

4. Знаменский, В.А. Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды / В.А. Знаменский. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 248 с.
5. Кадацкая, О.В. Гидрохимическая индикация ландшафтной обстановки водосборов / О.В. Кадацкая. – Минск: Наука и техника, 1987. – 134 с.
6. Кирвель, И.И. Трансформация гидрохимического режима зарегулированных рек / И.И. Кирвель, М.С. Кукшинов // Природ. ресурсы. – 2007. – № 3. – С. 5–15.
7. Попов, А.Н. Прогноз минерализации воды строящегося Юмагузинского водохранилища / А.Н. Попов, Г.А. Оболдина // Вод. ресурсы. – 2005. – Т. 32, № 2. – С. 214–222.
8. Сороковикова, Л.М. Трансформация главных ионов и минерализации воды р. Енисей в условиях зарегулированного стока / Л.М. Сороковикова // Вод. ресурсы. – 1993. – № 3. – С. 320–325.
9. Тарасов, М.Н. Изменения гидрохимического режима рек при их зарегулировании водохранилищами и вопросы прогнозирования / М.Н. Тарасов, И.М. Павелко // Гидрохимические материалы: сб. науч. тр. / Гидрохим. ин-т. – М., 1969. – Т. 50: Химия природных вод, их загрязнение и самоочищение. – С. 47–56.

УДК 551.588 (476)

ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ НА ДИНАМИКУ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Коляда В.В.

Государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси», г. Минск, Республика Беларусь, valery_v_kalyada@tut.by

The quantification of influence of modern climatic trends on productivity of cereals crops and winter rapeseed for various territories including Belarus is given.

Введение

Наиболее массовым подходом к оценке влияния изменяющегося климата на продуктивность сельского хозяйства является построение регрессионных моделей, в основе которых сопряженные временные ряды урожайности сельскохозяйственных культур, прежде всего зерновых, и климатических переменных. Последние характеризуют термические (часто и радиационные) условия произрастания культур и условия влагообеспеченности и представлены наиболее доступными данными по температуре воздуха и количеству атмосферных осадков за календарные месяцы вегетационного периода. Считается, что их использование сопряжено с минимальными потерями информации в сравнении с характеристиками различных фаз развития растений. Способом приведения временных рядов к стационарному виду является расчет первых разностей, а зависимости урожайности от климатически переменных устанавливаются по модели множественной линейной регрессии [2].

Примером может служить оценка роли климатических трендов в динамике урожайности пшеницы в Австралии в 1952–1992 гг. [5]. Климатическими переменными в ней выступали среднегодовые максимальные и минимальные тем-

пературы воздуха и количество атмосферных осадков в первых разностях, по которым получено уравнение без свободного члена:

$$\Delta Y = -0,0004 \Delta R + 0,5043 \Delta T_{\min} - 0,6090 \Delta T_{\max},$$

где ΔY – изменение климатообусловленной урожайности, т/га, ΔR – изменение осадков (мм), ΔT_{\min} – изменение минимальной температуры ($^{\circ}\text{C}$), а ΔT_{\max} – изменение максимальной температуры ($^{\circ}\text{C}$).

За указанный период урожайность пшеницы выросла на 0,5 т/га, максимальная температура – на 0,58 $^{\circ}\text{C}$, минимальная – на 1,02 $^{\circ}\text{C}$, суммы осадков – на 39 мм, а климатообусловленное изменение урожайности составило:

$$\Delta Y = -0,0004 (39) + 0,5043 (1,02) - 0,6090 (0,58) = 0,15 \text{ т/га.}$$

Таким образом, изменения климата в рассматриваемый период обеспечили более чем 30 % общего роста урожайности пшеницы Австралии [5].

Широкою известность данный подход приобрел в рамках глобальной оценки влияния климатических трендов на урожайность шести важнейших продовольственных культур мира [3], результаты которой представлены в таблице 1.

Таблица 1– Итоговая статистика регрессионных моделей «урожайность – климатические переменные» на глобальном уровне за 1961–2002 гг.

