

ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА

© 2018 Л.С. Шарая¹, П.А. Шарый², О.В. Рухович³¹ Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти² Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино³ Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, г. Москва

Статья поступила в редакцию 06.07.2018

Изучение влияния климата, почв и рельефа на урожайность озимой пшеницы в Нечерноземной зоне России выявило, что ведущим природным фактором является микроклимат, который определяется освещенностью мезосклонов. Пространственные вариации рельефа, климата и почв объясняли 74–76% дисперсии урожайности, а вариации только рельефа – 40%. Показано, что на более освещенных мезосклонах урожайность в 1,6–1,9 раз выше. Построены модели урожайности озимой пшеницы на базовый период и на 2050 г. с использованием прогнозной климатической модели НАСА GISS Model E. В пространственные модели введен новый фактор, климатический инвариант, представляющий собой составленное по определенным правилам сочетание осадков февраля и температуры весны. Этот фактор отражает важную для урожаев хронологическую последовательность климатических факторов. Пространственная гетерогенность прогнозируемой урожайности существенна и определена не только климатом, но и освещенностью мезосклонов. Учет последней может быть важен при планировании посевных площадей в условиях изменения климата к 2050 г.

Ключевые слова: озимая пшеница, пространственное распределение урожайности, множественная регрессия, прогнозная климатическая модель, рельеф, прогноз урожайности, WorldClim

ВВЕДЕНИЕ

По данным Росгидромета [1], в России в 1976–2012 гг. наблюдается стабильный линейный тренд роста годовой температуры со средней по стране скоростью 0,43°C за 10 лет (0,55°C/10 лет в Московской области, в Запоярье до 0,9°C/10 лет). Такие скорости больше среднего по суше Земли 0,17°C/10 лет [1]. С этим связана актуальность адаптации сельского хозяйства в России к изменению климата в XXI веке. Согласно глобальным оценкам [2], потепление с 1981 г. до 2002 г. привело из-за снижения урожаев пшеницы, кукурузы и ячменя к потерям примерно 5 миллиардов долларов ежегодно. Для США показано, что адаптация может уменьшить потери к 2100 г. до одной трети [3]. Полагают, что хотя относительно недорогие изменения (сдвиг дат посевов, переход к другим существующим сортам) смягчат негативные воздействия, эффективнее будут более дорогие меры, включая разработку новых сортов и расширение ирригации [4].

Шарая Лариса Станиславовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории ландшафтной экологии. E-mail: l_sharaya@mail.ru

Шарый Петр Александрович, доктор биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химии почв. E-mail: p_shary@mail.ru

Рухович Ольга Владимировна, доктор биологических наук, главный научный сотрудник. E-mail: o_rukhovich@mail.ru

Хотя иногда используют основанные на процессах (process-based) модели урожаев, они обычно требуют большого набора данных о сортах, управлении полями, почвенных условиях, характеристиках погоды (обычно ежедневных) и т.п., которые часто недоступны. Поэтому используют искусственные данные, такие как генератор погоды, а также сравнивают результаты таких моделей с результатами эмпирико-статистических (inventory-based) моделей [5]. Первые позволяют, в принципе, понять ведущие механизмы, а вторые – получить более надежные результаты от прямых сравнений измеренных данных. Главное достоинство эмпирико-статистических моделей – их прозрачная оценка неопределенности. Например, если модель плохо представляет отклик урожая на климат, то это отражается низким коэффициентом детерминации R^2 . При сравнении урожаев с одним лишь климатом типичны низкие R^2 [6]. Но помимо климата, урожаи также зависят от солнечной радиации и свойств почв, что следует учитывать в анализе. Получаемая полями солнечная радиация зависит от перпендикулярности падения солнечных лучей на земную поверхность и меняется на склонах разной экспозиции и крутизны, то есть зависит от рельефа. Этот вопрос изучен недостаточно.

