

УДК 519.237.7:631.53.04
ББК 22.183.5

П.Г. Асалханов
Я.М. Иваньо
Н.И. Федурина

ФАКТОРНЫЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДАТЫ ПОСЕВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Рассмотрено прогнозирование сроков посева сельскохозяйственных культур на основе однофакторных и многофакторных линейных и нелинейных регрессионных моделей зависимости дат прогрева почвы от сумм температур и осадков за предшествующие периоды. Рекомендованы различные виды этих моделей для разных природно-климатических зон Иркутской области. При моделировании учитываются тенденции устойчивого и неустойчивого прогрева почвы. На основе систематизации данных о датах посева и климатических факторов, и созданных моделей разработан программный комплекс прогнозирования сроков посева с использованием геоинформационных систем и информационных систем растениеводства.

Ключевые слова: регрессионный анализ; прогнозирование; дата посева; сельскохозяйственная культура.

P.G. Asalkhanov
Ya.M. Ivaniyo
N.I. Fedurina

FACTOR MODELS OF FORECASTING THE DATE OF DROPPING CROPS

The article deals with forecasting the date of dropping crops based on mono- and multi-factor linear and non-linear models of dependence of the dates of soils warming on the total of temperatures and precipitation in the previous period. The authors recommend these various models for various physical and climatic zones of Irkutsk region. The modeling takes into account the tendencies of stable and unstable soils warming. Basing on the systematized data on the dates of dropping, climatic factors and the worked-out models the authors have developed a software complex for forecasting the dates of dropping using geo-informational systems and information systems of crop science.

Keywords: regression analysis; forecasting; dropping date; crop.

Выявление обоснованных сроков посева сельскохозяйственных культур — одна из приоритетных задач в планировании производства продукции растениеводства. На рост и развитие сельскохозяйственных культур значительное влияние оказывает температурный режим периода вегетации, особенно на начальной стадии — прорастание семян. При посеве почва на глубине заделки семян (обычно 5 см) должна быть достаточно прогретой. При этом посев рекомендуется производить, когда температура почвы t_s на этой глубине достигнет некоторого значения t_d . Для зерновых в Иркутской области t_d колеблется от 6 до 12°C в зависимости от климатической зоны [4].

Существующие рекомендации по срокам посева культур основываются на средних многолетних метеорологических данных, с учетом которых определяют примерный календарный срок. Поскольку погодные

условия сезонов по годам бывают различными, ориентация на средние календарные сроки посева приводит к отрицательным конечным результатам. Между тем своевременный посев сельскохозяйственной культуры — один из основных аспектов получения высокой урожайности. Исследования показывают, что при правильном посеве уменьшается риск снижения урожая [2].

Динамика прогрева почвы весной (апрель–май) для некоторой зоны региона по разным годам неодинакова (рис. 1). На рис. 1 показаны две ситуации прогрева почвы: с наличием значимого однонаправленного тренда (устойчивый прогрев) и его отсутствием (резкие колебания t_s). В первом случае определение даты прогрева не вызывает таких затруднений, как во втором. Между тем следует помнить, что в реальных условиях неизвестно изменение температуры почвы в будущем. Здесь можно ориентироваться на прогностические значения, оправдываемость которых отличается невысокой точностью.

