

=====
УДК 631.171+631.95

**Проактивное управление в компьютерных системах поддержки
агротехнологических решений на примере управления азотными
подкормками**

Топаж А.Г., Медведев С.А., Захарова Е.Т.

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»

Аннотация

Приводится описание предложенной авторами методики проактивного (основанного на оперативно уточняющемся модельном прогнозе) управления продукционным процессом сельскохозяйственных растений. На примере технологии азотных подкормок «по листу» проведено сравнение проактивного управления с традиционными подходами декларативного и реактивного управления. В качестве опорных данных для компьютерных экспериментов выбраны варианты возделывания посевов яровой пшеницы на тестовых полях Меньковского филиала АФИ в 2006-2013 годах.

Ключевые слова: ПРОАКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АГРОЭКОСИСТЕМЫ, МНОГОФАКТОРНЫЙ КОМПЬЮТЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ПОЛИВАРИАНТНЫЙ АНАЛИЗ, ГЕНЕРАТОР ПОГОДЫ, ДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ

Введение

Имитационное моделирование продукционного процесса посевов сельскохозяйственных культур уже давно оформилось в виде самостоятельной научной дисциплины со своей методологией и сферой применения. В классических трудах, например, в [1], выделяется несколько характерных задач, для решения которых могут и должны использоваться динамические модели продуктивности. Наряду с решением теоретических проблем агроэкологии, селекции и даже сельскохозяйственной генетики [2], а также использованием моделей в учебном процессе как виртуальных тренажеров важным направлением развития моделей является их использование в качестве

интеллектуального ядра систем поддержки решений в реальной практике растениеводства [3-5]. Самой востребованной задачей в этой сфере является поиск оптимального управления агроэкосистемой.

Все модели продукционного процесса подразделяются на регрессионные и механистические [6]. Регрессионные модели строятся непосредственно по данным наблюдений и экспериментов и позволяют решать задачи поддержки принятия решений в сельском хозяйстве путём интерполяции. Однако для поиска оптимального управления этого может оказаться недостаточно, потому что оптимальное управление потенциально может выходить за рамки рассматриваемых при составлении регрессионных моделей воздействий на агроэкосистему. Поэтому для поиска оптимального управления более эффективны механистические модели, которые свободны от этого недостатка. Они позволяют не только интерполировать наблюдаемые закономерности, но и экстраполировать их с помощью заложенных в них уравнений реальных процессов, протекающих в агроэкосистеме. Но для своей работы такие модели требуют суточных погодных метеоданных за весь вегетационный период. Это является серьезным препятствием для их широкого внедрения в реальную сельскохозяйственную практику. Действительно, поддержку принятия решений необходимо осуществлять непосредственно в течение текущего вегетационного сезона, в то время как актуальные погодные метеоданные как входной сигнал модельных расчетов, естественно, известны только по настоящий момент. А синоптические прогнозы обладают достаточной точностью только на несколько дней вперед. На сегодняшний день единственное принципиальное решение этой проблемы состоит в том, чтобы по заранее определенным интегральным характеристикам климата в данной местности с помощью метода Монте-Карло получать неограниченное количество «синтетических» погодных реализаций [7-9] и статистически обрабатывать результаты модельных расчётов, полученные на основе этих данных.

Постановка задачи

Будем формально рассматривать математическую модель агроэкосистемы как многомерную дискретную систему управления:

$$\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k), \mathbf{a}, \mathbf{w}(k), \mathbf{u}(k)), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad k=0, 1, \dots, T,$$

где: \mathbf{x} – вектор динамических переменных состояния исследуемого объекта;

\mathbf{a} – вектор постоянных параметров; \mathbf{u} – вектор контролируемых внешних воздействий (агротехника);

w – вектор неконтролируемых внешних воздействий (погода); k – временной шаг модели (принимаемый в большинстве динамических моделей равным одним суткам),

f – эволюционный оператор, составляющий логическую суть имитационного алгоритма [1].

Тогда поиск управляющих воздействий, направленных на достижение максимальной эффективности функционирования системы в условиях неопределенности, сводится к нахождению зависимости изменения во времени управляющих воздействий u , причем для нахождения и формализации этого оптимального управления могут использоваться принципиально различные методологические подходы.

1. Декларативное управление. В этом случае закон управления представляет собой явно заданную функцию от времени $u = u(k)$. Для рассматриваемой предметной области это означает, что и сроки, и дозы технологических воздействий жестко задаются лицом, принимающим решения, заранее (до момента сева) и не могут изменяться в ходе вегетационного периода. Подобный вид управления характерен для регламентированных региональных систем земледелия и, как правило, обладает низкой эффективностью из-за невозможности адекватной адаптации к складывающейся метеорологической и/или экологической ситуации для конкретного поля и конкретного года.

