

Р.А.Полуэктв, доктор технических наук
 А.Г.Топаж
 В.П.Якушев, академик Россельхозакадемии
 С.А.Медведев
 Агрофизический институт
 E-mail: r_poluektov@mail.ru

УДК 631.58:551.5

Использование динамической модели агроэкосистемы для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов*

USING THE DYNAMIC MODEL OF THE AGROECOSYSTEM FOR ESTIMATING THE INFLUENCE OF CLIMATIC CHANGES ON PRODUCTIVITY OF CROPS (THEORY AND REALIZATION)

Poluektov R.A., Topazh A.G., Yakushev V.P., Medvedev S.A.

I. ТЕОРИЯ

Изложена процедура использования компьютерной динамической модели продукционного процесса растений для прогнозирования влияния возможных климатических изменений на сельскохозяйственные посевы. Полученные в ходе идентификации по фактическим погодным условиям данные авторы подвергают предварительной трансформации по различным моделям глобальной циркуляции и сценариям развития хозяйственной деятельности человека.

Ключевые слова: продукционный процесс, динамическая модель, поливариантный анализ, генератор погоды, изменение климата

Presented procedure for using the computerized dynamic model of plant productive process is employed during forecasting the influence of possible climatic changes on farm crops. The data produced in the course of identification according to actual weather conditions are subject to preliminary transformation by authors by the use of various models of global circulation and scenarios in development of human economic activity.

Key words: plant production process, dynamic model, multivariate analysis, whether generator, climate change

ВАЖНЕЙШАЯ задача практической агрометеорологии — предсказание характеристик продукционного процесса сельскохозяйственных растений (в первую очередь, урожайности) в зависимости от погодных условий, складывающихся в конкретном сезоне вегетации или, в среднем, в данной климатической зоне. Для этого можно применять как простые агрометеорологические прогнозы, так и более сложные методы, основанные на использовании динамических моделей. Агрометеорологический прогноз, как правило, представляет собой эвристическую формулу: регрессионную зависимость ожидаемой урожайности от различных предикатов, в качестве которых выступают интегральные метеохарактеристики за выбранный период (сумма температур и осадков, ГТК и т.д.). Элементарность подобных вычислений делает агрометеорологические прогнозы удобным инструментом в агрономической практике. Однако, как показывают многочисленные исследования, их точность невелика. Кроме того, основанные на регрессионных соотношениях, они обладают интерполяционным характером и совершенно непригодны для решения задач прогнозирования в условиях измененной климатической ситуации, которая ожидает нас в будущем.

Гораздо большей степенью универсальности обладают динамические модели продукционного процесса [4], в которых используется механистический подход, их параметры имеют прозрачный физический смысл. Кроме того, поскольку лежащие в основе подобного описания физические законы полагаются неизменными, можно гарантировать, что такая теоретическая модель будет универсальной [3].

Организовав факторный компьютерный эксперимент с моделью путем подачи на ее вход альтернативных сценариев погоды, можно выбранные результаты статистически обработать и получить интересные нас вероятностные характеристики распределения урожайности моделируемых культур. Но прогнозы климатических изменений описывают будущий климат, а не будущую погоду (то есть не суточные значения метеопараметров, которые, как правило, и требуются для расчета динамической модели).

Стохастический имитатор суточных погодных метеопараметров (“генератор погоды”) широко используют в компьютерных экспериментах с моделью агроэкосистемы при решении задач оперативного и долгосрочного прогнозирования динамики продукционного процесса. С математической точки зрения он представляет собой специальный алгоритм статистического моделирования (метод Монте-Карло), который позволяет по набору постоянных параметров, описывающих закономерности погоды в данной местности, получать в любом количестве “синтетические” погодные сценарии. В лаборатории математического моделирования агроэкосистем АФИ успешно эксплуатируют собственный генератор погодных реализаций, представляющий собой модификацию алгоритма, предложенного Ричардсоном и Райтом [6].

Погодные данные очередных модельных суток генерируются так. Требуемые характеристики (максимальная и минимальная температуры воздуха, минимальная его влажность, скорость ветра, осадки и коэффициент ослабления солнечной радиации) моделируются как многомерный случайный стационарный процесс. Алгоритм моделирования начинается с того, что “разыгрывается” факт наличия

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-05-00415.