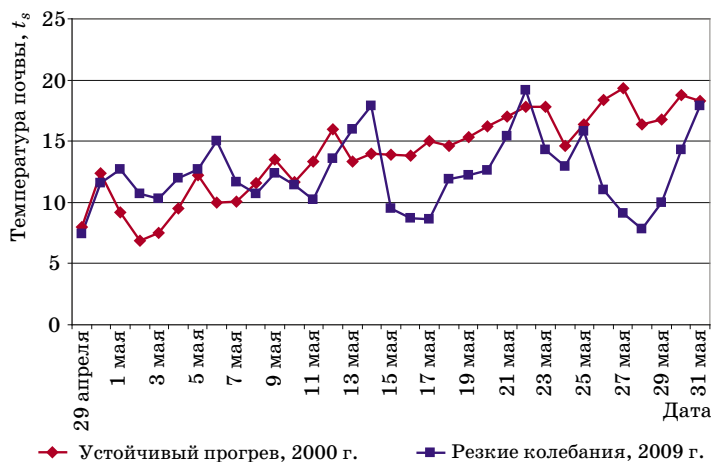


Рис. 1. Тенденции прогрева почвы по данным Иркутска

На развитие большинства культур губительное действие оказывают отрицательные и низкие положительные температуры почвы ($2-4^{\circ}\text{C}$), существенно снижая интенсивность дыхания и продуктивность растений, особенно в период всходов. Поэтому посев следует осуществлять в такие сроки, в которых маловероятна опасность заморозков и низких положительных температур [4].

Обычно зерновые рекомендуют высевать, при прогревании почвы на глубине 5 см до $8-10^{\circ}\text{C}$. При этом дату посева T_i целесообразно устанавливать, когда эта температура достигнет значения t_d и не будет уменьшаться в дальнейшем (устойчивый прогрев).

Одним из способов прогнозирования температуры почвы является использование автокорреляционных связей, имеющих место в рядах ежедневной температуры почв. На рис. 2 показаны различные коррелограммы по данным Иркутска за многолетний период: усредненная, убывающая и волнообразная.

Наибольшими значениями обладают первые коэффициенты автокорреляционной функции, однако, их точность не всегда позволяет создавать качественные авторегрессионные модели для прогнозирования температуры почвы даже с упреждением в одни сутки. Тем не менее, такой подход применим для уточнения прогноза осуществляемого с помощью других методов.

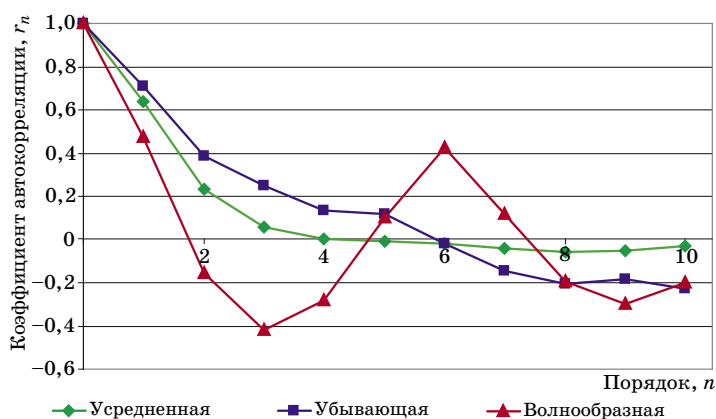


Рис. 2. Коррелограммы рядов температур прогрева почвы по Иркутску за 1989–2011 гг.

Как известно, температура почвы связана с температурой воздуха. Так, по данным Иркутска за 1989–2011 гг. коэффициенты корреляции среднесуточных температур воздуха и температур почвы на глубине 5 см составляли от 0,87 до 0,98, в зависимости от года. При этом наблюдается некоторое запаздывание прогрева почвы относительно накопленного тепла, описываемого с помощью температуры воздуха. В дополнение к этому на температуру почвы могут оказывать влияние осадки.

В работе [1] показано, что температура почвы зависит от предшествующих накопленных температур и осадков. При этом факторы могут по-разному влиять на результирующий признак в зависимости от природно-климатической зоны. На основании пространственно-временного анализа многолетних метеорологических данных различных почвенно-климатических зон Иркутской области выявлено, что на дату устойчивого прогрева почвы до температуры t_d наибольшее влияние оказывают суммы предшествующих температур воздуха. Кроме того, для северных районов, помимо этого параметра, имеет значение фактор — сумма предшествующих осадков.

В работе [1] предложен метод нахождения сроков посева сельскохозяйственных культур на основе многофакторных регрессионных линейных и нелинейных уравнений, характеризующих зависимости рекомендуемых дат посева (T_i) от сумм среднесуточных температур воздуха (x_1) и сумм осадков (x_2) за некоторые предшествующие периоды $k = T_y - T_0$, где T_0 — начало, а T_y — окончание периода.