2. Реактивное управление, или управление с обратной связью. В этом случае закон управления представляет собой функцию от текущего состояния объекта управления и, возможно, от времени: $u = u(x(k), k)$. Иными словами, сроки и дозы технологических воздействий заранее неизвестны, вместо них описывается закон задания управления в зависимости от тех или иных измеряемых характеристик агроэкосистемы. Например: «поливать следует при достижении влажностью почвы величины ниже 60% полевой влагоемкости с нормой полива, позволяющей достичь ее уровня». Ясно, что задание закона управления в подобной форме способно обеспечить достаточно эффективную эксплуатацию агроэкосистемы. Однако принципиальным моментом является то, что вид закона управления в этом случае также задается заранее.

3. Проактивное управление. Коренным отличием данного подхода от перечисленных выше выступает тот факт, что ни управление в явном виде, ни закон его синтеза не задаются заранее, то есть ни жесткая, ни гибкая (основанная на обратной связи) функция управления до начала опыта вообще не определяется. Вместо этого она вычисляется оперативно на основании модельного прогноза будущей динамики

управляемого объекта при различных вариантах текущего воздействия. Для рассматриваемой проблемы это означает, что в качестве ещё не известных суточных погодных метеоданных будущего отрезка вегетационного периода используется множество сценариев возможного развития, а решение о применении или неприменении той или иной технологической операции принимается непосредственно в ходе вегетационного периода. И соответствующий вывод базируется на анализе результатов многофакторного компьютерного эксперимента с моделью [10] по перебору множества альтернативных вариантов технологии на представительной выборке погодных условий на оставшемся «будущем» участке сезона вегетации. Формально можно записать, что в этом случае правило задания закона управления формулируется в виде: $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x}(k), k, \Omega^w_i; i=k+1 \dots T)$, где $\Omega^w_i; i=k+1 \dots T$ – генеральная совокупность вероятностного распределения неконтролируемых внешних воздействий (погоды) в будущем.

В то время как основной недостаток декларативного управления, его принципиально невысокая эффективность, понятен, недостатки реактивного управления менее очевидны. Они связаны с тем, что далеко не для всех видов агротехнических воздействий легко формально описать необходимую для этого вида управления обратную связь. Например, в случае ирригации несложно указать естественную «контрольную переменную состояния», которая способна быть однозначным индикатором водного стресса и, соответственно, использоваться в функции закона управления поливами. Аналогично, в случае с определением даты уборки реактивное управление с обратной связью вида «убирай по достижении полной спелости» является даже более естественным и часто употребительным правилом, нежели ее назначение в явном виде. Но в случае управления азотным режимом подобный однозначный индикатор, доступный в то же самое время прямому измерению в полевых условиях, указать гораздо сложнее. Поэтому для составления оптимального расписания азотных подкормок в течение сезона вегетации крайне привлекательной выглядит предложенная концепция проактивного управления. Действительно, в этом случае поиск эффективной даты и нормы воздействия не требует никаких гипотез о возможной или допустимой форме закона управления.

В свою очередь, основным априорным недостатком проактивного управления является то, что оно подразумевает большое количество компьютерных вычислений. Время, необходимое для анализа последствий множества будущих возможных реализаций окружающих условий с одновременным перебором множества исследуемых вариантов

воздействия, может оказаться довольно существенным (вплоть до нескольких часов). Однако даже такой значительный временной промежуток, необходимый для получения закона управления, оказывается некритичным, так как динамика онтогенеза растений измеряется днями, и возможная задержка в применении тех или иных агротехнологических мероприятий на один день не может, как правило, оказать существенного влияния на ожидаемые последствия. Поэтому именно в сельскохозяйственном производстве использование проактивного управления представляется наиболее целесообразным и эффективным.

Материалы и методы

Ниже в статье описывается методика поиска даты единственной азотной подкормки «по листу» с заранее заданной нормой. Иными словами, предполагается, что в ходе предшествующих вычислительных экспериментов или путем экспертных оценок уже определена экономически и агрономически эффективная норма единственной подкормки, и задача сводится к нахождению оптимального для данных условий момента ее проведения. Для осуществления проактивного управления производственным посевом предлагается использовать разработанный в лаборатории математического моделирования агроэкосистем АФИ распределённый измерительно-моделирующий комплекс для оперативного сопровождения полевого опыта [11]. Он включает в себя автоматическую метеостанцию, систему поливариантного расчёта АРЕХ [12], стохастический генератор суточных погодных метеоданных, базу данных фактической погоды и модель производственного процесса AGROTOOL (рис. 1).