осадков. Это стохастическое 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, в свою очередь, выпадали или нет осадки. Само же количество осадков в дождливый день, рассчитывают как случайную величину, подчиняющуюся двухпараметрическому распределению Вейбулла. Среднесуточное значение скорости ветра моделируют как случайную величину, имеющую G распределение, а четыре остальных метеопараметра – как случайный многомерный процесс. Центрированные и нормированные отклонения от средних значений (флуктуации) определяют с помощью рекуррентного формирующего фильтра первого порядка:

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + B \cdot \varepsilon_k,$$

где k – номер дня реализации; x – четырехмерный вектор составляющих моделируемого процесса; A , B – 4×4 матрицы коэффициентов фильтра; ε – четырехмерный дискретный белый шум, каждая компонента которого представляет собой нормально распределенную случайную величину с нулевыми средней и единичной дисперсиями. Использование подобного формирующего фильтра позволяет отразить в получаемых реализациях погоды эффекты статистической связности значений различных метеопараметров как в каждый конкретный день, так и в соседние сутки. Адекватное описание корреляционных свойств случайного процесса матрицы A и B можно выразить формулами [6]:

$$\begin{aligned} A + M_1 \cdot M_0^{-1} \\ B \cdot B^T = M_0 - M_1 \cdot M_0^{-1} \cdot M_1^T, \end{aligned}$$

где M_0 , M_1 – авто- и взаимокорреляционная матрицы (со сдвигом на одни сутки).

После вычисления центрированных и нормированных величин их умножают на характерную величину дисперсии, добавляют к климатическим нормам, образуя искомые составляющие погодного сценария. При этом как дисперсию, так и климатическую норму (среднее значение) того или иного метеопараметра в данный календарный день вычисляют по сглаженной аппроксимации годового хода соответствующих характеристик. Параметры сглаженной аппроксимации идентифицируют отдельно для влажных и сухих дней, они представляют собой климатические характеристики данной местности, допускающие прозрачную физическую интерпретацию.

Все входящие в статистическую модель генератора параметры оценивают для каждой местности на основе хранящихся в базе данных фактических реализаций погоды за несколько прошлых лет. Верификация генератора демонстрирует адекватность “синтетических” сценариев погоды. Они сами по себе количественно и качественно представляют те же статистические закономерности, что и фактические погодные реализации, использованные для идентификации параметров генератора. А их использование в качестве входного сигнала динамической модели агроэкосистемы позволяет получать характеристики продукционного процесса (даты наступления фенофаз, величины урожая и т.д.).

