

*Ю.Б.Кирста, Г.С.Зинченко, О.В.Ловцкая, Т.А.Белоторонина*  
**Оценка и прогноз агроклиматического  
потенциала Алтайского края в условиях  
современных изменений климата\***

Данное исследование выполнено на основе эффективного метода по анализу структурно-функциональной организации природных систем – системно-аналитического моделирования (САМ). Такое моделирование позволяет выявить и количественно охарактеризовать закономерности поведения сложных природных объектов на основе специальной обработки данных наблюдений за их динамикой. Метод САМ и разработанная на его основе модель динамики агроклиматического потенциала путем решения обратной задачи (идентификации модели) обеспечивают определение динамики потенциала, трендов температур воздуха, осадков и уровня антропогенно обусловленного плодородия земель на основе имеющихся многолетних рядов фактических урожаев зерновых, среднеемноголетних значений месячных температур воздуха и количества осадков. Рассмотрим кратко основные особенности САМ [1–2].

**Метод системно-аналитического моделирования.** Он базируется на системном информационно-иерархическом подходе [3–5]. Согласно данному подходу любой сложноорганизованный природный объект рассматривается как компонент биосферы, принадлежащий определенному иерархическому уровню ее организации, имеющий характерный для него цикл развития и подчиняющийся в своем развитии определенным информационным закономерностям. Для разработки модели в САМ одновременно с теоретическим анализом зависимостей процессов от факторов среды используются оптимизационные и вычислительные методы (Монте-Карло, Хука-Дживса, Стефенсона и др.). Эти методы реализованы в виде специального пакета компьютерных программ, с помощью которых могут обрабатываться несколько тысяч экспериментальных данных о динамике природных процессов и одновременно выполняться оптимизационный подбор до 100 параметров уравнений. Такая обработка существенно облегчает анализ в ходе САМ закономерностей процессов и структурно-функциональной организации исследуемого объекта в целом. Системно-аналитическое моделирование завершается, ког-

да расхождение между расчетными и наблюдаемыми данными по основным для природных объектов процессам достигает теоретически возможного наименьшего значения. Согласно информационному закону, определяющему функционирование эволюционно развитых систем, это значение соответствует стандартному отклонению в процентах от арифметического среднего (коэффициенту вариации) 24% по временным и такому же значению 24% по количественным характеристикам базовых для этих систем процессов [4]. Обязательным требованием САМ является значительное превышение используемых в расчетах экспериментальных данных над числом параметров модели. Это обеспечивает возможность выявления закономерностей природных процессов по информации, заключенной неявным образом в рядах многолетних наблюдений за процессами и воздействующими на них факторами среды [6].

**Модель динамики агроклиматического потенциала территории.** Агроклиматический потенциал сельскохозяйственных земель наиболее естественно определять как ожидаемую урожайность сельскохозяйственных культур для сложившихся условий среды и землепользования. Для оценки потенциала, например, можно использовать урожайность зерновых в целом, принятую в статистической отчетности [7]. В то же время для большинства развитых стран, включая Россию, основной сельскохозяйственной культурой является пшеница, поэтому агроклиматический потенциал можно эквивалентным образом определить как ожидаемую урожайность агроценозов пшеницы, отвечающую сложившимся условиям среды, почвам, технологиям возделывания и используемым районированным сортам культуры. Данное понятие потенциала и будет использоваться нами далее. Соответственно под динамикой агроклиматического потенциала мы понимаем его многолетние межгодовые изменения, которые рассчитываются по модели динамики агроклиматического потенциала.

Разработанная с помощью САМ математическая модель динамики агроклиматического

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобразования РФ (программа «Университеты России», грант УР.08.01.017) и РФФИ (02-05-81013 Бел 2002а).

потенциала обеспечивает расчет одновременно динамики агроклиматического потенциала и многолетних трендов температур воздуха (отдельно для холодного и теплого периодов года), осадков и уровня антропогенно обусловленного плодородия. Метод расчета представляет собой выполняемую в рамках САМ процедуру идентификации параметров модели для конкретных территорий. Метод основан на решении обратной задачи, когда указанные характеристики и параметры восстанавливаются (определяются) по многолетним рядам фактических урожаев зерновых, среднесезонными значениями месячных температур воздуха и осадков.

Модель динамики агроклиматического потенциала имеет сложную структуру и состоит из трех подмоделей: фенологического развития агроценозов, влагообмена в почвах и урожайности.