Целью работы является построение пространственно-временных моделей урожайности озимой пшеницы с учетом влияния климата, типов почв, а также рельефа: насколько велика

роль мезорельефа? В отношении используемых климатических показателей ставилась также задача введения в модель температур и осадков одновременно, в том числе – учета важной для сельскохозяйственных культур хронологической последовательности их действия. Трудность их использования состоит в том, что между ними нередко наблюдается значимая связь, в то время как факторы среды в моделях множественной регрессии должны быть независимы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Пространственное распределение характеристик климата можно использовать как статистически достоверное лишь для достаточно больших участков, на которых закономерное изменение климатических факторов больше, чем ошибки в них. Поэтому размеры участка исследования были выбраны примерно $3^{\circ}4'$, рис. 1.

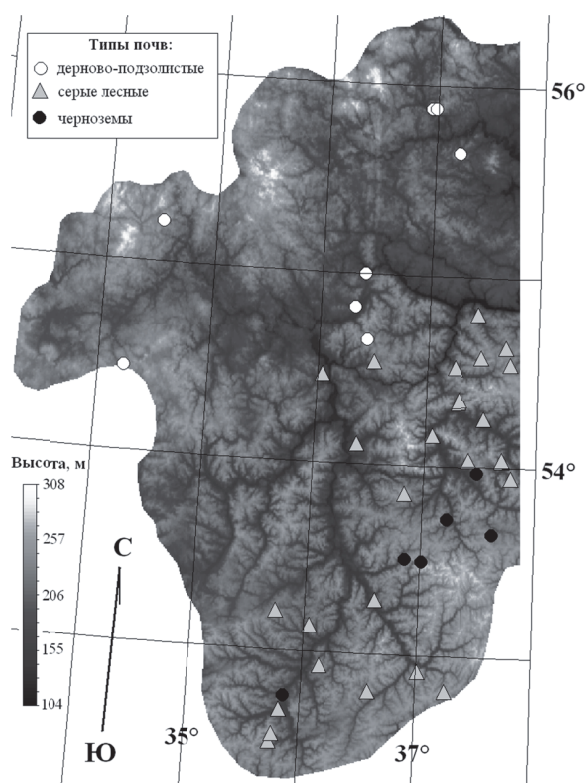


Рис. 1. Расположение 41 точки наблюдения в западной части Окского бассейна

Характеристики климата, усредненные за 1950–2000 гг., взяты из глобальной базы данных WorldClim [7] разрешения 30^2 (900 м по меридиану), полученной интерполяцией данных метеостанций по широте, долготе и высоте. Эти характеристики включают в себя температуры и осадки каждого месяца, среднегодовые, а также различные другие показатели, такие как коэффициент вариации осадков, стандартное отклонение температуры, температура наиболее влажного и сухого времени года. По этим данным мы рассчитывали также сумму активных температур $> 10^{\circ}\text{C}$. Разрешение матриц всех факторов среды (климата, рельефа и почв) взято 600 м в проекции Каврайского для Европейской части РФ. Данные о рельефе взяты из SRTM30 [8], о почвах – с почвенной карты М 1 : 2,5 млн., об урожайности озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. в 41 точке наблюдения (то есть на площадках размером около 50 м) – из базы данных «Агрогеос» [9]. Характеристики мезорельефа рассчитывались по методике [10].

В качестве характеристики урожая использовалась усредненная по годам максимальная прибавка к урожаю озимой пшеницы (далее – прибавка), которая есть разность между максимальным урожаем, полученным при применении оптимальной дозы удобрений, и урожаем без внесения удобрений – контролем. Это позволяет уменьшить роль истории полей и увеличить тесноту связи прибавки с факторами среды, поскольку элиминирует влияние агротехнических приемов и севооборотов, отраженных в обоих членах разности. Выбор прибавки также освобождает анализируемую величину от привязки к дозам вносимых удобрений. Средняя по точкам наблюдения прибавка составляла 60% от контроля (табл. 1).