Сценарий действий пользователя, осуществляющего проактивное управление агротехническими мероприятиями, выглядит следующим образом. В системе АРЕХ создаётся проект многофакторного компьютерного эксперимента, исходные данные которого соответствуют сведениям о текущем вегетационном периоде. В этом проекте реальная погода, известная на момент создания проекта, «размножена» таким образом, что все сценарии образуют веер возможных будущих реализаций погодных условий, полученный с помощью генератора погоды. Каждый день, начиная со старта расчёта, пользователь выполняет виртуальную процедуру оперативного сопровождения, пополняя суточные погодные метеоданные актуальными значениями, после чего проект просчитывается дважды с разными значениями даты внесения подкормки: «на сегодня» и

«на завтра». Для каждого из этих двух последовательных прогонов проекта выполняется однофакторный анализ результатов и рассчитывается средний урожай по всем погодным реализациям. Если прогнозируемый конечный урожай для случая подкормки, осуществляемой «сегодня», оказывается выше, чем для случая подкормки, осуществляемой «завтра», на этом поиск проактивного управления заканчивается, и текущая «сегодняшняя» дата подкормки назначается искомой оптимальной датой. В противном случае (то есть если модельные расчёты показывают, что подкормку лучше произвести «завтра») необходимо повторить все описанные действия на следующий день. То есть предложенная методика «скользящего» расчета соседних дат для поиска проактивного управления исходит из неявного предположения о том, что для каждого сценария погоды существует единственный пик максимума в гипотетической зависимости конечной урожайности от даты подкормки.

