

УДК 551.583:63(470+570)

ПРОБЛЕМА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОСФЕРЫ РОССИИ: МЕТОДОЛОГИЯ, МОДЕЛИ, РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

© 2009 В.Н. Павлова

Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии,
г. Обнинск; e-mail: vnp2003@bk.ru

Обсуждаются подходы к решению проблемы оценки влияния изменений климата на продуктивность агроэкосистем - динамические модели ПОГОДА-УРОЖАЙ, разностные уравнения регрессии, метод агроклиматических аналогов. Анализируются рассчитанные климатообусловленные тренды урожайности важнейших сельскохозяйственных культур на территории России за период 1975-2006 гг. Показано, что элиминирование трендов урожайности разностными уравнениями регрессии позволяет значительно повысить точность и надежность оценок влияния изменений (колебаний) климата на продуктивность.

Ключевые слова: *изменения климата, климатические сценарии, био(агро)сфера, урожайность, продуктивность экосистем*

ВВЕДЕНИЕ

Последние обобщения, изложенные в Четвертом оценочном докладе ИРСС и в Оценочном докладе об изменениях климата и их последствиях на территории РФ [1, 2], свидетельствуют, что с 70-х годов XX в. началась эпоха беспрецедентно быстрых антропогенных изменений климата.

По оценкам ИРСС среднегодовая глобальная температура за весь XX в. повысилась на $0,6 \pm 0,2$ град. С, а на территории РФ соответствующие изменения климата составили 1,0-1,2 град. С. В ходе глобального потепления фактически после 1976 г. наблюдался монотонный рост глобальной и полушарной температур в масштабе десятилетий. Линейный тренд температуры воздуха за период 1976-2007 г. составил $+0,18$ град. С/10 лет для Земного шара, $+0,23$ град. С/10 лет для Северного полушария, $+0,48$ град. С/10 лет для территории России. Из 10 лет, самых теплых для Северного полушария, 8 наблюдались в последнем десятилетии [3].

Производство зерна в России и ее продовольственная безопасность в значительной мере зависят от климатических факторов. Так, колебания валового сбора зерновых и зернобобовых за последние 10 лет весьма значительны – от 55 млн. т. в 1999 г. до 108 млн. т в 2008 г. Оценка влияния изменений климата на агроэкосистемы и зависящие от них результаты хозяйственной деятельности представляется актуальной и достаточно сложной задачей, методы решения которой еще только разрабатываются. Представить существующие методы получения таких оценок и с их помощью оценить влияние наблюдаемых

и ожидаемых изменений на агроклиматические ресурсы России – основная цель настоящей публикации.

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОДУКТИВНОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМ

Основу системы КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ, разработанной во ВНИИСХМ [4], составляют динамические модели продуктивности сельскохозяйственных культур с суточным шагом по времени. Модель представляет собой систему дифференциальных уравнений, описывающих ростовой, влажностный и азотный режимы в системе почва-растение-атмосфера. Имитационная система КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ может работать в ретроспективном режиме (оценка динамики агроклиматических условий за прошедшее столетие); оперативном (прогнозирование урожайности в текущем году, расчет влагозапасов почвы под различными культурами, испарения и других агрометеорологических показателей); прогностическом (оценка влияния текущих и ожидаемых изменений климата на продуктивность сельскохозяйственных культур).

Рассмотрим прогностический режим работы системы. В табл. 1 представлены детальные данные о возможных изменениях агроклиматических условий европейской территории России (ЕТР) к 2030 г. при реализации климатического сценария HadCM3 (A1FI). При реализации этого сценария ожидается существенный рост как зимней, так и летней температуры воздуха – на 3,7-3,8 град. к 2030 г. Континентальность климата

при этом практически не изменится. Рост содержания CO₂ в атмосфере к 2030 г. по этому сценарию составит 29%. Увеличение расходной части водного баланса (испарения) за теплый период года значительно превысит рост осадков. Увеличение испаряемости приведет к значительному росту дефицита испарения (разности между потенциальным PE и фактическим AE испарением). Повсеместное падение величин гидротермического коэффициента (ГТК) может свиде-

тельствовать об увеличении повторяемости засух на ЕТР к 2030 г. Этот процесс будет сопровождаться уменьшением влагозапасов почвы в теплый период года (см. табл. 1). Однако ожидаемое уменьшение влагозапасов не затронет, по видимому, засушливых районов Поволжья, о чем свидетельствует некоторый рост минимальных в среднемноголетнем разрезе июльских влагозапасов почвы в этом регионе.