Показатель	Сельскохозяйственная культура					
	пшеница	рис	кукуруза	соя	ячмень	сорго
Модельный R^2	0,41	0,29	0,47	0,52	0,65	0,29
Изменения рожайности для $\Delta T_{\max}=\Delta T_{\min}=1^{\circ}\text{C}$, %	-5,4	-0,6	-8,3	-1,3	-8,9	-8,4

Оценки показывают, что по меньшей мере 29 % дисперсии ежегодных изменений урожайности у всех культур объясняется климатическими факторами, а для ячменя и сои – больше половины и около двух третей соответственно. Значимые эффекты относятся, главным образом, к трендам температуры. Реакция на увеличение температуры у всех культур была отрицательной, что, по мнению авторов, связано с ускорением развития культур, усилением водного стресса и дыхания посевов при потеплении [3].

Многочисленные оценки изменения климатообусловленной урожайности зерновых культур за период активной фазы изменений климата по данной методике получены по территории России. Их результаты, с использованием панельных данных по административным областям, отражает таблица 2 [1].

Таблица 2 – Общее (1) и климатообусловленное (2) изменение урожайности зерновых культур в России за период 1975–2010 гг. (ц/га/10 лет)

Федеральный округ	Зерновые и зерно-бобовые – в целом		Озимая пшеница		Яровой ячмень	
	1	2	1	2	1	2
	Северо-Западный (юг)	0,56	0,20	1,60	-	1,98
Центральный (север)	0,50	0,22	1,88	0,31	1,13	-0,0
Центральный (центр)	1,41	-0,17	1,90	0,28	1,40	-0,17
Центральный (юг)	2,49	-0,15	2,40	0,07	2,04	-0,46
Приволжский (север)	1,04	0,00	1,52	0,61	0,70	-0,05
Приволжский (юг)	0,00	-0,07	1,02	0,88	0,36	-0,20
Южный	2,30	0,44	2,97	0,83	0,21	-0,07
Уральский (юг)	0,31	0,82	-0,04	-	0,33	0,21
Россия	1,15	0,17	1,66	0,50	1,02	0,004

Из таблицы следует, что в рассматриваемый период урожайность в большинстве регионов Европейской территории России росла, чему способствовали и изменения климата. В среднем по стране у зерновых и зернобобовых культур в целом они обеспечили около 15 % общего прироста урожайности. При этом, климатообусловленный рост урожайности у пшеницы отмечался во всех регионах, где она культивируется, и в среднем по стране составил 30 % общего прироста. В то же время у ярового ячменя наблюдалось климатообусловленное снижение урожайности, и средний нулевой прирост был обеспечен целиком за счет восточных регионов (табл. 2).

Материалы и методы исследования

Для оценки влияния климатических трендов на урожайность использовались данные Национального статистического комитета по зерновым и зернобобовым культурам и озимому рапсу для территории Беларуси и административных областей за 1990–2012 гг., а также материалы Республиканского гидрометцентра по средним месячным температурам воздуха и суммам атмосферных осадков за тот же период в разрезе метеостанций, осредненные нами на национальном и областном уровнях. По временным рядам для Беларуси в целом были получены оценки линейных трендов урожайности и климатических переменных. Для оценки зависимости урожайности от климатических переменных областные ряды объединялись в панель, с объемом выборки для культуры (с учетом взятия первых разностей) равным: $(23-1) \times 6 = 132$.

Оценка зависимости урожайности от климатических переменных методом множественной линейной регрессии проводилась с использованием системы STATISTICA 6.0. В качестве исходного набора объясняющих переменных для яровых культур использованы средние температуры и суммы осадков по всем месяцам от их посадки до уборки: для культур раннего сева за апрель – август, для гречихи – за май – август, для кукурузы – за май – октябрь. Для озимых культур использовались данные с сентября предыдущего года по август года уборки. Таким образом, в первом случае использовалась 10 климатических переменных, а во втором – 24. Применялась пошаговая процедура с включением статистически значимых переменных на 5 %-ом уровне ошибки с получением уравнения регрессии без свободного члена с конкретным набором детерминирующих урожайность культуры переменных.

Величина климатообусловленного изменения урожайности определялась путем подстановки в уравнение регрессии приростов (снижений) соответствующих климатических переменных, оцененных по линейному тренду.

Обсуждение результатов и выводы

Модельные оценки коэффициента детерминации R^2 показывают, что климатические переменные в условиях Беларуси определяют от четверти (яровая пшеница) до более двух третей (озимая тритикале и пшеница) изменчивости урожайности рассмотренных культур. Особенно высокой зависимостью урожайности от климата характеризуются озимые зерновые культуры, а среди яровых культур – гречиха ($R^2 = 60,4\%$).