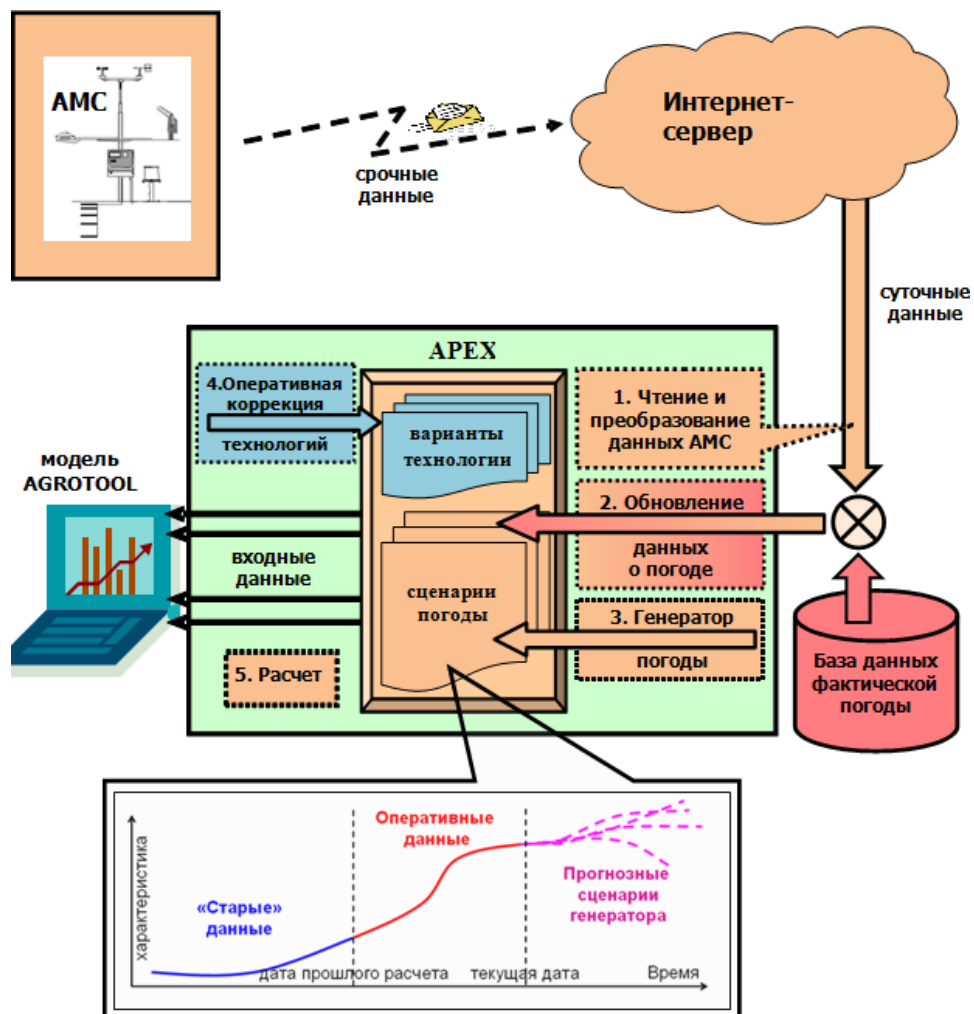


Рис. 1. Схема работы распределённого измерительно-моделирующего комплекса

Для демонстрации принципиальных возможностей описанной методики коллективом лаборатории математического моделирования агроэкосистем АФИ была спланирована и осуществлена серия компьютерных экспериментов по оценке сравнительной эффективности различных стратегий поддержки управленческих решений в растениеводстве на примере азотных подкормок. В рамках этой упрощенной постановки были исследованы все три перечисленных выше подхода к синтезу оптимального управления (реактивный, декларативный и проактивный).

Для поиска гипотетического **оптимального декларативного управления** был проведён одиночный вычислительный компьютерный эксперимент по следующей схеме. В качестве опорных уровней влияющих факторов были выбраны 8 лет (2006-2013) фактических реализаций суточных погодных метеоданных в Меньково (они интерпретировались как повторности при статистической обработке данных компьютерного эксперимента), одна культура яровой пшеницы (сорт Дарья) и почвенные параметры, соответствующие характеристикам конкретного поля Меньковского филиала АФИ. В качестве базовой технологии возделывания были взяты алгоритм автоматического назначения даты сева [13], отсутствие предпосевного внесения удобрений и одна подкормка азотными удобрениями «по листу» в течение сезона вегетации с дозой 30 кг действующего вещества на гектар. Дата осуществления этой единственной подкормки варьировалась в период с 1 мая по 15 августа с инкрементом в 2 дня. Таким образом, проект вычислительного компьютерного эксперимента включал в себя 288 сценариев (8 лет * 36 градаций даты подкормки). После выполнения модельных расчётов с использованием инструмента однофакторного анализа в системе APXH были проанализированы усреднённые по всем годам урожаи в разрезе градаций даты подкормки и выбрана эффективная декларативная дата, дающая наибольший средний выигрыш по всем годам. Для оценки эффективности этого метода оптимального управления использовалась расчетная величина урожая, полученная в том же самом вычислительном компьютерном эксперименте.

Для нахождения **оптимального реактивного управления** было проведено три альтернативных вычислительных компьютерных эксперимента. Все входные данные в этих экспериментах были аналогичны тем, которые использовались при исследовании декларативного управления, кроме сведений о технологиях возделывания. Использованная в данных исследованиях специально доработанная модификация версии

3.5 модели AGROTOOL позволила реализовать в алгоритме имитации продукционного процесса несколько видов реактивного управления азотными подкормками. Соответствующие алгоритмы принципиально отличались друг от друга выбором сигнальной переменной состояния, то есть той характеристики посева, достижение критического уровня которой служило триггером необходимости осуществления подкормки. Были проанализированы следующие стратегии:

- разовое осуществление подкормки фиксированной дозы в момент достижения заданного порогового значения физиологического времени (количественная мера текущей фазы развития с опорными значениями: 0 – всходы, 1 – переход на генеративную стадию развития, 2 – полная спелость); объект оптимизации в данном случае – назначаемая величина порога;
- разовое осуществление подкормки фиксированной дозы в момент падения общего содержания минерального азота в метровом слое почвы ниже заданного порогового значения; объект оптимизации в данном случае – назначаемая величина критического уровня азота;
- подкормка производится в момент, когда внутреннее состояние растения «сигнализирует» о наличии азотного стресса; в качестве показателя этого стресса выбиралось содержание запасного неструктурного углерода (крахмала) в тканях растения [14]; таким образом, подкормка фиксированной дозы назначалась в момент превышения модельной концентрацией крахмала заданного порогового значения; объект оптимизации в данном случае – назначаемая величина критической концентрации крахмала.

Как и в случае с декларативным управлением, каждый вычислительный компьютерный эксперимент по нахождению оптимальной стратегии реактивного управления включал в себя 8 погодных сценариев и несколько десятков градаций исследуемого порогового значения (например, 41 градация порога физиологического времени для исследования реактивного управления по первому варианту). После выполнения модельных расчётов обработка результатов производилась аналогично тому, как делалось в эксперименте с поиском оптимального декларативного управления азотными подкормками. Для каждого эксперимента с помощью встроенного в систему АРЕХ инструмента однофакторного анализа искалась оптимальная величина показателя, используемого для осуществления обратной связи. Урожай, соответствующий этой величине, рассматривался для оценки эффективности метода.