Для построения регрессионных моделей использованы агрометеорологические данные за многолетний период трех районов Иркутской области, расположенных в разных агроландшафтных районах, в которых развито зерновое производство: Иркутского, Усольского и Тулунского. В качестве результирующего признака (y) предложена относительная дата прогрева почвы до рекомендуемой температуры (t_d), представляющая собой разность между ежегодной датой прогрева почвы T_i и датой на 5 дней предшествующей самой ранней дате T_l за многолетний период (T_n).

На рис. 3 показаны расчетные даты и периоды, по которым суммируются температуры и осадки. Параметр l представляет собой заблаговременность (количество дней от окончания периода оценки до рекомендуемой даты посева). В качестве начала периода суммирования параметров тепла и увлажнения (k) применяется дата перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C , усредненная за многолетний период (T_0). Рас-

считаются разные продолжительности этого периода — от 7 до 20 суток и более. В день окончания периода (T_y) и при наличии данных о сумме температур и осадков возможен расчет даты посева (T_i) на текущий год.

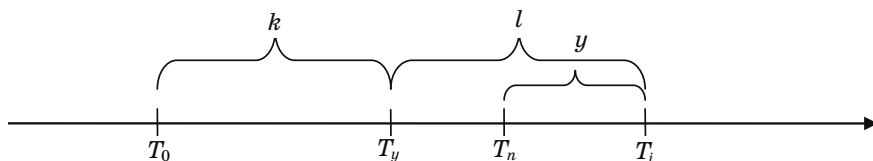


Рис. 3. Схема расположения расчетных дат и периодов на оси времени

При вычислении даты посева применительно к аграрному предприятию на текущий год задача сводится к выбору такого периода суммирования параметров k , при котором уравнение регрессии значимо, адекватно, имеет высокую точность и достаточную заблаговременность прогноза l . При увеличении периода k возможно повышение точности уравнений в ущерб заблаговременности прогноза. Однако не всегда уравнения с большей продолжительностью этого периода точнее.

Точность прогностических дат посева зависит от качества регрессионных моделей. Проверка значимости полученных регрессионных моделей и их коэффициентов осуществлялась с помощью F и t -критериев. Адекватность оценивалась с помощью анализа остатков ряда регрессии. Отсутствие автокорреляции в остатках проверялось с использованием первого коэффициента автокорреляции и теста Дарбина-Уотсона. Независимость остатков от значений факторов выявлялась с помощью теста Голдфелда-Квандта. Точность уравнений оценивалась с помощью коэффициента детерминации и средней относительной ошибки [3].

На основе полученных результатов для рассмотренных природно-климатических территорий рекомендованы различные виды уравнений регрессии. Для Иркутского муниципального района применимы однофакторные полиномиальные модели, для Усольского — однофакторные линейные, а для Тулунского — двухфакторные полиномиальные, в которых помимо суммы температур воздуха (x_1) используются суммы осадков (x_2) (табл. 1). К этому следует добавить, что для исключения отрицательных значений x_1 , которое необходимо для расчета нелинейных функций, суммы температур взяты по шкале Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$). Приведенные уравнения адекватны, значимы и могут использоваться для прогнозирования сроков посева. Вместе с тем следует отметить, что многолетние ряды температур почвы имеют лакуны, что сказывается на точности или качестве модели. В дополнении к сказанному на качество моделей влияет значение рекомендуемой температуры t_d . Анализ влияния факторов на результативный признак в зависимости от параметра t_d показал, что для Иркутского района уравнения регрессии обладают наибольшей точностью, если в качестве рекомендуемой температуры для посева t_d использовать значение 10°C , для Усольского — 8°C , а для Тулунского — 6°C .

Для прогнозирования сроков технологических операций наряду с фактическими данными применимы краткосрочные прогнозные значения температур и осадков. В этом случае достоверность полученных результатов зависит от точности прогнозирования параметров тепла и увлажнения. Так, например, используя прогнозные данные на несколько дней вперед, увеличивается заблаговременность прогноза l в ущерб его точности. Тем не менее, подобный подход позволяет получить дополнительную информацию о рекомендуемой дате посева для сравнения с другими предложенными алгоритмами.

