

РАСЧЁТ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ЭФФЕКТИВНОСТИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ С УЧЕТОМ ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ

© 2009 В.А. Романенков¹, О.Д. Сиротенко², М.В. Беличенко¹, В.Н. Павлова²

¹ Всероссийский НИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, г. Москва; e-mail: vniia@online.ru

² Всероссийский НИИ сельскохозяйственной метеорологии, г. Обнинск; e-mail: vnp2003@bk.ru

Созданы модели расчета урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя, учитывающие взаимодействие климатических факторов, почвенных условий и разных доз минеральных удобрений для Нижегородской, Владимирской, Московской областей. Совпадение результатов моделирования на основе разных источников данных позволяет использовать данные Географической сети опытов с удобрениями для формирования равномерной сетки ежегодных оценок урожайности.

Ключевые слова: модель, урожайность, удобрения, зерновые культуры.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования, выполненные в XX в., показали, что в условиях характерного для России континентального климата гидрометеорологические факторы являются важнейшей причиной, определяющей междугодичную изменчивость урожайности, как при низком, так и при высоком уровне интенсификации земледелия. Новизна ситуации с учетом климатических изменений в агроклиматических исследованиях в XXI. в. состоит в том, что эпоха медленных изменений климата сменилась эпохой беспрецедентно быстрых климатических изменений. В ходе глобального потепления фактически после 1976 г. наблюдался монотонный рост глобальной и полусферной температур в масштабе десятилетий. Линейный тренд температуры воздуха за 1976-2007 гг. составил +0,18°C/10 лет для Земного шара, +0,23°C/10 лет для Северного полушария, +0,48°C/10 лет для территории России. Из 10 самых теплых для Северного полушария лет 8 наблюдались в последнем десятилетии [1].

В настоящей работе представлены результаты сравнительного моделирования урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя, учитывающие взаимодействие климатических факторов, почвенных условий и разных доз минеральных удобрений для одних и тех же территорий, но на основе различных источников и подходов моделирования.

МЕТОДИКА

В первом случае были использованы усредненные областные метеорологические наблюдения 455 станций на территории бывшего СССР

(данные Росгидромета) и данные Госкомстата России по среднеобластной урожайности. Для решения задачи оценки и прогноза последствий изменений климата на урожайность сельскохозяйственных культур предложена простая агрегированная зависимость приращения урожайности (ΔY) от приращения метеорологических факторов - среднемесячной температуры воздуха (ΔT) и месячных сумм осадков (ΔP):

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

С помощью имитационной системы КЛИМАТ-ПОЧВА-УРОЖАЙ [3] были получены зависимости между рядами урожайности и системой агроклиматических показателей по отдельным областям Нечерноземной зоны.

Во втором случае на основе наблюдений в краткосрочных и длительных опытах с удобрениями Географической сети опытов с удобрениями (Геосети) были созданы систематизированные электронные базы данных по сельскохозяйственным культурам, обобщающие многолетние ряды наблюдений за урожайностью и качеством продукции, климатическую, почвенную, агротехническую информацию.

Были построены несколько моделей продуктивности на основе полиномиальных уравнений регрессии методом последовательного включения переменных в программе Statistica 6. Выбор наиболее информативных параметров проведен на основе исследования надежности коэффициентов регрессии и с учетом возможности сравнимости моделей для различных территорий. Проведено определение устойчивости работы моделей для выборок с разной степенью окультуренности почвы, различных типов реализации погодных условий. Модели, показавшие результаты наиболее близкие к экспериментальным

данным, выбраны в качестве рабочих. На основании выбранных моделей проведен расчет прогнозных трендов изменения урожайности культур с учетом одновременного изменения климатических условий и плодородия почвы за пределами временных и пространственных рамок конкретного полевого опыта (группы опытов).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки возможности построения функционалов в соответствии с формулой (1) и оценки климатообусловленного тренда урожайности озимой пшеницы проведен расчет для территории

Нижегородской области. В качестве исходных данных взяты ряды температуры воздуха и месячных сумм осадков, полученные по данным станционных наблюдений месячного разрешения за период с 1976 по 2006 г. и входящие в базу данных Росгидромета. Урожайность озимой пшеницы по Нижегородской области за 1975-2006 гг. – данные Госкомстата.