В подмодели фенологического развития расчет биологического времени и его соответствия с ходом физического (календарного) времени ведется по уравнениям следующего вида:

$$tb = 1/30 \sum_{t_0}^t \Delta tb, \quad (1)$$

$$\Delta tb = \begin{cases} H(T_1, T_2, 0, 1, 0, 0, Td) + \\ + \frac{a}{\pi} \sin[\pi H(T_1, T_2, 0, 1, 0, 0, Td)], \\ 1, \text{ если } t1 \leq tb \leq t2 \text{ или } t3 \leq tb \leq t4 \text{ или } t5 \leq tb \leq t6 \end{cases}$$

где  $tb$  – текущее биологическое время растений (месяцы);  $\Delta tb$  – прирост биологического времени за один день (дни);  $t_0$  и  $t$  – даты всходов (или сева) и текущая календарная дата соответственно;  $1/30$  – множитель, переводящий дни в месяцы биологического времени;  $T_1, T_2$  – температурные пороги, используемые в модели как параметры, °С;  $Td$  – среднесуточная температура воздуха, полученная путем выполняемой в ходе расчетов интерполяции на основе кубических сплайнов имеющих среднесезонных температур, °С;  $a$  – параметр,  $-1 \leq a \leq 1$ ;  $t1, t2, t3, t4, t5, t6$  – значения биологического времени, отвечающие началу ( $t1, t3, t5$ ) и окончанию ( $t2, t4, t6$ ) соответствующих периодов, где отсутствует зависимость хода биологического времени от температуры воздуха. Эти периоды определяются информационным законом функционирования природных биологических систем и имеют фиксированное положение в 3,3-месячном цикле развития растений [8]; функция  $H$  определяется выражением:

$$H(X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2, X) = \begin{cases} Y1 - Z1 \times (X - X1), & \text{если } X < X1 \\ \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1} \times (X - X1) + Y1, & \text{если } X1 \leq X < X2, \\ & X1 \neq X2 \\ Y2 + Z2 \times (X - X2), & \text{если } X \geq X2 \end{cases} \quad (2)$$

где  $X1, X2, Y1, Y2, Z1, Z2$  – параметры;  $X$  – какая-либо переменная модели. Непрерывная кусочно-линейная функция  $H$  будет использоваться с различными значениями параметров для описания (аппроксимации) различных форм зависимостей между переменными.

В подмодели влагообмена используются балансовые уравнения, где учитываются уже накопленная в почве влага, месячные осадки, обмен влагой с нижележащей толщей почвы, суммарное испарение, поверхностный и боковой внутрипочвенный сток и другие процессы [1–2]. Описание баланса влаги в почве имеет общий вид:

$$W^II - W^I = \sum_{i=1}^n PRO_i(T, P, W, a1, \dots, ak), \quad (3)$$

где  $W^I, W^{II}$  – запасы продуктивной влаги в верхнем метровом слое почвы на начало и конец текущего месяца соответственно (мм);  $PR\kappa_i$  – изменение запасов влаги за счет процесса  $i$ , зависящего от аргументов  $T, P, W$  и параметров (мм за месяц);  $n$  – общее число процессов, рассматриваемых в текущем сезоне года;  $T$  – среднемесячная температура воздуха (°С);  $P$  – месячные осадки (мм);  $W$  – среднемесячные запасы продуктивной влаги  $W = (W^I + W^{II})/2$  (мм);  $a1, \dots, ak$  – параметры подмодели, число которых равно  $k$ . В свою очередь зависимости отдельных процессов от аргументов характеризуются в (3) преимущественно с помощью функции (2). Среднемесячные температуры и осадки для отдельных лет восстанавливаются из среднесезонных значений по трендам, определяемым в процессе САМ.

В подмодели урожайности используются многолетние тренды температур воздуха (отдельно для холодного и теплого периодов года) и осадков, изменение которых характеризуется в процентах от их месячных значений. Общие уравнения для таких многолетних трендов имеют вид:

$$\begin{aligned} T &= \bar{T} [1 + a1(k - N/2)] \text{ для } T < 0, \\ T &= \bar{T} [1 + a2(k - N/2)] \text{ для } T \geq 0, \\ P &= \bar{P} [1 + a3(k - N/2)], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $T$  – среднемесячная температура воздуха

(°C);  $P$  – месячные осадки (мм);  $\bar{T}, \bar{P}$  – наблюдаемые среднееголетние месячные значения температуры воздуха и осадков соответственно;  $a_1, a_2, a_3$  – параметры трендов, характеризующие доли (проценты) ежегодного увеличения/уменьшения месячных значений температур воздуха для холодного ( $T < 0$  °C) и теплого ( $T \geq 0$  °C) периодов и осадков соответственно;  $k$  – порядковый номер года в рассматриваемом многолетнем периоде,  $k = 1, \dots, N$ ;  $N$  – общее число лет в рассматриваемом многолетнем периоде.