Таблица 1. Изменения агроклиматических условий на ЕТ России к 2030 г. (отклонения от условий последнего десятилетия XX века) при реализации сценария A1FI (климатическая модель HadCM3, Hadly Center)

Регион	Агроклиматические показатели								
	Средняя температура, °С		Сумма среднесуточных температур выше 10 °С	Длина вегетационного периода, сут.	Сумма осадков за год, мм	Испарение, мм		ГТК	Влагозапасы почвы в июле, мм
	июль	январь				AE	PE		
Северный	3,2	4,3	684	29	46	94	198	-0,42	-29
Северо-Западный	3,0	3,9	724	31	88	136	206	-0,28	-26
Калининградский	2,8	3,2	806	39	85	102	206	-0,34	-45
Центральный	3,4	3,9	748	29	48	43	157	-0,32	-25
Волго-Вятский	3,6	4,1	719	25	32	40	158	-0,22	-17
Центр.- Черноземный	3,9	3,9	841	27	53	6	104	-0,28	-10
Поволжский, север	3,9	3,9	788	24	30	12	104	-0,25	3
Поволжский, юг	3,8	3,8	837	22	36	15	74	-0,13	3
Северо-Кавказский	4,1	3,4	913	26	26	20	73	-0,11	-6
Уральский	3,9	3,8	759	24	21	34	165	-0,28	-15
ЕТ России	3,7	3,8	778	26	37	40	141	-0,25	-14

Примечание: AE и PE - фактическое и потенциальное испарение, соответственно; ГТК - гидротермический коэффициент Селянинова

Рассмотренный сценарий изменений климата для ЕТР можно охарактеризовать как сценарий потепления аридного типа. Сценарии такого типа неблагоприятны для сельского хозяйства РФ. Расчеты показывают, что при реализации такого сценария как HadCM3/A1FI, уже к 2030 г. можно ожидать падения климатообусловленной урожайности зерновых культур до 26 % на Северном Кавказе и до 14-19% - на севере Поволжья, в ЦЧО и на Урале (см. табл. 2). При этих сценариях (в отличие от сценариев потепления гумидного типа) в будущем не ожидается заметного климатообусловленного роста урожайности в целом на ЕТР. Дефицит производства зерна в РФ будет только расти и к 2050 г. достигнет 16-17%.

В то же время расчеты в рамках системы КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ показывают, что при реализации благоприятного для сельского хозяйства России гумидного сценария потепления (сценарий GFDL) следует ожидать роста урожайности, по крайней мере, до середины текущего столетия. При этом урожайность зерновых на территории Нечерноземной зоны превысит современную на 11-29%, тогда как урожай-

ность на территории Черноземной зоны будет ниже современного уровня на 10-13%, т.е. ожидается перераспределение величин урожайности в пользу Нечерноземной зоны. Можно ожидать, что на юге Сибири урожайность зерновых культур снизится на 20-25% при сохранении современного уровня земледелия.

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ

Для решения задачи оценки и прогноза последствий изменений климата на урожайность сельскохозяйственных культур, как показано выше, предложена физически обоснованная система дифференциальных уравнений, реализованная в виде динамических моделей КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ, моделирующих процессы формирования урожая. Однако региональные и национальные системы мониторинга и прогнозирования урожайности на основе подобных систем являются достаточно дорогостоящим технологическим продуктом, что ограничивает их практическое использование. По этой причине получение простых агрегированных зависимостей

Таблица 2. Динамика урожайности сельскохозяйственных культур (отклонения от современного уровня, %) при реализации сценариев HadCM3/ A1FI