Относительная освещенность склонов $F(a,b)$, описывающая перпендикулярность падения солнечных лучей на земную поверхность и пропорциональная интенсивности прямо падающего солнечного излучения [10], есть характеристика рельефа, зависящая от крутизны и экспозиции склонов, но она также зависит от склонения Солнца над горизонтом a и его азимута b . Обычно освещенность выражается в процентах, когда за 100% берется перпендику-

Таблица 1. Показатели урожайности для разных типов почв в западной части бассейна р. Оки

Средние по точкам наблюдения значения	Дерново-подзолистые	Серые лесные	Черноземы	Все точки наблюдения
1. Контроль, ц/га	20,7	19,7	20,6	19,6
2. Максимальный опыт, ц/га	30,4	31,8	29,5	31,3
3. Прибавка, ц/га	9,7	12,1	8,9	11,7
4. Прибавка, % от контроля	46,8	61,4	43,2	59,7

лярное падение солнечных лучей. Но ее также можно выразить в энергетических единицах, разделив значения в % на 100 и умножив на солнечную постоянную на уровне моря, равную 2100 Вт/м².

Возможность изменять углы a и b в компьютерной программе оказывается важной при статистических сравнениях. В северном полушарии почвы больше прогреваются не в полдень ($b = 180^\circ$), а позднее, чему отвечает юго-западный азимут Солнца ($b = 225^\circ$). Изменяя b в программе, можно найти максимум в зависимости коэффициента корреляции между температурой почвы и освещенностью от азимута. Подобный максимум для юго-западного азимута показан, например, в зависимости коэффициента корреляции между зеленой массой напочвенного покрова и освещенностью от углов a и b , при очень слабой зависимости от a [11].

Статистический анализ. Мы использовали множественную регрессию, связывающую прибавку X с факторами среды Y_i уравнением вида

$$X = a_0 + a_1 Y_1 + a_2 Y_2 + a_3 Y_3 + a_4 Y_4, \quad (1)$$

где регрессионные коэффициенты a_i вычисляются из статистических сравнений [12]. Число независимых переменных Y_i фиксировалось как равное 4, так как при большем количестве факторов среды некоторые из них обычно оказываются незначимыми [13]. Из всех факторов среды отбирались те четыре независимых, для которых R^2 был наибольшим. Независимость предикторов Y_i оценивалась по описанному в работе [13] критерию. Нормальность распределения остатков и постоянство дисперсии оценивались известными методами, см. [11]. Предиктор Y_i может быть также квадратом фактора среды или перекрестным членом. Статистическая значимость каждого предиктора в финальной модели оценивалась с помощью t -статистик Стьюдента [12]. В правой части уравнения регрессии предикторы упорядочены по убыванию значимости, так что слева стоит наиболее значимый.

Неколичественные факторы среды, такие как типы почв, требуют особого описания [12]. В нашем случае имеется три типа почв (Рис.1), которые можно описать двумя индикаторными переменными (индикаторами, принимающими два дискретных значения, обычно 0 и 1), определенными согласно табл. 2.

Значению $Is = 1$ отвечает серая лесная почва, а $Id = 1$ – дерново-подзолистая. В данной точке невозможно $Is = Id = 1$, так как почва в ней не может быть одновременно серой лесной и дерново-подзолистой, но $Is = Id = 0$ возможно и отвечает черноземам.

Каждая полученная модель проходила верификацию, то есть проверку ее эффективности в новых точках, отличных от точек наблюдения. Верификация проводилась по методике кросс-валидации Аллена [12], дающей для новых точек «предсказательный» коэффициент детерминации R^2_{pr} , который меньше R^2 . Ухудшение работы модели в новых точках наблюдения описывает показатель деградации $Degr = (R^2/R^2_{pr} - 1) \times 100\%$; модель считалась успешно прошедшей верификацию при выполнении критерия [13]

$$Degr < 50\%. \quad (2)$$

Прогнозные модели. Для построения прогнозных моделей необходимы данные об изменении климата к прогнозному сроку, в нашем случае к 2050 г. Для получения таких данных мы использовали климатическую модель НАСА GISS Model E.