Восстановленные по уравнению (4) среднемесячные температуры воздуха и осадки используются одновременно во всех трех подмоделях: фенологического развития, влагообмена в почвах и урожайности. Динамика агроклиматического потенциала рассчитывается как урожайность агроценозов пшеницы за отдельные годы, отвечающая восстановленным по (4) для отдельных лет значениям среднемесячных температур воздуха и осадков. Непосредственно уравнение агроклиматического потенциала имеет вид:

$$A_p = H(a_4, a_5, a_6, 1, 0, 0, Wb) \times \frac{a_7 \times Si}{1 + a_8 \times Si} \times (1 + a_9)^{k-1}, \quad (5)$$

где  $A_p$  – агроклиматический потенциал, ц/га;  $H(a_4, a_5, a_6, 1, 0, 0, Wb)$  – кусочно-линейная функция (2);  $a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$  – параметры;  $Wb$  – запасы продуктивной влаги в почве в критической для формирования будущего урожая фазе развития растений (колошение-цветение) (мм);  $k$  – порядковый номер года в рассматриваемом многолетнем периоде;  $Si$  – суммарное испарение за период непосредственного формирования урожая (мм). Значения  $Si$  рассчитываются в подмодели урожайности с 3-дневным шагом по времени на основе уравнений баланса продуктивной влаги в почве (3) для летнего периода. При этом используются интерполированные на основе кубических сплайнов с 3-дневным шагом по времени значения температур, осадков, а также влажности почв, рассчитанные ранее в подмодели влагообмена с шагом по времени 1 месяц.

В уравнении (5) функция  $H(a_4, a_5, a_6, 1, 0, 0, Wb)$ , где  $a_6 \leq 1$ , характеризует увеличение агроклиматического потенциала (урожайности) с ростом влагообеспеченности растений в критический для формирования урожая период биологического времени. Этот период найден в ходе САМ и отвечает рассчитываемой по подмодели фенологического развития фазе ко-

лошения-цветения растений. Зависимость  $\frac{a_7 \times Si}{1 + a_8 \times Si}$  характеризует увеличение общих затрат влаги на образование органического вещества с ростом суммарного испарения в период формирования урожая. В свою очередь параметр  $a_7$  соответствует уровню антропогенно обусловленного плодородия, зависящего от уровня земледелия, содержания гумуса и характера почв, особенностей ландшафта и других факторов. Множитель  $(1 + a_9)^{k-1}$  характеризует собственно многолетний тренд уровня плодородия, снижающегося или увеличивающегося при  $a_9 < 0$  или  $a_9 > 0$  соответственно. При этом значение параметра  $a_9$  определяется всем комплексом меняющихся факторов среды, в первую очередь технологиями возделывания сельскохозяйственных культур. Таким образом, подмодель урожайности включает 9 параметров, в том числе 4 параметра для трендов температур холодного и теплого периодов года, осадков и уровня плодородия.

Модель динамики агроклиматического потенциала в целом содержит большое число функциональных зависимостей, характеризующих с помощью 65 параметров. Каждый параметр, очевидно, прямо или косвенно влияет на агроклиматический потенциал территории. Некоторые параметры, соответствующие стабильным для разных территорий агроклиматическим характеристикам среды, мы принимаем постоянными. Их значения получены с помощью САМ непосредственно при разработке модели [1–2]. Для остальных параметров, отвечающих значительно варьирующим характеристикам среды, выполнено ранжирование по степени их влияния на агроклиматический потенциал. На основе ранжирования определены основные параметры-показатели, которые подлежат идентификации и обеспечивают расчет динамики агроклиматического потенциала для конкретных территорий.

**Параметры-показатели, формирующие агроклиматический потенциал.** Общее число найденных в рамках САМ основных параметров-показателей потенциала по первой, второй и третьей подмоделям составляет  $3 + 7 + 9 = 19$ . Параметры каждой из подмоделей в целом имеют разную значимость для формирования агроклиматического потенциала. Системно-аналитическое моделирование показало, что наиболее значимыми для потенциала являются параметры третьей подмодели, за ними следуют параметры второй и затем первой подмоделей. Таким образом, мы имеем последовательность из 19 параметров, наиболее важных для

выполнения процедуры идентификации модели для конкретных территорий. Процедура идентификации модели динамики агроклиматического потенциала требует наличия данных наблюдений за урожайностью агроценозов. Одновременно можно использовать, при их наличии, данные фенологических наблюдений и данные по влажности почв. В отдельных случаях данных может быть недостаточно для удовлетворения основного требования САМ – значительного превышения количества наблюдений над числом идентифицируемых параметров. Установленная последовательность идентифицируемых параметров позволяет ограничивать их число при идентификации модели в соответствии с количеством имеющихся данных наблюдений. Используя при этом первые параметры из установленного ряда значимости, мы максимально быстро достигаем наилучшей точности оценки динамики агроклиматического потенциала и одновременно трендов агроклиматических характеристик территории.