С помощью функционалов ПОГОДА-УРОЖАЙ (1) были получены зависимости между рядами урожайности и набором агроклиматических показателей по отдельным областям Нечернозёмной зоны. Пример расчетов для Нижегородской области представлен в табл. 1.

Таблица 1. Оценки коэффициентов уравнений регрессии для расчета урожайности озимой пшеницы в Нижегородской области по агроклиматическим показателям

Независимая переменная	Форма представления влияющих переменных	B	σ_B	$t = \frac{B}{\sigma_B}$	p-level
наблюдаемые в течение 1976-2006 гг. $R=0,690$, $n=26$					
Свободный член	b_0	7.640737	7.016402	1.08898	0.286153
Температура, май	T_5	-0.454263	0.405544	-1.12013	0.272898
Осадки, май	R_5	0.092135	0.043109	2.13724	0.042153
Осадки, июнь	R_6	0.032813	0.029512	1.11187	0.276370
Средняя температура сентябрь-ноябрь	T_0	1.258488	0.546659	2.30215	0.029589
Осадки, март-апрель	R_V	0.076750	0.036491	2.10327	0.045270

Примечание: R - множественный коэффициент корреляции, n - объем выборки, B - коэффициент регрессии, σ_B - стандартная ошибка B . Значимые с $p < 0,05$ переменные выделены.

Таблица содержит оценки коэффициентов регрессии B для каждого влияющего на урожайность фактора, их среднеквадратические отклонения σ_B значения t -критерия, а также уровни доверительной вероятности p -level, характеризующие надежность коэффициентов регрессии. Как видно из табл. 1, наибольшую значимость обнаруживали майские осадки, осадки марта-апреля, рост которых приводил к увеличению урожайности, а также температурный режим осеннего периода начала вегетации. В этой связи в последующих этапах работы при поиске оптимальных моделей урожайности с учетом доз удобрений и агрохимических характеристик почвы проведена оценка эффективности азотных удобрений в соответствии с количеством весенних осадков, выпадающих в мае и апреле.

Полученные зависимости удовлетворительно воспроизводили областную динамику урожайности озимой пшеницы при проверке на независимой выборке, при этом коэффициент корреляции составил 0,69. Тем не менее, ограничением данного подхода для практического использования, например, на уровне хозяйства, является необходимость учета эффективности действия азотных

удобрений и различных уровней плодородия почвы.

В противоположность усредненным метеорологическим и урожайным данным, использованным в описанном выше исследовании, данные краткосрочных и длительных опытов с удобрениями Геосети имеют точную привязку к конкретному месту. На основе баз данных Геосети были сформированы и проанализированы следующие выборки:

1. Выборка по озимой пшенице для Нижегородской области содержит результаты наблюдений за 16 лет исследований, 165 строк. Дозы NPK варьируют в диапазоне 0-240, 0-290, 0-155 кг/га соответственно;
2. Выборка по озимой пшенице для Владимирской области содержит данные с 1970 по 1985 годы, всего 78 строк, дозы NPK изменяются в пределах 0-180, 0-180, 0-120 кг/га.
3. Выборка по ячменю содержит данные ЦОС ВНИИА за 26 лет исследований, включает 340 вариантов, варьирование доз NPK: 0-240, 0-180, 0-180 кг/га.

База данных содержала достаточный объем данных для получения выборок по типу почвы,

ее степени окультуренности и однородности применённых элементов агротехнологий.