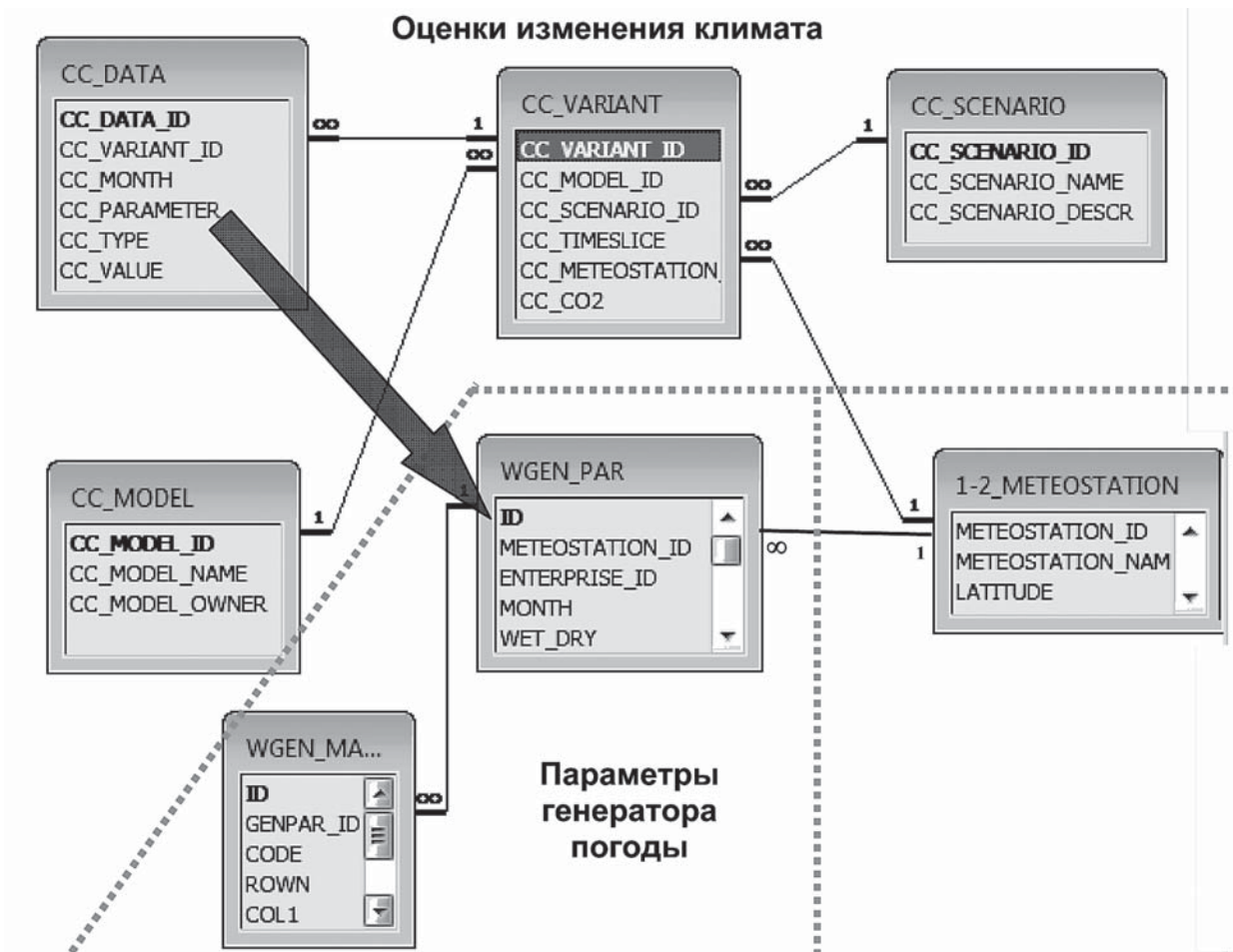


Рис. 1. Информационная модель описания климатических изменений в компьютерном эксперименте.

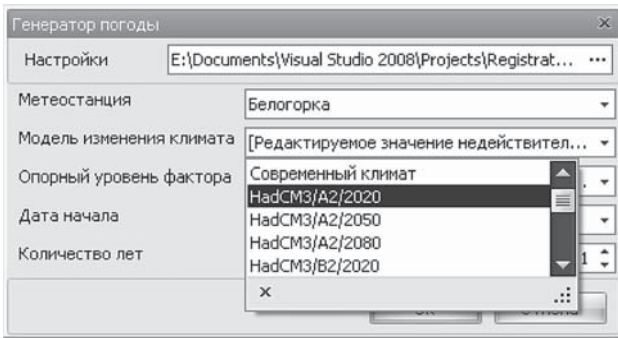


Рис. 2. Интерфейс диалогового окна для запуска генерации сценария погоды будущего.

Параметры генератора погоды есть не что иное, как климатические характеристики выбранной местности. Но тогда их можно использовать не только для генерации погоды, соответствующей современному состоянию климата, но и для получения сценариев “погоды будущего”. Действительно, надо просто изменить тот или иной параметр генератора в соответствии с данными ожидаемого климата. Эта простая идея реализована в рамках автоматизированной системы планирования и компьютерных экспериментов с моделями агроэкосистем, разработанными в лаборатории АФИ [5]. Основная функциональная направленность системы – предоставлять пользователю универсальной среды поливариантного анализа, при которой одновременно осуществляются подготовка входных данных, расчет и анализ результатов не для одного, а для структурированного набора множества вариантов расчета.

Задачи оценки влияния климатических изменений на продукционный процесс потребовали включения нескольких понятий (рис. 1).

Модель климатических изменений – конкретная методика расчета климата, основанная, как правило, на использовании той или иной имитационной модели глобальной циркуляции атмосферы.

Сценарий развития – социально-экономическое предположение развития человечества (основной входной фактор).