Судя по коэффициентам регрессии, основным лимитирующим фактором урожайности является температура, роль которой в период весенне-летней вегетации, у всех культур, кроме кукурузы, отрицательна. Максимальными их величинами у ранних яровых культур выделяется температура июня, у опере-

жающих их по срокам развития озимых культур этот максимум смещается на май, а у более поздней гречихи – на июль. Особняком среди зерновых культур стоит кукуруза, которая, напротив, положительно реагирует на повышение температуры в июне. Положительная роль температуры обнаруживается также в период их сева (сентябрь, предшествующего года) у всех озимых ржи и тритикале и в период массовой уборки зерновых культур (август) у озимой пшеницы, ярового ячменя и зерновых и зернобобовых культур в целом. В холодный период года положительная роль температуры для урожайности озимых наиболее четко выражена в феврале, а у озимой ржи – в марте.

Влияние на урожайность атмосферных осадков обнаруживается с октября по апрель у озимых культур, но особенно четко прослеживается их отрицательная роль в декабре. Среди яровых культур положительно реагирует на атмосферные осадки лишь гречиха, урожайность которой растет при их увеличении в мае и июне. Яровая пшеница и зернобобовые культуры, напротив, снижают урожайность при увеличении осадков в августе, в период уборки.

Оценки изменения средней температуры воздуха и сумм осадков и их статистической значимости характеризуют параметры линейных трендов. Для сравнения такие же оценки были получены для периода с 1975 г., который принимается за начало активной фазы современного потепления (табл. 3).

Таблица 3 – Параметры линейных трендов средних температу и сумм атмосферных осадков для Беларуси

Месяц (сезон, период, год)	1975–2012 гг.				1990–2012 гг.			
	°C/10 лет	R^2 , %	мм/10 лет	R^2 , %	°C/10 лет	R^2 , %	мм/10 лет	R^2 , %
январь	0,54	2,6	0,1	0,0	-1,25	8,5	5,2	4,8
февраль	0,41	1,4	6,1	26,9	-2,09	15,5	2,6	2,5
март	0,37	2,9	0,6	0,2	-0,33	1,0	-2,1	1,1
апрель	0,64	18,7	-2,4	2,9	0,45	4,0	-0,6	0,1
май	0,09	0,3	6,0	10,3	0,51	5,6	8,4	6,5
июнь	0,30	4,9	-0,2	0,0	0,35	2,5	4,9	1,6
июль	0,96	34,5	3,6	1,3	1,10	17,4	4,9	0,7
август	0,58	22,4	3,1	1,4	0,38	3,7	18,8	13,8
сентябрь	0,30	5,6	-4,5	3,2	0,78	14,9	-24,1	36,0
октябрь	0,28	4,6	6,2	6,4	0,23	1,3	5,3	1,6
ноябрь	0,48	4,9	2,6	3,6	1,52	14,4	0,1	0,0
декабрь	0,26	1,1	-1,4	1,2	0,67	0,2	3,9	3,1
зима	0,40	3,9	4,8	6,1	-0,85	9,3	11,7	9,7
весна	0,36	9,6	2,4	0,8	0,21	2,3	2,1	0,3
лето	0,62	33,4	6,5	2,0	0,61	12,5	28,6	12,2
осень	0,35	14,3	4,3	1,3	0,84	23,7	-18,7	9,0
холодный период	0,41	7,6	8,1	6,7	-0,28	2,0	9,7	3,1
теплый период	0,45	36,2	11,8	4,6	0,54	31,2	17,6	3,9
год	0,43	23,8	19,8	9,9	0,20	5,0	27,3	6,4

Из таблицы следует, что в последний период рост температуры на территории Беларуси в целом замедлился, а в январе, феврале и марте, зимой и в холодный период года (ноябрь–март) даже сменился похолоданием. Причем заметно уменьшилось число статистических значимых оценок (выделены жирным шрифтом). Если за 1975–2012 гг. они фиксируются в апреле, июле и августе, в летний и осенний сезоны, теплый период и в году в целом, то за 1990–2012 гг. реальность потепления статистически подтверждается лишь для июля, осени и теплого периода года.

Тренды атмосферных осадков на территории Беларуси в указанные периоды для большинства месяцев, сезонов, теплого и холодного периодов и года в основном положительны, но статистически незначимы (табл. 3).

