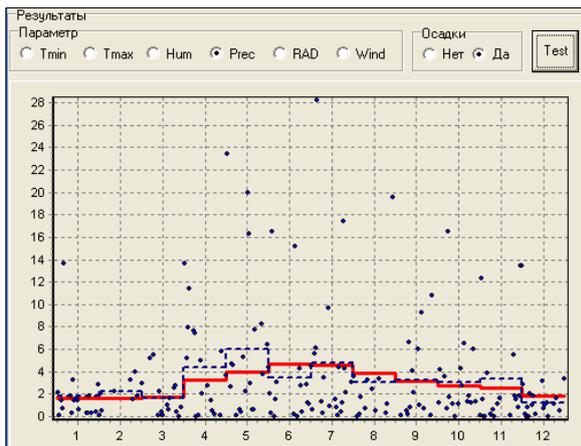
Генератор погоды работает следующим образом. Предполагается, что пользователь располагает фактическими данными о погоде до даты прогноза. При вызове модели в режиме «Генератор» должна быть указана именно эта дата. В таком случае система считывает имеющиеся данные из стационарной базы данных и запускает процедуру генерации погоды. Полученная в результате моделирования случайная реализация присоединяется к имеющимся фактическим погодным данным после фактических, образуя полный набор погодных данных, необходимых для прогона модели (рис. 1).



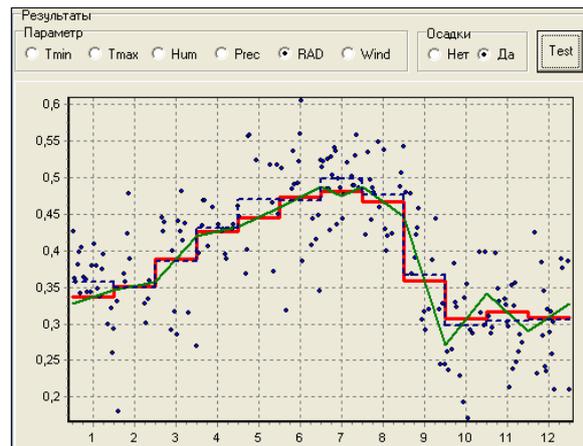
а) ось ординат – максимальная температура, °С



б) ось ординат – влажность, %



с) ось ординат – осадки, мм



д) ось ординат – солнечная радиация, кВтч/м²

Рис. 1. Восстановление суточных значений по среднемесячным данным

Примечание: по оси абсцисс расположены порядковые номера месяцев, начиная с января.

Обозначения: ступенчатая сплошная линия – многолетние среднемесячные значения параметров, сплошная линия – аппроксимация ступенчатой сплошной линии непрерывной ломаной, ступенчатая пунктирная линия – среднемесячные значения параметра для конкретного сгенерированного сценария, точки – сгенерированные ежедневные данные.

Описанная процедура повторяется несколько раз. В итоге расчетов получается «веер» возможных траекторий формирования урожая и соответствующие ему множества возможных значений потенциального вероятностного прогноза ресурсов

продуктивности (рис. 2). Проведя такую операцию по ходу вегетации многократно и сопоставляя каждый раз кривые обеспеченности, возможно оперативно корректировать планы и агротехнические мероприятия.

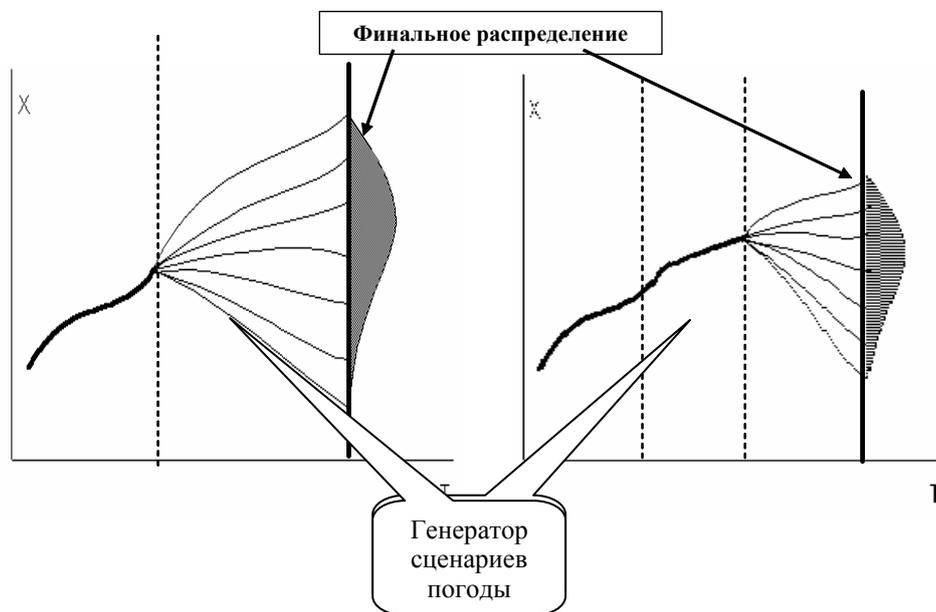


Рис. 2. «Веер» возможных траекторий формирования погодных сценариев

Понятие выработки сценария погоды не означает, что в результате будет получена реализация метеоусловий, когда-либо встречавшихся в данной местности. Требования к характеристикам сценария погоды заключаются в том, что эта процедура, будучи использована в качестве входного сигнала модели, даст на ее выходе результат, решающий задачу прогноза того или иного параметра продукционного процесса.