Временной срез – дата, на которую делают прогноз (согласно принятым в современной климатологии стандартам, в качестве этих временных вех приняты 2020, 2050 и 2080 годы).

Вариант данных об изменении локального климата, определяемый кортежем “Модель-сценарий-срез-метеостанция”. Он формулируется в виде набора аддитивных, мультипликативных и других добавок к тем или иным параметрам генератора, которые были идентифицированы для условий современного климата. Дополнительно в каждом варианте содержится информация о предполагаемом изменении

концентрации углекислоты в атмосферном воздухе. Хотя эта характеристика не относится напрямую к метеорологическим данным, но служит существенным параметром модельных расчетов.

Пример пользовательского интерфейса запуска генератора для формирования необходимого количества “синтетических” сценариев погоды, соответствующего тому или иному варианту учета климатических изменений, представлен на рис. 2. После математической обработки всех результатов можно судить о потенциальном влиянии предполагаемых климатических изменений на продукционный процесс сельскохозяйственных посевов в терминах тех или иных статистических показателей.

Наиболее полный банк данных, содержащий конкретные количественные оценки изменения статистических характеристик основных метеорологических параметров в различных точках земного шара, можно найти на специализированном информационном портале межправительственной комиссии по климатическим изменениям IPCC Data Distribution Centre (<http://www.ipcc-data.org/>). В нем, в частности, представлены оценочные расчеты более чем двадцати альтернативных моделей глобальной циркуляции атмосферы, разработанных в ведущих научных центрах мира. В наших исследованиях мы использовали параметры моделей ЕСНАМ (Институт имени Макса Планка, Гамбург, Германия) и Hadley (Метеорологическая обсерватория Соединенного Королевства, Великобритания) [1, 2]. В базу данных системы поливариантного анализа занесены оценки, просчитанные, согласно этим моделям, для двух альтернативных социально-экономических сценариев эволюции хозяйственной деятельности. В их качестве были выбраны сценарии: “среднеоптимистичный” В2 (общественное развитие, направленное на диверсификацию технологий с целью достижения экологической и социальной стабильности, но с упором на мероприятия регионального и национального масштаба) и “жесткий” А2 (сильноразобоченный мир, характеризующийся усилением национальных различий и противоречий с высокими темпами роста населения и недостаточным контролем средств достижения экономического роста). Соответствующие каждому из 12 возможных вариантов “модель-сценарий-временной срез” модифицированные значения параметров генератора суточных метеоданных просчитаны для нескольких расположенных на территории бывшего СССР метеостанций, в наличии которых находится достаточное для параметрической идентификации число лет фактических реализаций погоды. Тем самым в системе была обеспечена полная информационная поддержка, необходимая для оценки влияния климатических изменений на продуктивность посевов.

II. РЕАЛИЗАЦИЯ

Представлены результаты компьютерных экспериментов по оценке влияния изменений глобального климата на продукционный процесс полевых культур (на примере ярового ячменя и картофеля). Для описания вариаций продукционного процесса использовали динамическую модель, а источником реализаций будущих погодных условий служил стохастический генератор суточных метеоданных, параметры которого настроены на ожидаемые глобальные изменения климата.

Ключевые слова: *продукционный процесс, динамическая модель, генератор погоды, компьютерный эксперимент, изменение климата*

The results of computer experiments allowing forecast of climate change impact into agricultural crops in North-West Russia region are presented. The main tool we used to estimate yields and maturity dates is computer dynamic model AGROTOOL and the source of weather datasets corresponding future climate is stochastic generator of daily meteorological characteristics.

Key words: *plant production process, dynamic model, whether generator, computer experiment, climate change*