Для обеспечения принципа однотипности почв, для выборки по Нижегородской области использовали только данные по серым лесным почвам, для Владимирской и Московской – по дерново-подзолистым. Каждую выборку разделили по степени окультуренности почв в соответствии с медианными значениями общих выборок. Для Московской области критерием разделения выборки было содержание подвижного P_2O_5 , равное 70 мг/кг (граница среднее-повышенное содержание), для Нижегородской - 150 мг/кг (граница повышенное-высокое содержание). В расчет включили все имеющиеся характеристики почвы, дозы удобрений N, P, K, их квадраты и корни из них, температуру и осадки вегетацион-

ного периода. Кроме этих простых показателей для анализа были рассчитаны следующие комбинированные показатели: произведения дозы азотных удобрений на сумму осадков апреля и мая (NR_4 , NR_5) как отражение влияния погодных условий конкретного месяца на действие азотных удобрений; произведение рН и P_2O_5 для обнаружения опосредованного влияния окультуренности почв на урожай; ГТК мая, июня и июля как комплексная характеристика увлажненности. Регрессионный анализ проводили с помощью программы Statistica 6, методом последовательного включения переменных, с последующим выбором наиболее значимых и взаимно не повторяющихся с учетом их сравнимости для различных территорий. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Характеристика уравнений регрессии для расчета урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя

область	почвенные разности	культура	объем выборки, n	Влияющие переменные	множественный коэффициент корреляции, R
Нижегородская	все	озимая пшеница	157	$h, N, T_7, N^2, pH^{0.5}, NR_4, GTK_5$	0,647
	наименее окультуренные	озимая пшеница	79	$h, N, T_5, R_5, N^2, pH^{0.5}, NR_4$	0,828
Владимирская	все	озимая пшеница	72	$T_5, NR_4, R_5, N^2, P+K$	0,916
Московская, ЦОС ВНИИА	все	озимая пшеница	256	$P^{0.5}, T_6, NR_4, R_5, h, P_2O_5, N_2, N, R_4$	0,812
	наименее окультуренные	озимая пшеница	139	$P^{0.5}, T_6, NR_4, R_5, h, P_2O_5, N_2, N$	0,851
	все	ячмень	329	$R_6, N, T_6, N^2, P_2O_5, T_4, R_4, R_5, NR_5$	0,818
	наименее окультуренные	ячмень	159	$R_6, N, T_6, N^2, R_5, T_5, pH^{0.5}, NR_5$	0,919

Теснота выявленных статистических связей между урожайностью зерновых, дозами удобрений, агрохимическими характеристиками почвы и метеорологическими условиями оказалась достаточно высокой – коэффициент детерминации R^2 оценивается величинами порядка 67-85%, кроме общей выборки по Нижегородской области (42%). Вместе с тем, все коэффициенты регрессии (за двумя исключениями) оказались значимыми при 5% уровне.

Выявлено, что для различных территорий не удастся осуществить подбор одинаковых влияющих факторов, тем не менее, для озимой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья важнейшими являются взаимодействия между дозами азотных удобрений (N) и условиями увлажнения на период возобновления вегетации, которые характеризуются осадками за апрель (R_4) для озимой пшеницы либо за май (R_5) для ячменя, дозы азота в степени 1 и 2 (N, N^2), температура, осадки мая (R_5, T_5) либо гидротермический коэффициент мая (GTK_5).

Таким образом, помимо апрельских осадков,

которые оказывают существенное влияние на эффективность азотных удобрений, на урожайность озимой пшеницы значимо влияют метеорологические условия на более поздних стадиях развития растений. Условия увлажнения, характеризующиеся осадками, способствуют повышению урожайности, о чем свидетельствуют знаки коэффициентов регрессии. Повышение температуры воздуха в мае и в июне приводит к снижению урожайности, что может быть обусловлено уменьшением влагозапасов пахотного слоя почвы. Влияние окультуренности отчасти нивелирует отрицательный эффект июньской температуры на озимую пшеницу, что видно по повышению абсолютной величины коэффициента при T_6 для выборки менее окультуренных почв. Для ярового ячменя наблюдается влияние окультуренности на снижение зависимости урожайности от майских и июньских осадков, но изменения влияния температурного режима не выявлено.