В результате ранжирования установлен следующий ряд значимости параметров-показателей агроклиматического потенциала.

1. Параметр  $a_7$  в (5), характеризующий уровень антропогенно обусловленного плодородия.

2. Параметр  $a_8$  в (5), характеризующий снижение скорости образования органического вещества при большой интенсивности суммарного испарения и зависящий от сомкнутости растительного покрова и сложившихся в целом на характеризуемой территории климатических условий.

3–5. Три параметра  $a_4$ ,  $a_5$ ,  $a_6$  в (5), характеризующие влияние на урожайность увлажнения почв в период колошения-цветения растений.

6–9. Четыре параметра  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  в (4) и (5), соответствующие определяемым в ходе САМ трендам среднемесячных температур воздуха (отдельно для холодного и теплого периодов), месячных осадков и уровня антропогенно обусловленного плодородия.

10. Параметр в (3), характеризующий диффузию влаги вниз в летние месяцы через нижнюю границу верхнего метрового слоя.

11. Параметр в (3) – отвечает пороговому значению влажности почвы, при котором диффузия влаги из нижележащей толщи почв в иссушаемый летом верхний метровый слой почвы достигает максимальной величины.

12. Параметр в (3) – соответствует количеству влаги, поступающей из глубоких почвенных горизонтов за счет диффузии в верхнюю метровую толщу почв при образовании непроницаемой для воздуха ледяной прослойки в при-

поверхностном слое почвы. Появление такой прослойки приводит к вакуумному разряжению в нижележащей толще почвы [9].

13. Параметр, характеризующий в (3) снижение суммарного испарения влаги в атмосферу после жатвы или увядания растений. Это имеет место, когда исчезает естественный биологический насос (растения), работающий за счет фотосинтеза и «перекачивающий» влагу из почвы в атмосферу.

14. Параметр в (3), соответствующий максимальной влагоемкости оттаивающей почвы в полевых условиях.

15. Параметр в (3), характеризующий зависимость от влажности почвы для совокупного процесса конвекции-конденсации влаги из почвы в атмосферу (конвекция) и из атмосферы в почву (конденсация, подобная выпадению росы, инея).

16. Параметр в (3) – представляет собой долю (порядка 70%) осадков, достигающую почвы. Другая меньшая доля перехватывается надземными частями растений и идет на их смачивание.

17–18. Два параметра  $T_1$ ,  $T_2$  в (1) – характеризуют температурные пороги, определяющие ход биологического времени растений.

19. Параметр, отвечающий специфичной для территории среднемноголетней дате всходов.

Установленный ряд значимости 19 идентифицируемых параметров-показателей модели характеризует степень важности для динамики агроклиматического потенциала соответствующих характеристик среды и идущих в агроэкосистемах процессов. Таким образом, нами определены основные показатели, формирующие агроклиматический потенциал территорий.

При оценке агроклиматического потенциала в рамках САМ с помощью разработанной модели мы фактически используем информацию о динамике потенциала, трендах температур воздуха, осадков и уровня антропогенно обусловленного плодородия, которая заключена неявным образом в многолетних рядах наблюдений за урожайностью культуры пшеницы на характеризуемой территории. В нашем случае потенциал – это урожайность при соответствующих рассматриваемому году трендовых значениях среднемесячных температур воздуха и осадков, а также уровня антропогенно обусловленного плодородия. При этом точность расчета урожайности (потенциала) с учетом указанных трендов близка к теоретически наилучшей при сравнении с фактическими урожаями. Теоретически наилучшая точность определяется информационным законом функционирования природных биологических систем и

характеризуется стандартным отклонением 24% от арифметического среднего.

Выполним теперь идентификацию модели динамики агроклиматического потенциала в рамках САМ с использованием данных о среднемноголетних месячных температурах воздуха и осадках, а также урожайности отдельных лет по Алтайскому краю за 30-летний период (1971–2000 гг.).