Регион	Зерновые культуры				Кормовые культуры			
	Период прогнозирования, годы							
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Северный	7.1	6.6	6.3	9.1	6.0	14.5	18.4	17.9
Северо-Западный	7.9	8.2	10.5	9.2	13.3	17.4	21.6	22.9
Калининградский	4	13	12	4	7.0	11.0	12.0	8.0
Центральный	-0.8	0.2	-1.3	-6.7	3.4	5.0	4.6	-0.7
Волго-Вятский	-6.8	-5.2	-8.2	-13	2.8	4.1	3.2	-0.9
Центр.-Черноземный	-14.1	-19.1	-26.9	-34	-7.5	-12.4	-19.3	-24.9
Поволжье, север	-13.3	-13.9	-27.4	-40	-2.6	-4.1	-9.6	-22.9
Поволжье, юг	-1.3	2.2	1	3.1	-8.7	-9.0	-11.5	-12.5
Северный Кавказ	-23.8	-26.4	-25.9	-19	-14.4	-17.1	-21.3	-24.9
Уральский	-15.9	-19	-26.4	-32	-0.4	0.5	-1.5	-10.1
ЕТ России	-8.6	-9.3	-13.2	-17	-1.0	-0.4	-2.1	-7.4

приращения урожайности (ΔY) от приращения метеорологических факторов – температуры (ΔT) и сумм осадков (ΔP), пригодных для использования в системах мониторинга, является актуальной задачей:

$$\Delta Y = a_0 + a_1 \Delta T + a_2 \Delta P. \quad (1)$$

Оценки, полученные согласно (1), показывают, что по меньшей мере 29% междугодовой изменчивости урожайности шести важнейших мировых продовольственных культур могут быть объяснены изменениями выбранных предикторов - минимальной и максимальной температуры воздуха и суммой выпавших осадков, осредненных за вегетационный период [5].

Рассмотрим возможность применения методологии разностного подхода к построению функционалов ПОВОДА-УРОЖАЙ и оценим климатообусловленные тренды урожайности основных сельскохозяйственных культур для тер-

ритории России.

Эффективность перехода от классических уравнений множественной регрессии к уравнениям, представленным в виде первых разностей, можно оценить по данным табл. 3. Оценки коэффициентов корреляции (R) уравнений множественной регрессии для расчета среднеобластной урожайности зерновых культур для областей Центрально-Черноземного и южного регионов с большими посевными площадями зерновых рассчитывались за период с 1975 по 2006 гг. ($n = 32$). Предикторы уравнения регрессии - среднемесячные данные по температуре воздуха (T_5 , T_6) и суммы осадков (P_5 , P_6) в мае и июне. Так, для зерновых и зернобобовых культур переход к разностной форме уравнений повышает учитываемую долю дисперсии ряда урожайности (R^2) на 21,4%, для озимой пшеницы – на 11,3%.

В табл. 4 и 5 представлены рассчитанные

Таблица 3. Оценки коэффициентов корреляции (R) уравнений множественной регрессии для расчета среднеобластной урожайности основных сельскохозяйственных культур по температуре и осадкам за май и июнь

Область, край	R					
	Зерновые и зернобобовые в целом		Озимая пшеница		Яровой ячмень	
	I	II	I	II	I	II
Белгородская	0.679	0.745	0.577	0.566	0.647	0.739
Воронежская	0.736	0.828	0.632	0.732	0.710	0.837
Курская	0.410	0.622	0.382	0.420	0.434	0.727
Липецкая	0.455	0.735	0.519	0.659	0.420	0.627
Орловская	0.372	0.691	0.442	0.647	0.423	0.768
Тамбовская	0.549	0.783	0.494	0.786	0.555	0.741
Краснодарский край	0.629	0.768	0.625	0.727	0.758	0.652
Ставропольский край	0.856	0.855	0.871	0.843	0.842	0.850
Ростовская область	0.768	0.854	0.730	0.703	0.790	0.851
Волгоградская область	0.743	0.899	0.729	0.809	0.851	0.916
Среднее по региону	0.620	0.788	0.600	0.689	0.643	0.771

Примечание: * I - классическое уравнение регрессии, II - уравнение для первых разностей.