Исследование эффективности гипотетического проактивного управления потребовало выполнения уже целой серии взаимосвязанных компьютерных экспериментов, где использовался инструмент оперативного сопровождения полевого опыта, включенный в систему APЕХ.

Общая схема исследований включала в себя два этапа. На первом этапе с помощью вспомогательной программы эмулировались действия виртуального пользователя, который в течение каждого из 8 реальных лет, рассматриваемых в вычислительных компьютерных экспериментах, осуществлял описанное выше проактивное управление, прогнозируя погоду оставшейся части вегетационного периода с использованием генератора стохастических погодных реализаций. При этом для осуществления статистически достоверного управления модельные расчёты проводились на веере из 20 погодных реализаций. В ходе этих экспериментов для каждого из восьми рассматриваемых лет находилась своя оптимальная дата подкормки. На втором этапе проводился простой финальный расчетный компьютерный эксперимент, в котором в качестве дат подкормки для каждого из 8 лет была указана найденная для этого года квазиоптимальная дата. После этого с помощью инструмента однофакторного анализа вычислялся средний урожай, по которому оценивалась эффективность методики проактивного управления в сравнении с ранее проанализированными способами поиска декларативного и реактивного управления.

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов по определению наилучшей даты декларативно назначаемой подкормки представлены на рис. 2А. Из приведенных графиков видно, что некоторые зависимости «дата подкормки – конечный урожай» для разных опорных реализаций погоды имеют достаточно нерегулярный характер и содержат несколько локальных максимумов, хаотично разбросанных по временной шкале. Таким образом, сделанное предположение о том, что используемый алгоритм поиска проактивного управления (выбор самой ранней даты, оказавшейся лучше следующей за ней) позволит найти наилучший режим управления, оказывается весьма спорным. Однако можно заметить, что точка абсолютного максимума урожайности для всех модельных реализаций приходится на подкормку, осуществляемую во второй половине вегетационного сезона, а именно в период с 30 июня по 30 июля. Более того, этот максимум имеет вид достаточно четко

выраженного изолированного пика. Таким образом, соответствующее априорное ограничение временного интервала в предложенной процедуре поиска проактивного управления (осуществление процедур тестовых прогонов модели в режиме оперативного сопровождения, начиная только с момента фазы цветения) может позволить «поймать» искомый оптимальный момент подкормки.