**Расчет современных трендов температур воздуха, осадков, уровня антропогенно обусловленного плодородия и динамики агроклиматического потенциала в Алтайском крае по модели динамики агроклиматического потенциала.** На рисунке 1 представлены природно-экономические зоны Алтайского края. Первая зона дополнительно разделена еще на две подзоны для более корректного учета природно-климатических условий, заметно различающихся в этих подзонах (обозначены как зоны IA, IB). Для каждой из выделенных 8 зон были взяты по две опорные (репрезентативные) агрометеостанции. Среднемноголетние данные о месячных температурах воздуха и осадках, а также об урожайности яровой пшеницы по каждой паре станций для отдельных лет были усреднены и использовались в ходе САМ как средние характеристики каждой зоны. Общая характеристика климатических условий Алтайского края приведена в таблице 1.

Таким образом, при идентификации модели динамики агроклиматического потенциала в рамках САМ одновременно использовалось 96 значений среднемесячных температур воздуха (12×8 зон = 96), 96 значений месячных осадков (12×8 зон = 96) и 240 значений урожайности (30 лет×8 зон = 240). При этом в ходе САМ из 65 параметров модели определялось (идентифицировалось) в качестве общих для Алтайского края лишь 19. Остальные параметры имели фиксированные значения. Тем самым было соблюдено основное требование проведения САМ, обеспечивающего решение обратной задачи, – число идентифицируемых параметров должно быть много меньше числа наблюдений.

Следует отметить, что идентификацию модели динамики агроклиматического потенциа-

ла можно проводить с различным числом параметров – одним, двумя и т.д., выбирая их согласно установленному для них ряду значимости (см. выше). Например, использование для идентификации модели по Алтайскому краю 8 параметров вместо 19 лишь незначительно увеличивало расхождение (невязку) расчетных и фактических урожаев отдельных лет.

Для идентификации модели для Алтайского края (одновременно для всех зон) в рамках САМ с использованием 19 параметров можно воспользоваться данными за весь используемый период наблюдений 1971–2000 гг. Известно, что основной период межгодовых колебаний среднемесячных температур воздуха и осадков по территории СССР равен четырем годам [8]. Поэтому для корректного определения трендов этих климатических характеристик следует взять расчетный период модели, кратный четырем годам, что позволит исключить влияние их межгодовых колебаний на определяемые значения трендов. По этой же причине расчетный период должен быть кратным среднему 11,5-летнему периоду колебаний солнечной активности, также влияющей на климатические процессы. С учетом сказанного для оценки точности модели динамики агроклиматического потенциала выбраны 12-летние периоды наблюдений за агроценозами, включая среднемноголетние значения месячных температур, осадков и значения урожаев за отдельные годы по каждой из рассматриваемых природно-экономических зон Алтайского края (см. рис. 1).

В данном случае можно выделить 12-летние периоды: 1971–1982, 1979–1990 и 1989–2000 гг. Выделение этих периодов позволяет более подробно оценить многолетние изменения климатических характеристик, а также изменения уровня антропогенно обусловленного плодородия, в том числе из-за радикальной перестройки экономики России в 90-х гг. прошлого столетия. Полученные в результате расчетов тренды представлены в таблице 2. Соответствующее падение агроклиматического потенциала при совокупном влиянии изменений климата и уровня плодородия соста-

Таблица 1

Климатические условия Алтайского края  
в среднем за период 1971–2000 гг.

| Порядковый номер месяца                |       |      |     |      |      |      |      |      |     |      |       |
|--|-------|------|-----|------|------|------|------|------|-----|------|-------|
| 1                                      | 2     | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10  | 11   | 12    |
| Среднемесячные температуры воздуха, °С |       |      |     |      |      |      |      |      |     |      |       |
| -15.3                                  | -14.4 | -8.3 | 4.1 | 12.3 | 17.9 | 19.9 | 17.2 | 11.1 | 3.4 | -6.6 | -12.5 |
| Месячные осадки, мм                    |       |      |     |      |      |      |      |      |     |      |       |
| 24                                     | 21    | 17   | 29  | 46   | 50   | 65   | 51   | 38   | 37  | 35   | 29    |