Таблица 1

Оценка точности регрессионных уравнений для Иркутской области

Параметры	Муниципальные районы		
	Иркутский	Усольский	Тулунский
Уравнение регрессии	$y = -0,00018x_1^2 + 0,21x_1 - 29,7$	$y = 0,071x_1 + 66,4$	$y = -1,05x_1^2 - 0,096x_2^2 + 0,00072x_1 + 0,0027x_2 + 386$
Рекомендуемая температура t_d	10°C	8°C	6°C
Многолетний период	1989–2009 гг.	1987–2010 гг.	1987–2008 гг.
Период суммирования параметров	1–19 апреля	1–21 апреля	11–30 апреля
Коэффициент детерминации	0,81	0,81	0,80
Стандартная ошибка аппроксимации	2,5	2,3	1,3
Средняя относительная погрешность, %	14,1	13,2	15,3

Помимо оценки качества модели определялась точность ретроспективного прогноза. Для этого по данным предшествующих лет рассматривались прогностические даты посева, которые сравнивались с фактическими данными. Сравнительный анализ прогнозов и реальных дат приведен в табл. 2. В расчетах использовались рекомендуемые для каждого района виды уравнений регрессии, приведенные в табл. 1.

Таблица 2

Оценка точности ретроспективного прогноза регрессионных уравнений для Иркутской области

Параметры	Муниципальные районы		
	Иркутский	Усольский	Тулунский
Рекомендуемая температура t_d	10°C	8°C	6°C
Многолетний период	1989–2009	1987–2010	1987–2008
Прогнозируемые годы	1997–2012	1997–2012	2000–2009
Количество прогнозируемых лет	14	6	5
Стандартная ошибка, суток	3,7	5,3	3,0
Средняя относительная погрешность, %	12,3	16,1	9,9

По данным табл. 2 можно сделать вывод об удовлетворительной точности ретроспективных прогнозов для всех трех территорий. Наихудшие результаты получены для Усольского района, что обусловлено отсутствием данных за 8 лет.

Поскольку процесс накопления температуры в почве происходит по-разному в зависимости от особенностей притока тепла в воздухе, сделана попытка рассмотреть два вида зависимости: при устойчивом прогреве и резких колебаниях.

Расчеты выполнены по многолетним рядам Иркутского района, характеризующего наибольшей продолжительностью и непрерывностью (табл. 3). Согласно данным уравнения регрессии для лет с устойчивым прогревом почвы лучше отражают реальные условия по сравнению с моделями, отражающими неустойчивый прогрев. Поэтому при прогнозировании дат посева необходимо учитывать тенденции изменения предшествующих температур воздуха в текущем году. Использование дифференциального подхода к построению моделей прогнозирования

параметра u позволяет повысить надежность результатов, а с другой стороны, предполагает наличие продолжительной многолетней выборки температуры воздуха и почвы. Именно поэтому использование устойчивой и неустойчивой тенденций колебания температуры затруднительно, в частности, для Усольского и Тулунского районов.

Таблица 3

**Оценка точности регрессионных уравнений
для разных типов прогрева почвы по данным Иркутского района**

Параметры	Весь период (1987–2011 гг.)	Годы с устойчивым прогревом	Годы с колебанием температуры почвы
Уравнение регрессии	$y = -0,00018x_1^2 + 0,21x_1 - 29,7$	$y = -0,00024x_1^2 + 0,25x_1 - 41,9$	$y = -0,00016x_1^2 + 0,15x_1 - 10,8$
Коэффициент детерминации	0,81	0,83	0,77
Стандартная ошибка аппроксимации	2,5	2,3	2,1
Средняя относительная погрешность, %	14,1	16,1	12,0

Полученные модели и прогнозы позволили разработать программный комплекс прогнозирования сроков посева. В этот комплекс входит база данных, включающая агроклиматические сведения: суточные средние температуры воздуха и осадки, температуры почвы на глубине 5 см и другие. Основным источником данных являются пункты наблюдений гидрометеорологических станций региона. Между тем простота получения информации позволяет использовать данные сельскохозяйственных предприятий о температуре воздуха, почвы и осадка. Кроме того, в качестве дополнительной информации возможно использование прогностических данных о температуре.