согласно уравнению (1) количественные оценки приращений продуктивности зерновых и пропашных культур, вызванные изменениями климата за последние три десятилетия. В основных зерновых регионах, в Приволжском и Южном ФО, климатообусловленный прирост урожайности зерновых и зернобобовых в среднем составил 2,4% за 10 лет. Таким образом, только наблюдаемые изменения климатических условий за последние 30 лет привели к росту урожайности зерновых и

зернобобовых культур в этих регионах на 7,2%. В то же время к неблагоприятным воздействиям климата последних десятилетий можно отнести падение урожайности зерновых на Дальнем Востоке (-5,7%) и в Центральном регионе (-0,9%). Следует отметить, что реакция урожайности озимой пшеницы на наблюдаемые изменения климата положительна на всей территории ее возделывания, и в Приволжском ФО достигает величины 8,4%.

Таблица 4. Климатообусловленные приращения урожайности зерновых культур по федеральным округам России за период с 1975-2006 гг.

Федеральный округ	Зерновые и зернобобовые в целом	Озимая пшеница	Яровой ячмень	Зерновые и зернобобовые в целом	Озимая пшеница	Яровой ячмень
Приволжский	0,32	0,47	0,26	2.6	2.8	2.1
Южный	0,30	0,36	0,44	2.2	2.0	3.2
Центральный	- 0,02	0,06	- 0,02	-0.3	0.4	-0.2
Сибирский	0,16	-	0,19	1.6	-	2.0
Дальневосточный	0,21	-	-0,08	-1.9	-	-0.7
Уральский	0,23	-	0,15	1.7	-	1.1

Как показывают расчеты, климатообусловленная урожайность подсолнечника и сахарной свеклы также выросла за последние десятилетия (см. табл. 5), однако темпы ее роста ниже, чем для зерновых культур. Отметим достаточно высокие коэффициенты детерминации урожайности (R^2) для этих культур – от 24% до 56%. Полученные данные позволяют заключить, что наблюдаемые изменения климата в целом благоприятны для сельскохозяйственного производства России.

МЕТОД АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ

Только модельный подход не позволяет полностью решить задачу прогноза влияния изменений климата на продуктивность и устойчивость сельского хозяйства, поскольку многие его аспекты (экономические, экологические и социальные) не охватываются известными моделями. Эффективным средством исследования может оказаться метод нахождения пространственных или временных аналогов агроклиматических условий произрастания сельскохозяйственных культур для временных отрезков вегетационного периода, которые важны для роста и развития данной группы растений.

Набор показателей для выбора агроклиматических аналогов может включать любое число параметров, характеризующих теплообеспеченность, влагообеспеченность и условия перезимовки озимых. Например, температура воздуха

Таблица 5. Климатообусловленные тренды урожайности для пропашных технических культур (ц/га за 10 лет) и коэффициенты детерминации R^2 за 1990-2006 гг.

С/х культура	Центральный нечерноземный	Центральный черноземный	Приволжский	Южный
Подсолнечник	1.32 ($R^2=0.56$)	0.29 ($R^2=0.29$)	0.35 ($R^2=0.24$)	0.37 ($R^2=0.34$)
Сахарная свекла	-	6.00 ($R^2=0.36$)	5.32 ($R^2=0.33$)	7.78 ($R^2=0.41$)

самого теплого и самого холодного месяца года, сумма среднесуточных величин температуры воздуха за период с температурой выше 10 С, гидрометеорологический показатель засухи (дефицит испарения) А.И. Будаговского, гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова, сумма выпавших осадков по сезонам и за выбранный промежуток времени, весенние запасы почвенной влаги и другие показатели. В качестве показателя меры близости агроклиматических условий может быть принята суммарная относительная ошибка по модулю [6]

$$K^{ij} = \sum_{p=1}^n \left| \frac{x_p^i - x_p^j}{x_p^i} \right| \alpha_p,$$

где x_p – вектор агроклиматических параметров, i – номер района, для которого определяется аналог, j – номер аналога, α_p – нормированные ве-

совые коэффициенты (оптимизируемый параметр), $(\sum_{p=1}^n \alpha_p = 1)$, n – размерность вектора агроклиматических параметров.