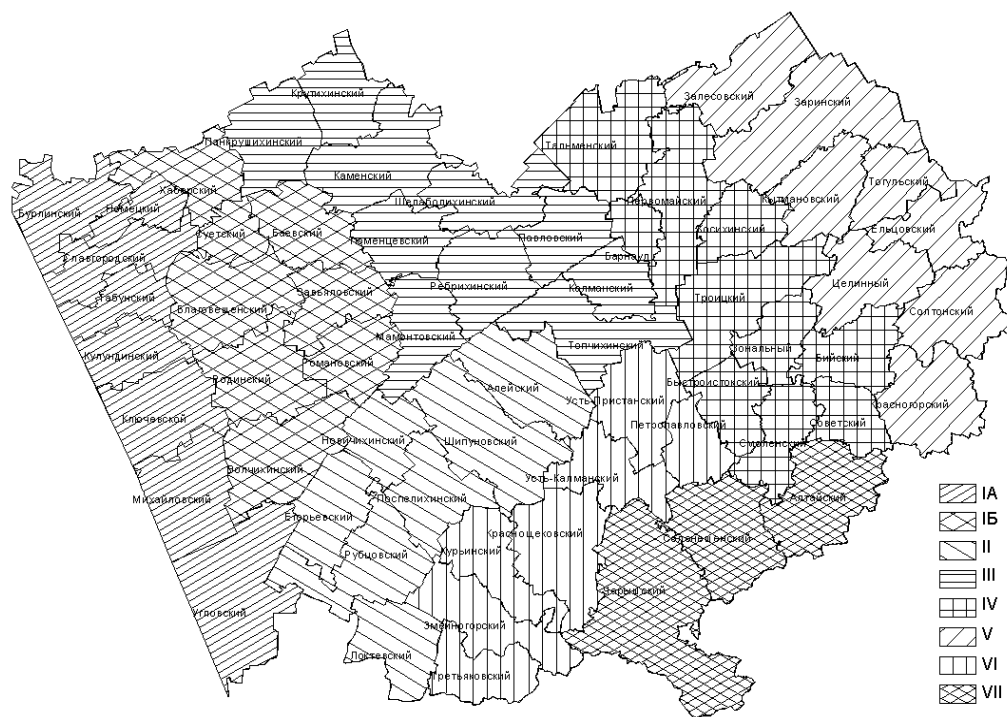


Рис. 1. Природно-экономические зоны Алтайского края [5]:

IA – Западно-Кулундинская подзона; IB – Восточно-Кулундинская подзона; II – Приалейская зона; III – Приобская зона; IV – Бийско-Чумышская зона; V – Присалаирская зона; VI – Приалтайская зона; VII – Алтайская зона. Для характеристики агрометеорологических условий зон используются данные опорных агрометеостанций: Славгород, Угловское (IA); Баево, Волчиха, Родино (IB); Алейск, Рубцовск (II); Камень, Ребриха (III); Барнаул, Бийск (IV); Заринск, Тогул (V); Змеиногорск, Усть-Калманка (VI); Солонешное, Чарышское (VII)

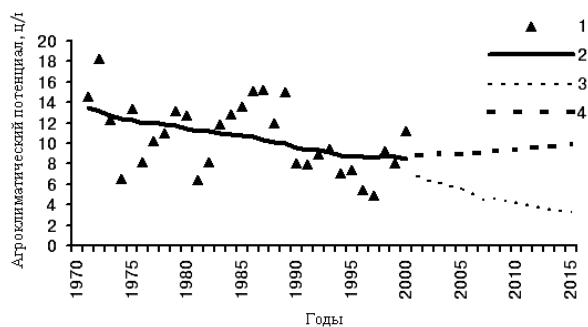


Рис. 2. Динамика агроклиматического потенциала Алтайского края: 1 – фактическая урожайность агроценозов пшеницы за 1971–2000 гг.; 2 – агроклиматический потенциал, рассчитанный в рамках САМ с использованием фактических урожаев за 1971–2000 гг. по всем природно-экономическим зонам (рис. 1); 3, 4 – прогноз агроклиматического потенциала до 2015 г. по 1989–2000 и по 1993–2000 гг. соответственно; кривая 3 отвечает изменению уровня антропогенно обусловленного плодородия на  $-5.7\%$  за год и кривая 4 – на  $+0.2\%$  за год

вило от 13,5 ц/га в 1971 г. до 8,5 ц/га в 2000 г. (рис. 2). Следует указать, что тренды, полученные с помощью модели динамики агрокли-

матического потенциала, отличались от трендов, полученных по климатическим данным отдельных лет за тот же период наблюдений, но уже методами регрессионного анализа, в частности с использованием программы STATISTICA (StatSoft, Inc., USA).

Согласно таблице 2, в 1979–1990 гг., в отличие от остальных, получен положительный тренд уровня антропогенно обусловленного плодородия. Этот результат полностью согласуется с тем, что в этот период возделывание агроценозов пшеницы в Алтайском крае осуществлялось на основе интенсивных технологий, включая внесение большого количества удобрений, насыщенность техникой, использование новых сортов местной селекции и т.д.