На рис. 4 показано функционирование программного комплекса и его взаимодействие с другими комплексами.



Рис. 4. Схема функционирования программного комплекса прогнозирования сроков посева

Система предназначена для использования на средних и крупных аграрных предприятиях Иркутской области расположенных в разных

природно-экономических зонах. Основными пользователями системы являются агроном и экономист. Полученные результаты расчета рекомендуемых дат можно использовать в других программных комплексах: АСУ «Хозяйство» для расчета технологических карт и ГИС-системах для получения карты пространственного распределения прогностических дат посева. Использование этого программного комплекса на предприятиях растениеводческой отрасли позволяет повысить эффективность планирования производства.

Список использованной литературы

1. Асалханов П.Г. О некоторых алгоритмах прогнозирования дат технологических операций возделывания зерновых культур / П.Г. Асалханов, Я.М. Иванов // Вестник Иркутской государственной сельскохозяйственной академии. — 2011. — Вып. 47. — С. 116–121.
2. Белозоров А.Т. Сроки и способы посева зерновых культур / А.Т. Белозоров. — Иркутск: Союзполиграфпром, 1949. — 40 с.
3. Орлова И.В. Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование: учеб. пособие / И.В. Орлова, В.А. Половников. — М.: Вуз. учеб., 2008. — 365 с.
4. Хуснидинов Ш.К. Растениеводство Предбайкалья: учеб. пособие / Ш.К. Хуснидинов. — Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2000. — 462 с.

References

1. Asalkhanov P.G. O nekotorykh algoritmakh prognozirovaniya dat tekhnologicheskikh operatsii vozdelvaniya zernovykh kul'tur / P.G. Asalkhanov, Ya.M. Ivan'o // Vestnik Irkutskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii. — 2011. — Vyp. 47. — S. 116–121.
2. Belozorov A.T. Sroki i sposoby poseva zernovykh kul'tur / A.T. Belozorov. — Irkutsk: Soyuzpoligrafprom, 1949. — 40 s.
3. Orlova I.V. Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli: komp'yuternoe modelirovanie: ucheb. posobie / I.V. Orlova, V.A. Polovnikov. — M.: Vuz. ucheb., 2008. — 365 s.
4. Khusnidinov Sh.K. Rastenievodstvo Predbaikal'ya: ucheb. posobie / Sh.K. Khusnidinov. — Irkutsk: Izd-vo IrGSKhA, 2000. — 462 s.

Информация об авторах

Асалханов Петр Георгиевич — старший преподаватель, кафедра информатики и математического моделирования, Иркутская государственная сельскохозяйственная академия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный, e-mail: asalkhanov@mail.ru.

Иванов Ярослав Михайлович — доктор технических наук, профессор, кафедра информатики и математического моделирования, Иркутская государственная сельскохозяйственная академия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный, e-mail: iymex@rambler.ru.

Федурин Нина Ивановна — кандидат технических наук, доцент, кафедра информатики и математического моделирования, Иркутская государственная сельскохозяйственная академия, Иркутская обл., Иркутский р-он, п. Молодежный, e-mail: fedurina_n@mail.ru.

Authors

Asalkhanov Petr Georgievich — Senior Instructor, Chair of Information Systems and Mathematical Simulation, Irkutsk State Agricultural Academy, Irkutsk, e-mail: asalkhanov@mail.ru.

Ivaniyo Yaroslav Mikhailovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Chair of Information Systems and Mathematical Simulation, Irkutsk State Agricultural Academy, Irkutsk, e-mail: iymex@rambler.ru.

Fedurina Nina Ivanovna — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Information Systems and Mathematical Simulation, Irkutsk State Agricultural Academy, Irkutsk, e-mail: fedurina_n@mail.ru.