Расчеты и построение карт проводились с помощью разработанной П.А. Шарым программы «Аналитическая ГИС Эко», версия 1.08г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученная для базового периода модель есть

$$\begin{aligned} \text{Прибавка} &= 4,269 \times F(35^\circ, 230^\circ) + 3,117 \times P_{\text{фев}} + \\ &+ 0,3771 \times Id \times P_{\text{фев}} - 0,3034 \times P_{\text{год}} - 138,6, \\ R^2 &= 0,740 \quad (Degr = 6,9\%), P < 10^{-6}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $P_{\text{фев}}$ и $P_{\text{год}}$ – осадки февраля и годовые, соответственно. Программой выбрана освещенность с юго-запада $F(35^\circ, 230^\circ)$. Все предикторы значимы, а деградация $Degr$ удовлетворяет критерию (2), то есть модель может использоваться для анализа и построения карты. Эта модель объясняет учтенными в ней факторами среды 74% дисперсии прибавки.

Главным фактором среды в модели (3) является освещенность склонов с юго-запада, что говорит о высокой чувствительности прибавки к солнечному свету. Знак этой связи положитель-

Таблица 2. Описание трех типов почв двумя индикаторами

Значения индикаторов		Типы почв
Индикатор Is	Индикатор Id	
0	0	Чернозем
1	0	Серая лесная
0	1	Дерново-подзолистая

лен, то есть большей освещенности отвечают большие значения прибавки. Парное сравнение показывает, что одна лишь освещенность с юго-запада объясняет 40% дисперсии прибавки.

Влияние осадков февраля проявляется в защите озимой пшеницы от вымерзания [14]. Парная связь здесь, однако, значительно слабее: 19% дисперсии прибавки объясняется осадками февраля. Третий член модели (3) показывает, что влияние осадков февраля дополнительно увеличено на севере региона, в зоне дерново-подзолистых почв. Однако модель ничего не говорит о том, в чем выражается при этом роль почв. Хотя среднегодовые осадки отрицательно связаны с прибавкой, парная связь здесь еще менее тесная: лишь 9% дисперсии прибавки объясняется суммой годовых осадков. В целом, влияние одних лишь климатических факторов объясняет сравнительно мало ($< 48\%$), что согласуется с литературными данными, как уже отмечалось во введении. Распределение прибавки по территории показано на рис. 2.

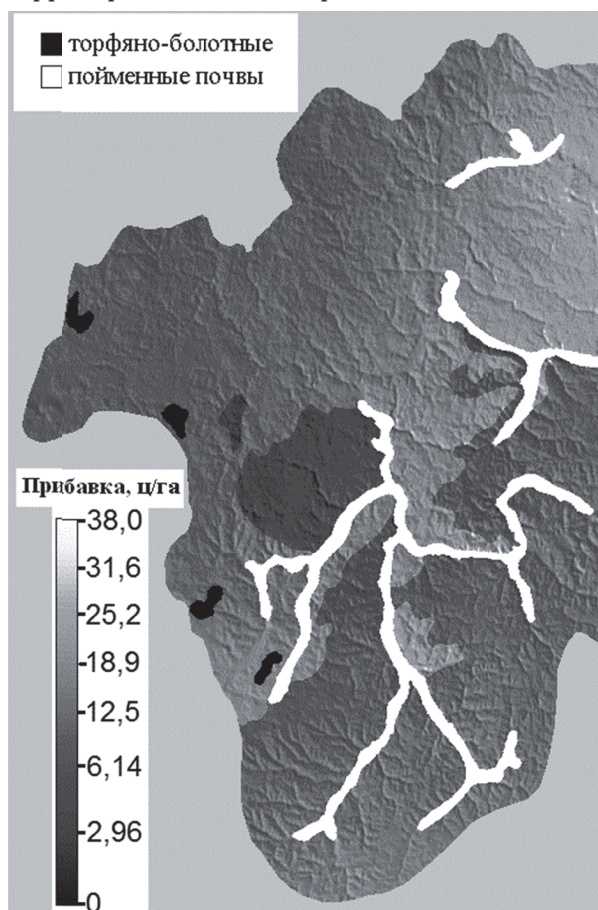


Рис. 2. Пространственное распределение прибавки, рассчитанное по модели (3).