Точность расчета урожайности агроценозов пшеницы по модели динамики агроклиматического потенциала для 12-летних периодов – 1971–1982, 1979–1990 и 1989–2000 гг. (табл. 2) составила 28, 25 и 32% соответственно. Эти величины достаточно близки к теоретически наилучшей точности моделей такого класса 24%. Это означает высокую точность оценки трендов климатических характеристик, уровня антропогенно обусловленного плодородия и са-

Таблица 2

Расчет трендов среднемесячных климатических характеристик и уровня антропогенно обусловленного плодородия для Алтайского края за период 1971–2000 гг.

| Расчетный период, годы | Тренд температур <0°C, % за год | Тренд температур ≥0°C, % за год | Тренд осадков, % за год | Тренд уровня плодородия, % за год |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| 1971–2000              | 0.69                            | 0.31                            | 0.78                    | -2.7                              |
| 1971–1982              | 0.65                            | 0.32                            | 0.34                    | -5.4                              |
| 1979–1990              | 0.66                            | 0.47                            | 0.82                    | 0.6                               |
| 1989–2000              | 0.65                            | 0.30                            | 0.81                    | -5.7                              |
| 1993–2000              | 0.65                            | 0.30                            | 0.81                    | 0.2                               |

мого агроклиматического потенциала. В целом некоторое ухудшение точности расчетов относительно 24% связано с использованием для идентификации модели всего лишь 19 из ее 65 параметров. Иначе говоря, точность может быть еще повышена при наличии достаточного количества экспериментальных данных, позволяющих идентифицировать для конкретной территории все параметры модели.

Тренды климатических характеристик обычно имеют глобальный характер. В то же время тренд уровня антропогенно обусловленного плодородия зависит от характера почв, технологий возделывания культур и других факторов. Выполненная в рамках САМ оценка трендов уровня плодородия в 1971–2000 гг. по отдельным природно-экономическим зонам Алтайского края показала, что значения этих трендов для разных зон лежат в пределах от -2,2 до -32% за год.

Таким образом, за последние 30 лет для всех природно-климатических зон Алтайского края наблюдается падение уровня антропогенно обусловленного плодородия и агроклиматического потенциала, идущее на фоне роста температур воздуха теплого периода года и увеличения количества выпадающих осадков (табл. 2). Следует отметить, что эффект такого падения был сглажен достаточно высокими урожаями в 2000 и 2001 гг. из-за удачных погодных условий, сложившихся по России и для Алтайского края, в частности.

**Прогноз трендов температур воздуха, осадков, уровня антропогенно обусловленного плодородия и динамики агроклиматического потенциала в Алтайском крае.** В таблице 2 приведены результаты расчетов для Алтайского края трендов климатических характеристик и уровня антропогенно обусловленного плодородия по трем 12-летним периодам: 1971–1982, 1979–1990 и 1989–2000 гг. Сразу отметим, что средние значения от полученных 12-летних трендов не должны в точности совпадать с трендами для периода 1971–2000 гг. в целом. Это связано с некоторой погрешностью определения 12-летних трендов из-за колебаний метеорологических факторов в отдельные

годы, а также с тем, что отдельные годы периода 1971–2000 гг. учитываются в 12-летних трендах различное число раз. Годы 1979–1982 и 1989–1990 учтены по два раза, а остальные – по одному, чтобы сформировать в имеющемся 30-летнем периоде 1971–2000 гг. три 12-летних.

Алтайский край характеризуется значительными межгодовыми колебаниями климатических факторов. В то же время из таблицы 2 мы видим, что на протяжении всего 30-летнего периода 1971–2000 гг. тренды климатических характеристик достаточно стабильны. Сравнивая средний по положению период с крайними, несложно оценить темпы возможного изменения самих значений трендов на протяжении половины 30-летнего периода, т.е. за 15 лет. Вычтем из значений трендов крайних 12-летних периодов значения трендов среднего 12-летнего и найдем средние от модуля полученных разностей. Эти средние и составят возможную погрешность прогноза трендов соответствующих климатических характеристик на сроки до 15 лет. Согласно таблице 2 погрешность прогноза тренда для температур холодного периода года составит  $\pm(|0,65-0,66|+|0,65-0,66|)/2 = \pm 0,005\%$  за год, для температур теплого периода –  $\pm(|0,32-0,47|+|0,30-0,47|)/2 = \pm 0,16\%$  за год и для осадков –  $\pm(|0,34-0,82|+|0,81-0,82|)/2 = \pm 0,25\%$  за год.

Для прогноза изменений климатических характеристик на следующие 15 лет можно использовать тренды этих характеристик за последний 12-летний период 1989–2000 гг.:

- 0,65% понижения за год для температур воздуха холодного периода года;
- 0,30% повышения за год для температур теплого периода;
- 0,81% повышения за год для осадков.