2. Использование системы моделирования погодных сценариев для агрометеорологических прогнозов. Агрометеорологические прогнозы представляют собой сущность информационного обеспечения растениеводства и постоянно используются агрономами в практической работе для планирования и управления продуктивностью посевов. Повышение точности используемых прогнозов и их доступности для конечного пользователя – актуальная и важная проблема.

Нет необходимости в обосновании важности задачи прогнозирования урожая как для теории продукционного процесса растений, так и для практики земледелия. Наличие информации о величине ожидаемого урожая обеспечивает возможность повышения эффективности экономических решений, принимаемых управленческим персоналом на уровне отдельной производственной единицы и по региону в целом.

Само по себе моделирование возможных реализаций погодных сценариев без их практического применения не представляет большой ценности. Поэтому рассмотрим описанные выше методики формирования метеорологических данных применительно к прогнозированию урожайности зерновых культур.

Рассмотрим конкретный год – 2008 – с известными погодными условиями и фактическим урожаем. На интервале до даты сева будем рассматривать фактические погодные условия данного года. Для оставшегося периода вегетации будем считать, что фактические погодные условия неизвестны. Построим веер возможных реализаций погоды от даты сева, смоделированных для данного года по годам-аналогам и с помощью генератора погодных реализаций (пять сценариев).

Предварительно проведем классификацию объектов исследования (1) и сформируем классы лет-аналогов по степени влияния фактических агрометеорологических факторов на урожайность (2).

Анализ проведенной классификации позволяет предположить, что для 2008 г. годами-аналогами будут являться 1980, 1988, 1993, 2003, 2006. Используя экспертную оценку, наиболее близкими на дату сева по фактическим реализациям погоды можно считать 2003 и 2006 гг.

С помощью динамической модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур

AGROTOOL [7], адаптированной к условиям Западной Сибири, были выполнены расчеты по развитию яровой пшеницы и оценена урожайность в зависимости от сгенерированных различных вариантов погодных условий (рис. 3). Как видно из таблицы (последняя строка), меньшую погрешность по суммам накопленных температур дают погодные сценарии, сформированные по годам-аналогам. Осуществим оценку урожайности для

2008 г. по прогнозным оценкам лет-аналогов по формуле:

$$\bar{y} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^a p_l \cdot y_k,$$

где p_l – вероятности отнесения урожайности к одной из категорий (например, низкая–высокая, низкая–средняя–высокая или другим образом сформированным категориям). Для случая двух категорий: $p_1 = 0,49$, $p_2 = 0,51$, $\bar{y} = 18,7$ (ц/га).