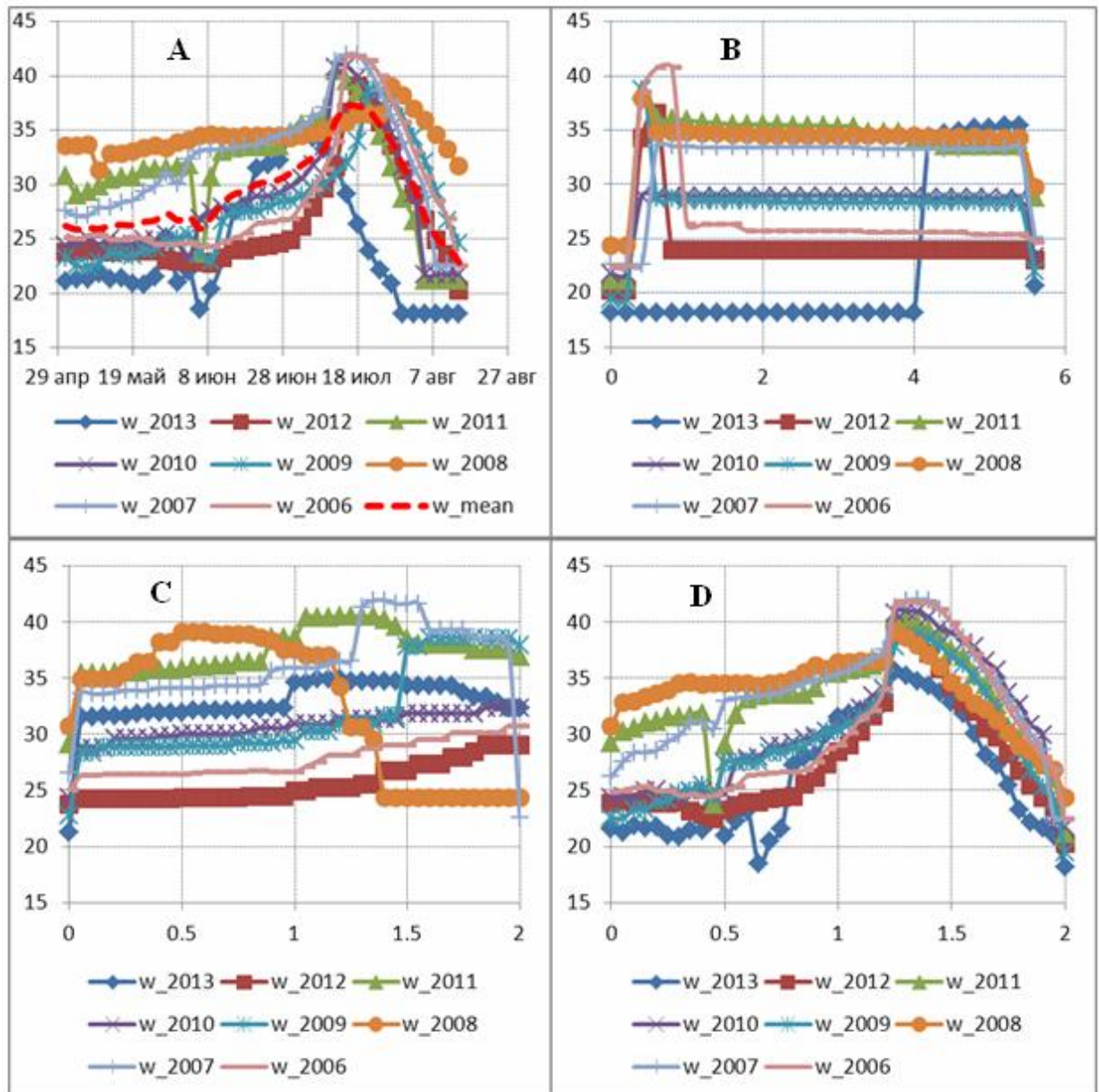


Рис. 2. Модельная эффективность азотной подкормки «по листу» в терминах конечной урожайности (ц/га) в зависимости от момента внесения для разных схем управления: декларативная (А), реактивная по содержанию азота в почве (В) и крахмала в растениях (С), реактивная по достижению порога физиологического времени (D)

Анализ результатов реактивной подкормки с оптимизацией критического уровня

азота и концентрации крахмала в растении (рис. 2В и 2С) показал, что в данном случае однозначно указать оптимальную дату единственной подкормки не представляется возможным. Это объясняется слабой предсказуемостью поведения расчетного урожая в зависимости от контролируемого фактора. Допустимо обсуждать, насколько использование выбранных показателей оправдано в реальной агрономической практике. Но можно уверенно заключить, что, по крайней мере, при использовании в качестве интеллектуального ядра поддержки решений выбранной динамической модели AGROTOOL данные стратегии управления азотным режимом оказываются совершенно неэффективными. Напротив, вариант реактивного управления подкормкой с ориентацией на параметр физиологического времени (рис. 2D), сужает диапазон поиска оптимальной азотной подкормки, обеспечивающей максимум урожая, до сравнительно узкого временного интервала вблизи отметки 1.2 по шкале контрольной переменной. Иными словами, именно фаза развития в рассматриваемом случае оказывается удачным предикатом, позволяющим построить эффективную стратегию управления с обратной связью. Более того, для всех тестовых лет вегетации полученное значение оптимального порога срабатывания оказалось практически одинаковым.

При проведении расчетов с проактивным управлением подкормкой согласно описанной методике мы учли факт нахождения оптимума в районе указанного значения порога (начинали процедуру прогнозных расчетов не с момента сева, а лишь непосредственно после наступления цветения), что позволило нам существенно снизить временные затраты на вычисления.

Сводные результаты сравнения эффективности декларативного, реактивного и проактивного методов управления однократной подкормкой для восьми тестовых сезонов представлены в таблице 1. Наряду с описанными выше вариантами декларативного, реактивного (по трем сигнальным переменным) и проактивного управления в таблице также представлен базовый, или контрольный вариант, который отвечает гипотетическому случаю наличия прогноза стопроцентной оправдываемости. Иными словами, в этом идеальном варианте считается, что будущая погода точно известна нам в любой момент времени, то есть в каждый конкретный год подкормка проводится в самую лучшую, с точки зрения модели, дату. Понятно, что компьютерные эксперименты с моделью «задним числом» формально позволяют имитировать и такой, никогда не достижимый в реальности способ назначения сроков агротехнических мероприятий.