Оценки общего и климатообусловленного прироста урожайности зерновых и зернобобовых культур и озимого рапса для территории Беларуси по данным за 1990 – 2012 гг. отражает таблица 4.

Таблица 4 – Общий и климатообусловленный прирост урожайности в Беларуси за 1990–2012 гг

Культура	Общий прирост		Климатообусловленный прирост	
	ц/га/ 10 лет	R^2 , %	ц/га/ 10 лет	%
Зерновые и зернобобовые культуры – в целом	4,05	28,2	-2,14	-52,8
озимая рожь	-0,54	0,8	-0,48	89,1
озимая пшеница	5,48	40,7	-2,09	-38,2
озимая тритикале	3,93	28,8	-1,37	-34,9
яровая пшеница	5,98	50,1	-0,93	-15,6
яровой ячмень	3,66	23,3	-1,06	-28,9
овес	4,11	28,2	-1,47	-35,8
зернобобовые	4,17	39,7	-1,40	-33,5
гречиха	1,77	24,2	-0,66	-37,1
кукуруза	14,67	60,9	0,10	0,7
Озимый рапс	2,89	32,4	0,59	20,6

Оценки параметров линейных трендов урожайности рассмотренных культур свидетельствуют об их общем статистически значимом на 5-м % уровне ошибки увеличении в 1990–2012 гг. Только у озимой ржи в исследуемый период отмечалось снижение урожайности, впрочем, статистически незначимое. Средний прирост урожайности по группе зерновых и зернобобовых культур в целом составил 4,05 ц/га за 10 лет. На этом уровне росла урожайность зернобобовых культур, озимой тритикале, ярового ячменя и овса, пониженными приростами характеризуется гречиха, более высокими – озимая и яровая пшеница, а рекордными приростами выделяется кукуруза.

Этот прирост ассоциируется, прежде всего, с прогрессом в области селекции, технологии и механизации зернопроизводства. При этом значительный интерес представляет оценка роли современных изменений климата, особенно заметных на территории Беларуси с конца 80-х гг. прошлого столетия. Полученные результаты показывают, что их роль для большинства зерновых и зернобобовых культур была негативной (табл. 4).

Согласно полученным оценкам, заметными климатообусловленными приростами урожайности из рассмотренных нами культур в последние десятилетия характеризуется лишь озимый рапс. Среди зерновых культур только у кукурузы под влиянием изменений климата в последние десятилетия наметился рост урожайности. Остальные культуры данной группы отрицательно реагируют на современные климатические тренды, существенно снижая свои приросты (табл. 4).

Следует отметить согласованность полученных оценок с результатами аналогичных расчетов по центральной части Центрального федерального округа России, куда входят соседние Смоленская и Брянская области (табл. 2).

Вместе с тем необходимо подчеркнуть предварительный характер сделанных выводов. Дело в том, что подобный упрощенный, огульный подход в последнее время подвергается критике. Все более осознается неполная адекватность линейных моделей при исследовании реакции сельскохозяйственных культур на изменения климата, в частности указывается на важность учета температурных порогов при оценке климатообусловленной динамики продуктивности сельскохозяйственных культур [2, 4]. Специальных средств анализа требует и использование панельных данных. Исследования по влиянию и оценке изменений климата на продуктивность сельского хозяйства Беларуси предполагается продолжить.

Список литературы

1. Павлова, В.Н. Наблюдаемые изменения климата и динамика продуктивности сельского хозяйства России / В.Н. Павлова, О.Д. Сиротенко // Труды ГГО, 2012. – Вып. 565. – С. 132–151.

2. Impacts of climate change on the agricultural and aquatic systems and natural resources within the CGIAR's mandate // CCAFS Working Paper 23. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). Copenhagen, Denmark. Ed. P. Thornton, L. Cramer, 2012. Available online at: www.ccafs.cgiar.org.

3. Lobell, D.B. Global scale climate – crop yield relationships and the impacts of recent warming / D.B. Lobell, C.B. Field // Environ. Res. Lett. – 2007. – Vol. 2. – P.1–7.

4. Luo, Q. Temperature thresholds and crop production: a review / Q. Luo // Climatic Change. – 2011. – Vol. 109. – P. 583–598.

5. Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends / N. Nicholls // Nature. – 1997. – Vol. 387. – P. 484–485.