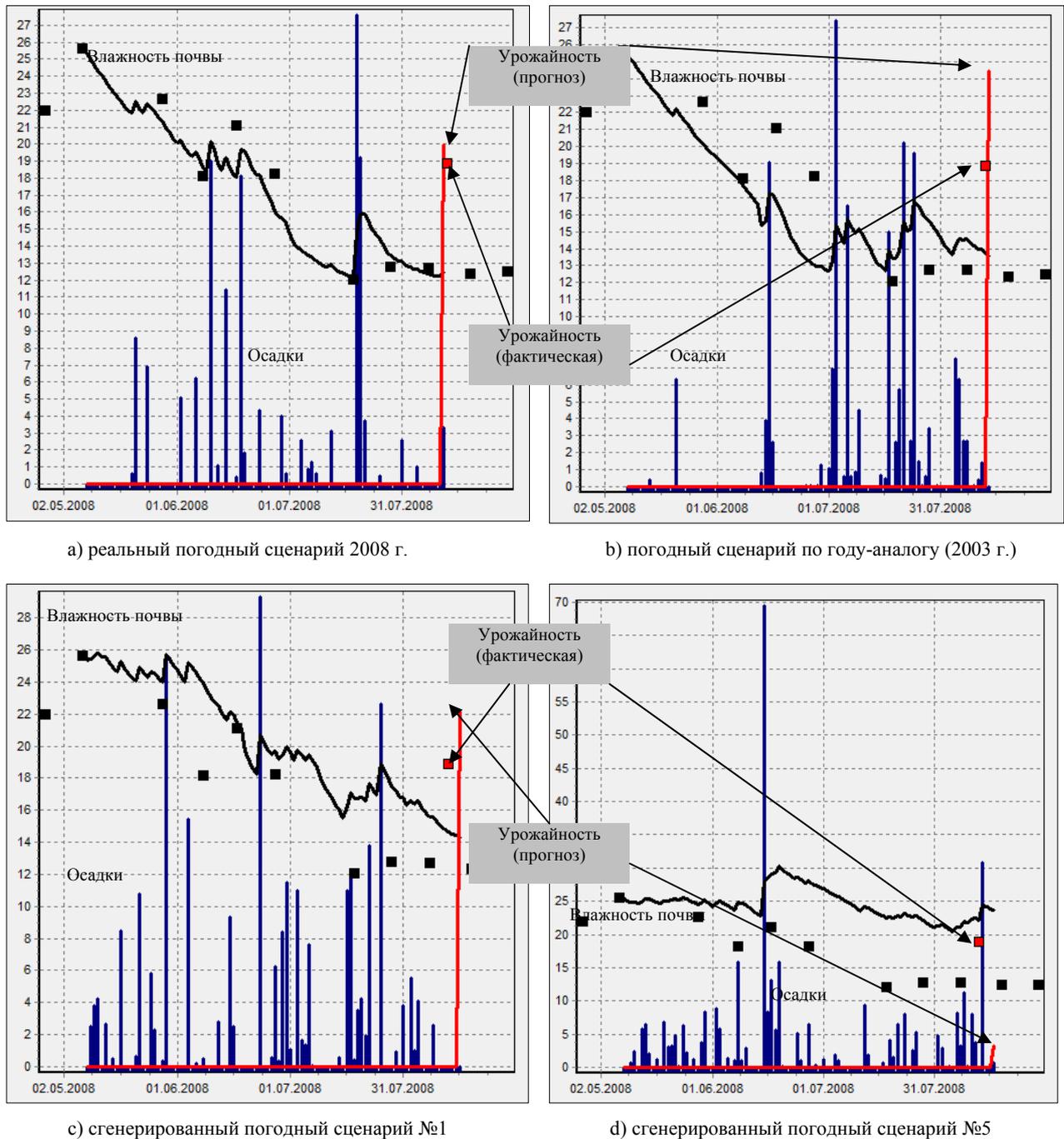


Рис. 3. Варианты погодных сценариев и величина урожайности

Разброс значений урожайности по погодным сценариям случайных реализаций составляет от 3,25 до 27,6 ц/га. Подчеркнем еще раз, что речь идет

не о прогнозе погоды в общепринятом значении этого слова, а о выработке некоторого правдоподобного сценария погоды на прогнозный период.

Результаты расчетов

Урожайность	2008	Годы-аналоги		Погодные сценарии				
		2003	2006	1	2	3	4	5
Урожайность, ц/га								
фактическая	18,9	15,4	25,4	-	-	-	-	-
прогноз	19,9	15,4	24,5	22,1	25,7	27,6	16,1	3,25
Накопленная сумма температур по декадам вегетационного периода, °С								
Средняя относительная погрешность, %	-	4,3	5,2	7,8	23,9	15,2	14,7	8,8

Заключение. Кратко анализируя результаты выполненных расчетов, можно сделать следующие выводы:

1) с помощью стохастического генератора формируется теоретически неограниченный модельный ансамбль погодных реализаций для получения возможных траекторий формирования урожая;

2) достоинством смоделированных погодных сценариев является их динамический характер;

3) соответствующие погодные реализации могут быть использованы в качестве входных сигналов компьютерной динамической модели для расчета возможных значений урожаяев.

Как показал анализ и всестороннее изучение проблемы осуществления заблаговременного прогноза урожайности сельскохозяйственных культур, разработанная авторами технология оценки урожайности зерновых культур с использованием гене-

ратора погодных сценариев на основе технологии лет-аналогов является новой и оригинальной.

Анализ результатов применения данной технологии показал хорошее совпадение фактической урожайности с расчетной по погодным сценариям лет-аналогов. Это говорит о том, что смоделированные погодные сценарии могут успешно применяться для текущего планирования и перспективного прогнозирования урожайности яровой пшеницы на территории Алтайского края.

Дальнейшее развитие описанной методики может происходить, по крайней мере, в направлении осуществления аналогичных расчетов для других почвенно-климатических условий и сельскохозяйственных культур. Меняя объект моделирования и почвенно-климатические условия, можно исследовать принципиальную применимость компьютерных систем моделирования погодных сценариев.

Библиографический список

1. Гирс А.А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. – Л., 1960.
2. Чирков Ю.И. Агрометеорология. – Л., 1986.
3. Гавриловская Н.В., Хворова Л.А. Разработка алгоритма определения года-аналога для оценки урожайности зерновых культур в условиях Алтайского края // Известия АлтГУ. – 2007. – №1 (53).
4. Топаж А.Г. Моделирование суточных метеоданных как входного сигнала модели продукционного процесса // Почва и растение – процессы и модели: сб. науч. тр. – СПб., 1992.

5. Топаж А.Г. Формирование метеорологической информации как входного сигнала прикладных динамических моделей агроэкосистемы: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1994.
6. Richardson C.W., Wright D.A. WGEN: A model for generating daily weather variables // US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8. – USDA, Washington, 1984.
7. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб., 2006.