Таблица 2. Сравнительная эффективность методов управления подкормкой

Вариант управления	Показатель	Сезон вегетации								Среднее
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Полная информация (идеальный прогноз)	Дата подкормки	17 июля	17 июля	27 июля	22 июля	13 июля	12 июля	17 июля	1 июля	39.75
	Модельный урожай (ц/га)	41.81	42	39.07	38.71	41.03	40.46	39.3	35.59	
Декларативное управление (оптимальная дата 16 июля)	Дата подкормки	16 июля	16 июля	16 июля	16 июля	16 июля	16 июля	16 июля	16 июля	37.47
	Модельный урожай (ц/га)	41.73	41.98	36.46	32.35	40.66	40.46	39.17	28.16	
Реактивное управление по физиологическому времени (1)	Дата подкормки	13 июля	11 июля	26 июля	19 июля	11 июля	10 июля	15 июля	30 июня	39.46
	Модельный урожай (ц/га)	41.61	41.26	39.07	37.81	40.81	40.46	39.17	35.59	
Реактивное управление по содержанию азота в почве (2)	Дата подкормки	22 июля	15 июня	6 июля	30 июня	23 июня	7 июля	22 июля	нет	32.19
	Модельный урожай (ц/га)	40.74	33.5	34.83	28.71	28.93	40.46	36.55	18.13	
Реактивное управление по запасному углероду (3)	Дата подкормки	6 июля	22 июля	нет	19 июля	5 июля	18 июля	5 июля	5 июля	33.06
	Модельный урожай (ц/га)	30.1	39.29	24.36	38.63	31.85	40.46	27.88	34.34	
Проактивное управление	Дата подкормки	15 июля	13 июля	28 июля	21 июля	13 июля	12 июля	17 июля	1 июля	39.71
	Модельный урожай (ц/га)	41.81	41.88	38.9	38.71	41.03	40.46	39.3	35.59	

1. Управляющая переменная – условное физиологическое время (0 – посев; 1 – цветение; 2 – полная спелость). Триггер управления – превышение критического порога. Расчетное оптимальное значение критического порога для данной схемы управления – 1.25.
2. Управляющая переменная – содержание минеральных соединений азота в верхнем 30-сантиметровом слое почвы. Триггер управления – падение ниже критического уровня. Расчетное оптимальное значение критического уровня при данной схеме управления – 0.6 кг/га.
3. Управляющая переменная – содержание запасных углеродных соединений (крахмала) в посевах. Триггер управления – превышение критического порога. Расчетное оптимальное значение критического порога для данной схемы управления – $1.7 \cdot 10^{-3}$ г/см².

Из приведенной таблицы видно, что даже декларативное назначение постоянной даты подкормки в среднем за восемь рассмотренных лет дает неплохой результат (потери урожая по сравнению с идеальным случаем принятия решения в условиях полной определенности согласно модельным оценкам не превышают двух с половиной центнеров с гектара). Однако в отдельные годы отклонения полученных урожаев от оптимальных значений, соответствующих идеальному прогнозу, могут оказаться весьма значительными (более 20% в 2013 году). Еще хуже складывается ситуация в случае выбора реактивного управления, когда в качестве управляющей переменной выбирается содержание азота в почве или запасного углерода в посеве. Можно заметить, что в этих случаях даже наблюдается ситуация, когда найденный оптимальный в среднем «порог срабатывания» для ряда лет оказывается недостижимым, и, соответственно, подкормки в данном сезоне не происходит. Управление с обратной связью по физиологическому времени, напротив, дает в среднем очень хороший результат. В этом случае имеются лишь небольшие отклонения в датах подкормок в сравнении со случаем идеального прогноза, а даже в тех случаях, когда они значительны (например, 6 дней разницы для 2007 года), это не приводит к заметному снижению модельных урожаев.

Вариант с использованием проактивного управления показывает наилучший результат, который максимально приближен к ситуации, когда нам заранее известны сценарии развития погодных условий в будущем, и мы можем для каждого года точно определить лучшую дату единственной азотной подкормки. Расхождения в датах проведения подкормок в этом случае варьируют от одного до четырех дней, а в четырех годах из восьми они полностью совпадают. Но абсолютный выигрыш, получаемый при использовании управления на основе оперативно уточняющегося модельного прогноза, оказывается в данном случае весьма незначительным по сравнению с реактивным управлением по фазе развития.