Цель работы – применить метод использования динамической модели для решения задачи прогнозирования влияния ожидаемых глобальных изменений климата на продукционный процесс растений ярового ячменя и картофеля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования выбрана динамическая модель продукционного процесса **AGRO-TOOL** [4], идентифицированная с данными полевого опыта, выполняемого с 1982 г. по 2009 г. на Меньковской опытной станции (филиал АФИ). Первоначально в опыте была реализована схема двухфакторного эксперимента: дозы минеральных удобрений (I) и механические обработки почвы (II). Варианты I фактора – без удобрений внесение однократной и двукратной доз, а II – обработка обычная (для данной зоны) и минимальная. Опыт проводили в семипольном зернопропашном севообороте, развернутом во времени и в пространстве. Набор культур: многолетние травы первого и второго годов пользования, картофель, яровой ячмень, занятой пар, озимая рожь, однолетние травы с подсевом многолетних. По результатам первых лет полевого опыта выяснилось, что влияние способа обработки почвы на легких (супесчаных) почвах статистически незначимо и этот фактор исключили. Из набора возделываемых культур выбрали яровой ячмень и картофель в варианте опыта с однократной дозой минерального питания, а именно – $N_{45}P_{30}K_{30}$ для ячменя и $N_{90}P_{65}K_{65}$ – для картофеля. Идентифицировали модели по результатам полевого опыта за 1982-1989 гг. Данные последующих лет (2000-2008) были использованы для верификации модели.

Выполнили несколько серий экспериментов по единой схеме в рамках компьютерной системы поливариантного анализа динамики продукционного процесса, разработанной в лаборатории математического моделирования агроэкосистем АФИ [5]. Вначале для выбранной культуры сформировали исходный (базовый) сценарий прогона модели с указанием технологии, года возделывания и поля. Затем в режиме специализированного диалога выбрали вариант климатического сценария, предназначенного для очередного эксперимента, и количество искусственных погодных реализаций, которые не-

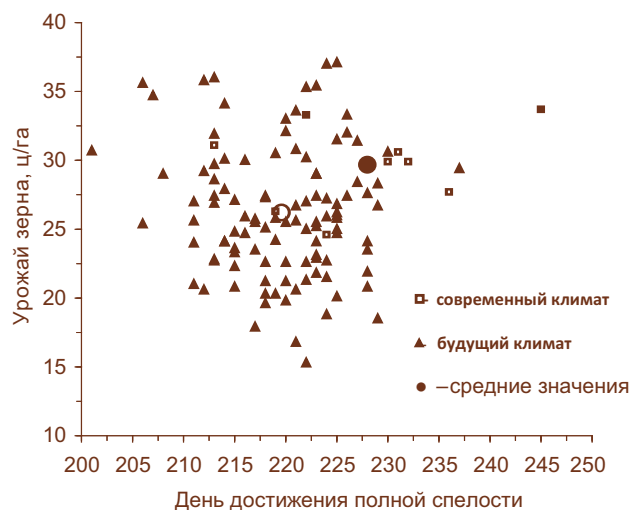


Рис. 3. Время созревания и урожайность ярового ячменя для текущего и будущего состояний климата (вариант HadCM3/A2/2080) при сохранении неизменными сроков сева.

Таблица 1.

Показатель	Современный климат		Прогноз, год		
	расчет	генератор	2020	2050	2080
Средняя урожайность, ц/га	31,5	30,2	31,6	30,0	26,2
Средний день созревания	229	231	231	224	220
СКО урожайности	3,3	5,4	5,0	5,4	4,7
СКО дня созревания	8,6	7,7	7,4	7,1	6,1
Изменение урожайности, %	+4,3	0	+4,6	-0,7	-13,2

обходимо сформировать. Климатический сценарий содержал сведения о выбранной модели климата, хозяйственной стратегии и годе имитации, например HadCM3/A2/2080. Результатом работы генератора погоды, встроенного в систему поливариантного расчета как специализированный плагин, стало необходимое число тестовых наборов данных о погоде в течение одного сезона вегетации. После этого модель продукционного процесса в автоматическом режиме запускали нужное количество раз, результат каждого расчета фиксировали. Таким образом, в начальной серии экспериментов предполагалось, что в будущем почвенные характеристики, возделываемые сорта и технологии останутся неизменными. Варьировали в соответствии с разработанными сценариями только сведения о погоде.