Ниже приведены агроклиматические аналоги для ряда областей черноземной зоны ЕТР при реализации сценария GFDL к середине XXI в. Для оценки продуктивности климата и его изменений в данном варианте расчета использован биоклиматический потенциал (БКП) при достаточном

минеральном питании.

Комплексный подход, сочетающий использование метода агроклиматических аналогов и динамических моделей КЛИМАТ–ПОЧВА–УРОЖАЙ, позволяет сделать вывод об ожидаемом росте климатообусловленной продуктивности сельского хозяйства областей черноземного центра ЕТР при реализации климатического сценария GFDL (см. табл. 6) - рост биоклиматического потенциала может достигать 30%.

Таблица 6. Аналоги агроклиматических условий ряда областей Центрально-Черноземной зоны РФ при изменении климата по сценарию GFDL к 2040 г.

Область	Прогнозируемые условия на 2040 г.			Агроклиматический аналог к 2040 г.	Относительная ошибка, K^{ij}	БКП, ц/га	Изменение БКП, % к сред. за 1980-2000 гг.
	$\sum T$, град	ΔE , мм	T_{min} , град.				
Липецкая	3007	371	-8,2	Белгородская	4,0	12,5	9
Тамбовская	3010	417	-9,5	Белгородская	3,6	12,3	11
Курская	2971	309	-6,9	Киевская	3,7	14,1	6
Белгородская	3236	453	-6,9	Полтавская	3,4	13,6	-1
Воронежская	3261	537	-7,8	Ровенская	2,4	11,7	30
Татария	2547	397	-11,6	Тамбовская	1,3	11,7	5
Пензенская	2733	399	-10,4	Тамбовская	2,5	11,9	3
Ульяновская	2724	446	-8,6	Белгородская	1,5	10,8	25

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что наблюдаемые с 70-х годов XX в. изменения климатических условий следует оценивать как благоприятные для зернового хозяйства России. Увеличение степени аридности климата на территории некоторых регионов земледельческой зоны Сибири, суммарный выход которых в зерновой баланс РФ не превышает 15%, – важнейшее из неблагоприятных последствий наблюдаемых изменений климата.

Расчеты оценок изменения продуктивности агроэкосистем к середине XXI в. по сценарию HadCM3/A1FI можно рассматривать как нижнюю, а по сценарию GFDL – как верхнюю границу оценок.

Оценки влияния климата на продуктивность агроэкосистем будут уточняться за счет использования новых методов анализа, позволяющих элиминировать агротехнические тренды урожайности, использование уточненных и обновленных климатических сценариев, с привлечением фактических данных об урожайности при различных уровнях ведения системы земледелия. В дальнейшем, методы оценки влияния изменений кли-

мата на продуктивность сельского хозяйства будут учитывать климатические тренды эффективного плодородия сельскохозяйственных почв, связанные с изменением приходной и расходной составляющей органического углерода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC Forth Assessment Report. URL: <http://www.ipcc.ch>.
2. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2008.
3. Доклад Росгидромета об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2007 год: ежегод. интернет-издание. 2008. URL: <http://climatechange.su>.
4. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
5. Lobell D.B, Field C.B. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming // Environ. Res. Lett. 2007. № 2.
6. Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. Оценка влияния изменений климата на сельское хозяйство методом пространственно-временных аналогов // Метеорология и гидрология. 2003. № 8.

ESTIMATIONS OF CLIMATE CHANGE IMPACT ON AGROSPHERE PRODUCTIVITY IN RUSSIA: METHODOLOGY, MODELS AND RESULTS

© 2009 V.N. Pavlova

Federal State Institution «All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology»;
e-mail: vnp2003@bk.ru

Approaches to solution of climate changes impact problem on agroecosystem efficiency - dynamic models the WEATHER - CROP, multiple linear regressions with first differences in response and predictor variables, an agroclimatic analogues method are discussed. Designed climate-dependant trends of productivity of the major agricultural crops in Russia territory in 1975-2006 are analyzed. It is shown, that detrending the time productivity series with differences regress equations allows significantly to increase the accuracy and reliability of impact of climate changes on productivity.

Key words: *climate changes, climatic scenarios, bio (agro) sphere, productivity, ecosystem efficiency.*