В то же время агроклиматический потенциал в значительной степени зависит от уровня земледелия. При условии прогрессирующего ухудшения состояния сельского хозяйства Алтайского края можно полагать, что тренд уровня антропогенно обусловленного плодородия в 2001–2015 гг. также будет аналогичен 12-

летнему периоду 1989–2000 гг. и равен соответственно 5,7% за год. При таком значении тренда Алтайский край в ближайшие 15 лет ожидает кризисное снижение агроклиматического потенциала (среднегодовой урожайности) более чем в 2 раза (кривая 3 на рис. 2). Это снижение лишь в незначительной степени компенсируется идущим уже 30 лет улучшением климатических условий в крае.

Известно, что из-за экономических трудностей Алтайский край в начале 90-х гг. прошлого столетия был вынужден отказаться от ранее используемых интенсивных технологий возделывания пшеницы. Это привело к стабильно низкому уровню земледелия в последующие годы. Поэтому для расчета тренда уровня антропогенно обусловленного плодородия, с учетом требования кратности рассматриваемого периода 4 годам, вместо 12-летнего периода 1989–2000 гг. можно также использовать 8-летний 1993–2000 гг. Расчет тренда для этого периода дал значение порядка +0,2% за год. Такое возрастание уровня плодородия, очевидно, может объясняться повышением температур теплого периода года с одновременным ростом увлажненности территории, что обеспечивает более активное усвоение растениями питательных элементов из почв.

При условии, что в 2001–2015 гг. не последует ухудшения экономического состояния края, подобного началу 90-х гг., тренд уровня антропогенно обусловленного плодородия можно считать аналогичным 8-летнему периоду 1993–2000 гг. и равным соответственно 0,2% за год. Расчетные изменения агроклиматического потенциала для этого случая представлены на рисунке 2 (кривая 4). Из второго прогноза следует,

что Алтайский край в ближайшие 15 лет ожидает постепенное повышение агроклиматического потенциала (среднегодовой урожайности), которое обусловлено улучшением климатических условий: повышением температур теплого периода года и сопутствующим увеличением количества осадков в крае.

Таким образом, мы имеем два различающихся прогноза агроклиматического потенциала Алтайского края, отвечающих двум возможным путям развития сельского хозяйства – дальнейшего уменьшения его ресурсных и технологических возможностей (рис. 2, кривая 3) и его стабилизации на современном уровне (рис. 2, кривая 4). При этом влияние на потенциал непосредственно климатических факторов менее значимо по сравнению с изменениями уровня антропогенно обусловленного плодородия. Это позволяет рассматривать разработанную модель динамики агроклиматического потенциала как принципиально новый инструмент для оценки общей эффективности сельскохозяйственного производства края – производство будет эффективным при положительных многолетних трендах уровня плодородия и неэффективным при отрицательных. Тренды уровня плодородия определяются по модели расчетным путем на основании данных об урожайности сельскохозяйственных культур последних лет.

*Авторы выражают благодарность за активное обсуждение результатов проводимых исследований доктору с.-х. наук, профессору Л.М. Бурлаковой (Алтайский государственный аграрный университет) и канд. техн. наук Л.А. Хворовой (Алтайский государственный университет).*

## Литература

1. Кирста Ю.Б. Разработка методов моделирования и прогноза урожайности агроценозов как основы мониторинга агроэкосистем // Экологический анализ региона (теория, методы, практика): Сб. науч. тр. Новосибирск, 2000.
2. Кирста Ю.Б., Белоторонина Т.А. Системно-аналитическое моделирование влагообмена в почвах Сибири // Вестник Алт. гос. аграрного ун-та. 2001. №4.
3. Kirsta Yu.B. Time-dynamic quantization of molecular-genetic, photosynthesis and ecosystem hierarchical levels of the biosphere // Ecol. Modelling. 1992. V. 62.
4. Kirsta, Yu.B. Exchange of information in natural hierarchical systems // Ecological Modelling, 1994. V. 73.
5. Kirsta Yu.B. Information-hierarchical organization of biosphere and problems of its sustainable development // Ecological Modelling. 2001. V. 145.
6. Kirsta Yu.B., Tarabrin V.A. Real biological time and its calculation in wheat // Ecological Modelling. 1994. V. 71.
7. Российский статистический ежегодник: Стат. сб./ Госкомстат России. М., 1998.
8. Система земледелия в Алтайском крае / Под ред. Н.В. Яшутина. Новосибирск, 1981.
9. Федоров В.М. Статистические оценки межгодовых колебаний климата // Вестник Московского ун-та. Сер. 5: География. 2001. №1.
9. Горяев В.Е. Гидродинамические режимы сезонной миграции почвенной влаги в степной Кулунде // Гидрогеолого-мелиоративные исследования в Западной Сибири: Сб. ст. Красноярск, 1986.