Заключение

Хотя проведённые исследования показали высокую эффективность предложенной методики проактивного управления сельскохозяйственным посевом, необходимо помнить, что в описанном компьютерном эксперименте мы находили исключительно дату единственного агротехнического воздействия с заранее фиксированной дозой. Уже для случая, когда заранее не известны ни дата, ни доза, нужны будут гораздо более

=====
масштабные вычисления. Ещё больше их объём возрастёт тогда, когда встанет задача оптимизации дат и доз нескольких взаимосвязанных подкормок. Для того, чтобы выполнить все необходимые расчёты в режиме реального времени, потребуется эффективно использовать большие вычислительные ресурсы. В связи с этим одним из перспективных направлений исследований может быть разработка механизмов распараллеливания вычислений.

Альтернативным подходом, направленным на уменьшение вычислительной сложности проблемы, может быть предварительное ограничение возможных комбинаций моделируемых агротехнических приёмов, исходя из соображений их логической сочетаемости, сложившейся агрономической практики и здравого смысла. Так, даже описанная в статье методика проактивного управления была откорректирована по результатам предшествующего эксперимента с декларативным управлением. Можно предположить, что и в будущем при проектировании методики проактивного управления сложными воздействиями потребуется проводить серию предварительных вычислительных компьютерных экспериментов, сужающих область поиска.

Несмотря на описанные сложности, компьютерные эксперименты с нахождением проактивных стратегий управления могут быть особо востребованы при внедрении в практику новых и перспективных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, для которых ещё не изучены возможные риски. Кроме того, динамически уточняющиеся прогнозы уже активно используются в задачах мониторинга в ходе оперативного сопровождения полевых опытов и производственных посевов [11]. Естественным развитием данной методологии представляется распространение ее не только на пассивный, но и на активный вычислительный эксперимент, то есть использование модельных прогнозов не только для оценки состояния агроэкосистемы, но и для оперативной поддержки агротехнологических решений.

Список использованных источников

1. Полуэктов Р.А. Динамические модели агроэкосистемы. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1991. – 312 с.
2. Hoogenboom G., White J.W., Messina C.D. From genome to crop: Integration through simulation modeling // Field Crops Research. – 2004. 90:145–163.
3. Badenko V., Terleev V., Topaj A. AGROTOOL software as an intellectual core

of decision support systems in computer aided agriculture // Applied Mechanics and Materials. – 2014, v. 635-637. – P. 1688-1691.

4. Баденко В.Л., Латышев Н.К., Слинчук С.Г. Особенности геоинформационного обеспечения технологий точного земледелия // Информация и космос. – 2009, № 4. – С. 53-58.

5. Баденко В.Л., Гарманов В.В., Иванов Д.А., Савченко А.Н., Топаж А.Г. Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2015, № 1-2. – С. 72-76.

6. Хворова Л.А., Топаж А.Г. Построение моделей агроэкосистем и их адаптация к конкретным условиям // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2011, №115. – С. 99-105.

7. Richardson C.W., Wright D.A. WGEN: A model for generating daily weather variables. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service. – 1984, ARS-8. USDA, Washington, DC.

8. Топаж А.Г. Моделирование суточных метеоданных как входного сигнала модели продукционного процесса // Сб. науч. тр. «Почва и растение – процессы и модели». – СПб: АФИ. – 1992. – С. 79-86.

9. Голубятников Л.Л. Стохастическое моделирование величин ежедневных осадков и среднесуточных температур // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2004, №5, т. 40. – С. 665-677.

10. Медведев С.А. Методические основы поливариантного расчёта динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных культур // «АгроЭкоИнфо». – 2015, № 4. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/4/st_16.doc.

11. Медведев С.А., Топаж А.Г., Белов А.В., Глядченкова Н.А., Лекомцев П.В. Распределенный измерительно-моделирующий комплекс для оперативного сопровождения полевого опыта // «АгроЭкоИнфо». – 2015, №2. http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2015/2/st_08.doc.

12. Medvedev S., Topaj A. Crop simulation model registrator and polyvariant analysis. IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2011. Т. 359 АICT. – С. 295-301.

13. Захарова Е.Т., Топаж А.Г. Алгоритм автоматического назначения даты сева в динамической модели AGROTOOL // Материалы научной сессии по итогам 2013 года Агрофизического института. – СПб.: АФИ. – 2014. – С. 44-48.

14. Пасынкова Е.Н., Завалин А.А., Пасынков А.В. Содержание сахаров и общего азота в яровой пшенице по фазам вегетации как диагностические показатели функционального состояния растений // Достижения науки и техники АПК. – 2013, № 1. – С. 8-11.