Торфяно-болотные и пойменные почвы исключались из рассмотрения, поскольку в них не было точек наблюдения

Как отмечено во введении, описываемая относительной освещенностью склонов роль

перераспределения света и тепла по склонам в зарубежной литературе не изучалась. В то же время, как показывает модель (3), освещенность является ведущим фактором.

В работе [15] для достижения резонной статистической значимости для урожая яровой пшеницы в Аргентине использовалось 347 полей и множество факторов, включая органический углерод, азот, фосфор, удобрения, предшествующие культуры, систему вспашки, осадки и т.п. Однако эти факторы смогли объяснить лишь 67% дисперсии урожая.

Прогнозные модели. Рассмотрим два подхода. В первом уравнение (3) можно использовать для построения прогнозной карты будущих значений прибавки к урожаю, если предположить, что при прогнозе до середины текущего века и при относительно слабых (прогнозируемых) изменениях климатических параметров сохранится основной характер зависимости урожая от климата. В этом случае можно заменить $P_{фев}$ и $P_{год}$ в модели (3) на прогнозируемые климатической моделью GISS E для 2050 г. значения $P_{фев50}$ и $P_{год50}$. Для изучаемого региона возрастание осадков февраля по используемой климатической модели составит 12,3% (базовый период – 30,3 мм, 2050 г. – 34,1 мм), для годовых осадков прогнозируется возрастание на 4,4% (базовый период – 653 мм, 2050 г. – 682 мм). Процентное изменение $P_{фев}$ больше изменения $P_{год}$ в 2,8 раза. Поэтому можно ожидать, что позитивные эффекты от увеличения осадков февраля, защищающих пшеницу от морозов, окажутся сильнее негативных эффектов вымокания урожаев при увеличении суммы годовых осадков.

Рассмотрим результаты прогнозных оценок урожайности при изменении только одного климатического фактора, при неизменных остальных. Если для оценки вклада $P_{фев}$ в изменение урожаев положить, что $P_{год50} = P_{год}$, то прогнозируемая средняя прибавка возрастет на 75,5% за счет изменения осадков февраля (от 11,7 до 20,5 ц/га). Если же фиксировать $P_{фев}$, то прогнозируемая средняя прибавка снижается на 63,2% (от 11,7 до 4,3 ц/га), рис. 3.

В описанном подходе мы не учитывали того, что хронологическая последовательность осадков и температуры может быть важна для урожаев. Например, осадки февраля в изучаемом регионе защищают озимые от вымерзания, но если за ними следуют высокие температуры весны, то эта последовательность способствует хорошему сохранению и развитию проростков [16]. Самая благоприятная последовательность – немало осадков в феврале и не низкая температура весной, самая неблагоприятная – мало осадков в феврале и низкая температура весной. Однако эти два показателя тесно связаны между собой, а предикторы должны быть независимы.

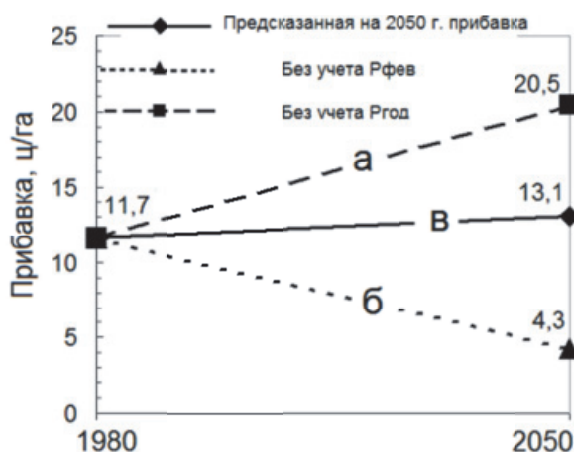


Рис. 3. Прогнозируемое среднее значение максимальной прибавки урожая на 2050 г. при разных вариантах изменения осадков в 2050 г.: возрастают

а) только осадки февраля, б) только годовые

Поэтому в регрессионном анализе можно использовать только один из них. Могла бы быть полезна некая комбинация осадков февраля $R_{фев}$ и температуры весны $T_{вес}$, построенная на объективном принципе и повышающая R^2 .