Полученные расчётные результаты сопоставлены с данными областной статистики за соответствующий временной период. На рис. 1 пока-

зано соответствие среднеобластных статистических данных (данные Госкомстата России по урожайности) и результатов моделирования (данные Геосети) по Нижегородской области за 1969-1984 гг. для сравнительно менее окультуренных почв при условии абсолютного контроля (азотные удобрения не вносятся). Полученная модель хорошо описывает динамику урожайности ($R = 0,65$) (табл. 2), при этом урожайность культур по выборке данных Геосети выше, чем по области. Это обстоятельство может быть связано как с

включением в выборку для построения модели только серых лесных почв, сравнительно более плодородных по отношению к почвам области, так и с более высоким уровнем плодородия участков проведения полевых опытов. Вместе с тем реально наблюдаемая динамика урожайности даже при условии большей окультуренности обнаруживает сходную направленность многолетней изменчивости, что видно по направлению линейного тренда.

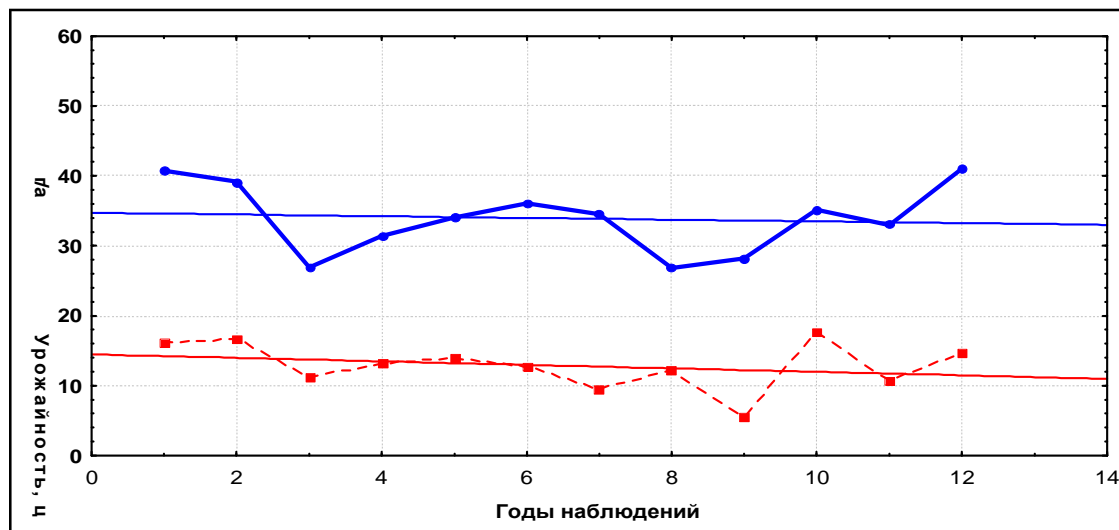


Рис. 1. Соответствие статистических данных (пунктирная кривая) и результатов моделирования (сплошная кривая) по Нижегородской области за 1969-1984 гг.

Другим примером является согласование результатов моделирования урожайности зерновых культур, полученных с помощью уравнений регрессии на основе базы данных Геосети и региональных оценок (рис. 2 и 3).

Для Нижегородской области за последние 37 лет снижение урожайности составляет 1,5-2 ц/га для всего массива данных. Устойчивые прибавки урожая обеспечиваются при росте доз N удобрений до 150 кг/га. Для почв с меньшей степенью окультуренности снижение составляло 2-2,5 ц/га, оптимальной дозой N в этом случае оказывается 100 кг/га. Для Владимирской области снижение эффективности применения N удобрений может достигать 3-4 ц/га. Оценка локальной изменчивости эффективности доз азотных удобрений, вносимых под яровой ячмень (на примере Московской области) показывает слабо выраженный положительный тренд климатообусловленной урожайности - около 1 ц/га за 37 лет, наиболее проявляющийся при дозах до 60 кг/га N, что может быть обусловлено наблюдаемым положительным трендом осадков за апрель-май. Те же закономерности наблюдаются на карте, в основу которой положены зависимости возможно-