В каждом варианте расчета использовали два основных показателя – величину полученного урожая и дату (день) наступления полного созревания культуры. Результаты многократных прогонов модели статистически обрабатывали с оценкой средних величин и их дисперсий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент 1. В качестве базовых вариантов для расчета выбрали варианты моделирования продукционного процесса ярового ячменя за 11 лет: 1983-1989, 2000, 2001, 2002 и 2006 гг. Для каждого из вариантов разработали 12 погодных сценариев, соответственно, для прогнозируемых условий климата 2020, 2050 и 2080 гг. и для каждого из сценариев осуществляли прогон модели. Получили выборку из 132 реализаций. При сохранении в 2080 г. современной технологии выращивания ячменя (включая сроки сева) можно ожидать резкого ускорения времени вегетации и ощутимого снижения урожая (рис. 3). Статистические оценки выборки (средние значения и среднеквадратичные отклонения) представлены в табл. 1. В качестве эталона сравнения выбрали вариант погоды, сгенерированной для условий современного климата. Расчеты фактической погоды и сценариев климата современного и перспективного (2020 г.) незначительно отличаются друг от друга. В то же время для условий 2080 г. ожидается существенное ускорение созревания и снижение урожайности культур. Это и понятно, поскольку в сгенерированных сценариях отражается повышение температуры воздуха. Увеличение концентрации CO_2 приведет к снижению продуктивности. Ясно, что оставлять неизменной существующую технологию возделывания ячменя на этот период нецелесообразно.

Эксперимент 2. В отличие от предыдущего случая, выбрали более ранние сроки сева для 2050 и

Таблица 2.

Показатель	Современный климат		Прогноз, год		
	расчет	генератор	2020	Срок сева	
				начало мая	25 апреля
Средняя урожайность, ц/га	31,5	30,2	31,6	32,5	35
Средний день созревания	229	231	231	215	206
СКО урожайности	3,3	5,4	5,0	6,7	5,8
СКО дня созревания	8,6	7,7	7,4	6,6	5,6
Изменение урожайности, %	+4,3	0	+4,6	+7,6	+16

Таблица 3.

Показатель	Современный климат, генератор, дата сева - реальная	Прогноз (дата сева - 10 апреля, день сева 100-й)			
		HadCM3 /A2/2080	HadCM3 /B2/2080	ESCM4 /A2/2080	ESCM4 /B2/2080
		Средняя урожайность, ц/га	30,2	32,5	35
Средний день созревания	231	215	206	205	207
СКО урожайности	5,4	6,7	5,8	6,6	6,4
СКО дня созревания	7,7	6,6	5,6	9,9	6,4
Изменение урожайности, %	0	+7,6	+16	+10	+17

Таблица 4.

Показатель	Генератор, современный климат	Прогноз, год		
		2020	2050	2080
		Срок посадки		
		конец мая	25 апреля	10 апреля
Средняя урожайность, ц/га	324	359	400	452
Средний день созревания	248	251	242	243
СКО урожайности	63	63	75	76
СКО дня созревания	7,1	13,4	10,4	14,3
Изменение урожайности, %	0	+10,8	+23,4	+39,5

2080 гг. (табл. 2). Здесь урожайность ячменя монотонно возрастает, хотя срок наступления полной спелости зерна и сокращается. Этот результат отражает основной динамический фактор изменения климата – существенный рост концентрации углекислого газа в атмосфере.

Эксперимент 3. Поскольку в двух предыдущих опытах использовали только одну модель климата и один социо-экономический сценарий развития хозяйственной деятельности человечества, следовало сравнить результаты прогноза продуктивности ячменя, по крайней мере, по двум моделям и двум сценариям (табл. 3). Заметно, что различные модели климата будущего дают согласованные результаты, качественно не отличающиеся друг от друга.

Эксперимент 4 был посвящен исследованию влияния изменения характера глобального климата на производственный процесс картофеля. В первом эксперименте уже была установлена необходимость корректировки даты сева (посадки). В опытах с картофелем продублировали схему эксперимента 2 (рис. 4, табл. 4). Анализ данных показывает, что в 2050 и 2080 гг. на Северо-Западе России можно ожидать

рост урожайности картофеля даже более существенный, чем ячменя. При этом время посадки картофеля должно быть сдвинуто на более ранние, чем в текущее время, сроки.

Эксперимент 5. В ходе последнего эксперимента сравнивали влияние на урожайность картофеля прогнозов, получаемых из различных климатических моделей и сценариев развития (табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод использования динамической модели для решения задачи прогнозирования влияния ожидаемых глобальных изменений климата на производственный процесс ярового ячменя и картофеля универсален. Применяемая модель легитимна для почвы заданного типа и разновидности по гранулометри-



Рис. 4. Время созревания и урожайность картофеля для текущего и будущего состояний климата (вариант HadCM3/A2/2080) при переходе на более ранние сроки посадки.