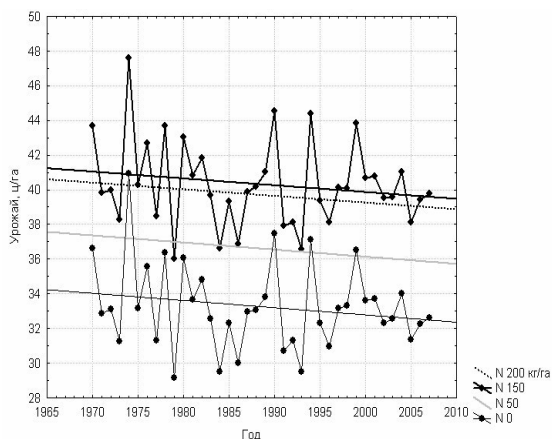
го изменения эффективности применения азотных удобрений за счет наблюдаемых изменений климата с использованием данных 69 станций Геосети, Госсортсети и Госкомгидромета, привлеченных А.П. Федосеевым [4] для оценки средней эффективности удобрений и данные гидрометеорологических наблюдений по 455 станциям на территории бывшего СССР за период с 1975 по 2004 г. [2] (рис. 3).

ВЫВОДЫ

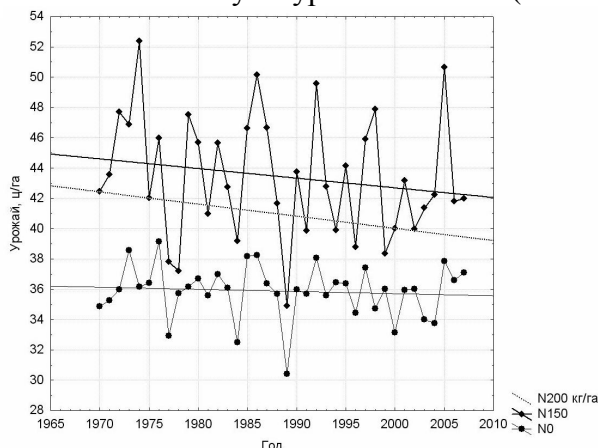
Представляемая методология позволяет оценить влияние наблюдаемых изменений климата на продуктивность основных сельскохозяйственных культур, повысить точность среднесрочного прогнозирования урожайности и окупаемости агрохимических средств при заданных параметрах систем сельскохозяйственного производства, оценить возможность ведения устойчивого земледелия для отдельных культур.

На основе статистических моделей, в которых учитывается роль климатических факторов формирования урожая, данные Географической сети опытов с удобрениями могут быть исполь-

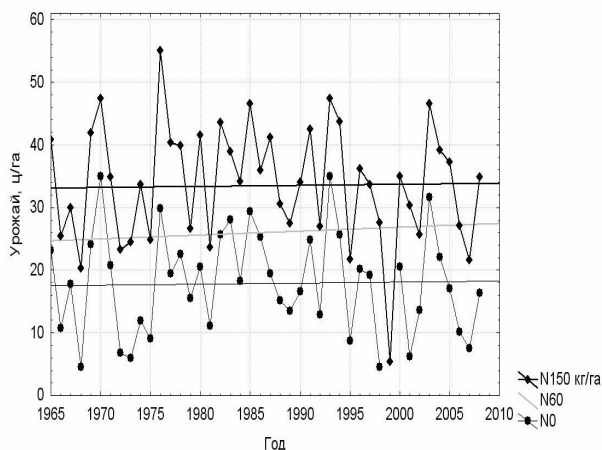
Нижегородская область, общая выборка (пшеница)



Нижегородская область, слабокультуренные почвы (пшеница)



Центральная опытная станция, Московская область (ячмень)



Владимирская область (пшеница)

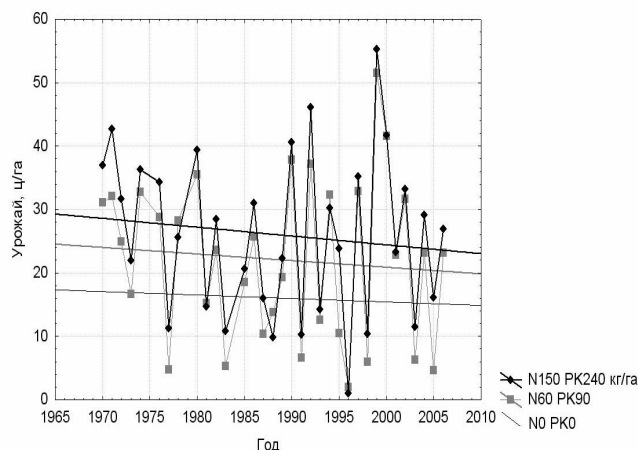


Рис. 2. Динамика рассчитанной в соответствии с уравнениями множественной регрессии (табл. 2) по метеорологическим данным урожайности и соответствующие многолетние линейные тренды для заданных доз минеральных удобрений и контроля (1970-2007 гг.)

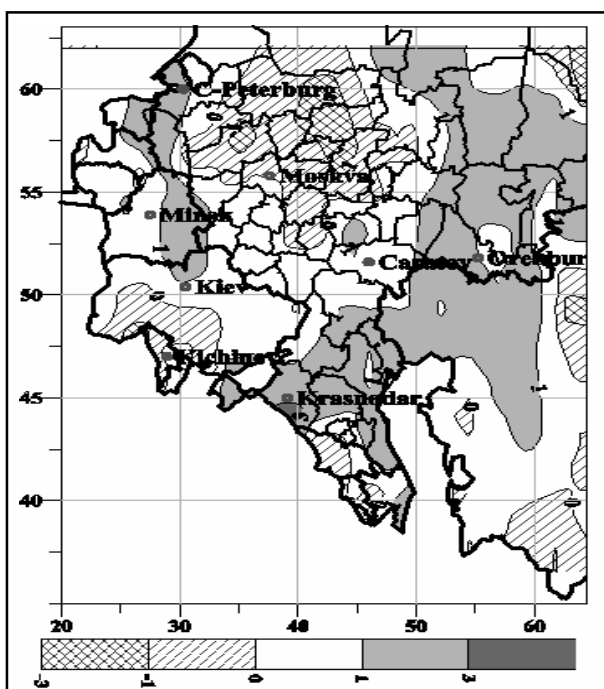


Рис. 3. Влияние климата на изменение средней эффективности применения азотных удобрений под озимые культуры (ц/га) за 1975 – 2004 гг. Рассчитано с использованием данных А.П. Федосеева [4] по базе гидрометеорологических наблюдений 455 станций на территории бывшего СССР за период с 1975 по 2004 г.

зованы для создания равномерной сетки ежегодных оценок урожайности при разной степени окультуренности почв и дозах применяемых удобрений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-05-13600.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1. Изменения климата. М : Рос-

- гидромет, 2008. 227 с.
2. Романенков В.А., Сиротенко О.Д. Значение длительных полевых опытов в разработке мер по адаптации агроценозов к изменениям климата // Экологические функции агрохимии в современном земледелии. Материалы Всерос. совещ. М., 2008 г. С. 233-236.
3. Сиротенко О.Д. Имитационная система Климат-Урожай СССР // Метеорология и гидрология. 1991. № 4. С. 67-73.
4. Федосеев А.П. Агротехника и погода. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 240 с.

EXPERIENCE OF GRAIN CROPS PRODUCTIVITY MODELLING FOR THE NONCHERNOZEM ZONE OF RUSSIA ON THE BASIS OF THE GEOGRAPHICAL NETWORK OF EXPERIENCES WITH FERTILIZERS DATA

© 2009 V.A. Romanenkov¹, O.D. Sirotenko², M.V. Belichenko¹, V.N. Pavlova²

¹ The All-Russian scientific research institute of agrochemistry named after D.Prjanishnikov, Moscow, viua@online.ru

² The All-Russian scientific research institute of agricultural meteorology, 2Obninsk, vnp2003@bk.ru

Crop productivity models for winter wheat and spring barley, considering interaction of climatic factors, soil conditions and different rates of mineral fertilizers for the Nizhniy Novgorod, Vladimir, Moscow areas are created. Coincidence of the modeling results on the basis of the different data sources allows using the data of the Geographical network of experiences with fertilizers for calculation of a uniform grid of crop productivity estimates.

Keywords: *model, productivity, fertilizers, grain crops*