Таблица 5.

Показатель	Современный климат, генератор, дата посадки - реальная	Прогноз (дата посадки - 10 апреля, день посадки 100-й)			
		HadCM3 /A2/2080	HadCM3 /B2/2080	ESCM4 /A2/2080	ESCM4 /B2/2080
Средняя урожайность, ц/га	324	452	474	457	437
Средний день созревания	248	243	239	239	231
СКО урожайности	63	76	100	87	82
СКО дня созревания	7,1	14,3	11,5	13,4	9,9
Изменение урожайности, %	0	+39,5	+42,3	+41,0	+34,8

ческому составу. Чтобы оценить влияние климатических трендов на значительных земельных массивах, следует выделить на них участки территории (единицы управления) с близкими по значениям почвенными параметрами, проанализировать каждую единицу управления в отдельности и найти средневзвешенные величины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менжулин Г.В., Шамшуринов В.И., Савватеев С.П., Петерсон Г.Н. Оценки достоверности сценариев региональных изменений климата, рекомендованных межправительственной комиссией//Тр. Междун. конф. по изменению, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды – ENVIRONMIS-2004.-Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “ГЕО”, 2004.
2. Менжулин Г.В., Шамшурина Н.В. Об адекватности сценариев изменений климата: воспроизведение измене-

ний климата XX-го столетия современными климатическими моделями//Мат. Всерос. конф., посвященной 90-летию академика М.И.Будыко. 10-11 июня 2010 г.-СПб: Изд-во СПбГУ.

3. Полуэктов Р.А., Опарина И.В., Топаж А.Г., Миршель В. Адаптируемость динамических моделей агроэкосистем к различным почвенно-климатическим условиям//Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 11.
4. Полуэктов Р.А. Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур.-СПб.: Изд-во СПб ГУ, 2006.
5. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г., Кобылянский С.Г. Поливариантный анализ динамики агроэкосистем//Вестник РАСХН. 2006. № 6.
6. Топаж А.Г. Моделирование суточных метеоданных как входного сигнала модели продукционного процесса //Сб. науч. тр. “Почва и растение – процессы и модели”.-СПб: АФИ, 1992.

И.В.Ольгаренко, кандидат технических наук
О.П.Кисаров, доктор технических наук

В.И.Ольгаренко, член-корреспондент Россельхозакадемии, заслуженный деятель науки РФ
Новочеркасская государственная мелиоративная академия
E-mail: rek.ngma@magnet.ru

УДК 626.824:532.543

Методы теории подобия для решения уравнений Сен-Венана при управлении водораспределением в оросительных системах

В статье изложен новый методологический подход к совместному использованию метода теории подобия и имитационного эксперимента с уравнениями Сен-Венана для установившегося и неустановившегося течения воды в каналах оросительных систем, а также решения задач оперативного диспетчерского управления водораспределением.
Ключевые слова: теория подобия, имитационный эксперимент, уравнения Сен-Венана, критерии подобия, водораспределение, диспетчерское управление, канал, оросительная система

METHODS OF SIMILARITY THEORY FOR SOLVING SAINT-VENAN EQUATIONS DURING MANAGEMENT OF WATER DISTRIBUTION IN IRRIGATION SYSTEMS

Olgarenko I.V., Kisarov O.P., Olgarenko V.I.

The paper is devoted to a new methodological approach providing an integrated use of the method of the theory of similarity and a simulating experiment with Saint-Venant equations for stable and fluctuated water flow in irrigation canals for solving problems of efficient coordinated management of water distribution.
Key words: theory of similarity, simulating experiment, Saint-Venant equations, similarity criteria, water distribution, coordinated management, canal, irrigation systems

РАЦИОНАЛЬНОЕ использование водных ресурсов в оросительных системах зависит от множества факторов и, прежде всего, от научно обоснованной организации диспетчерской службы, которая формируется по двум направлениям. Первое – в рамках разработки и реализации автоматизиро-

ванной организации диспетчерской службы, которая формируется по двум направлениям. Первое – в рамках разработки и реализации автоматизиро-