Такой принцип [17] основан на минимизации коэффициента вариации (CV) для сочетания вида $R_{фев} + a \times (2T_{вес_{ср}} - T_{вес})$, где $T_{вес_{ср}}$ есть среднее по выборке значение $T_{вес}$, а коэффициент a находится из условия минимальности CV для этого сочетания по формуле [17]

$$a = \frac{\bar{Y} + A|r|\bar{X}}{A(A\bar{X} + |r|\bar{Y})}, \text{ где } A = \frac{SD_Y}{SD_X} \text{ и } a > 0. \quad (4)$$

Здесь средние для X (т.е. $R_{фев}$) и Y (т.е. $T_{вес}$) обозначены как $\bar{X}$ и $\bar{Y}$, стандартные отклонения для X и Y – как SD_X и SD_Y , а r есть коэффициент корреляции между X и Y .

Применяя эту формулу, находим $a = 3,313$ мм/°С. Сочетание $INV = R_{фев} + a \times (2T_{вес_{ср}} - T_{вес})$ известно как *инвариант*, так как в идеальном случае $CV = 0$ оно не варьирует в пространстве. В реальном же случае оно варьирует в пространстве меньше, чем $R_{фев}$ или $T_{вес}$ [17]. Действительно, $CV = 2,6\%$ для инварианта, а коэффициенты вариации для $R_{фев}$ или $T_{вес}$ равны 4,2 и 6,4%, соответственно.

Второй подход учитывает хронологическую последовательность смены климатических переменных с помощью инварианта. Используя INV в регрессии, находим для базового периода уравнение

$$\begin{aligned} \text{Прибавка} = & 4,462 \times F(35^\circ, 230^\circ) + 10,20 \times T_{мар, апр} - \\ & - 0,6987 \times P_{лет} + 1,462 \times INV - 153,9, \\ R^2 = & 0,756 \text{ (Degr} = 7,6\%), P < 10^{-6}. \end{aligned} \quad (5)$$

В отличие от модели (3), эта модель учитыва-

ет хронологическую последовательность осадков февраля и температуры весны. Она объясняет несколько больше, чем модель (3), 76% дисперсии прибавки. Здесь $T_{мар, апр}$ есть средняя температура марта и апреля, $P_{лет}$ – осадки лета.

Полученный нами инвариант позволяет решить важный вопрос прогноза: по климатической модели GISS Model E к 2050 г. в регионе изменяются и осадки и температуры, поэтому более корректные оценки будущих урожаев можно получить при учете обоих климатических показателей, тем более что прогноз осадков менее точен, чем прогноз температур [18].

Прогнозируемая моделью (5) к 2050 г. прибавка к урожаю озимой пшеницы возрастет от 11,7 до 14,6 ц/га или на 24,8%. При этом хорошо освещенные склоны, с освещенностью больше средней, будут характеризоваться средним значением прибавки 18,7 ц/га, а слабо освещенные – 11,4 ц/га. На плохо освещенных склонах прибавка будет на 39% меньше, чем на хорошо освещенных. Прогнозируемая прибавка также заметно различается для разных типов почв: увеличивается на дерново-подзолистых до 22,2 ц/га (на 48%), на серых лесных до 13,3 ц/га (на 19%) и для маломощных черноземов до 10,4 ц/га (на 7,6%).

Для всего региона увеличение прибавки для зерна озимой пшеницы вследствие изменения климата составит в среднем 9,3% по модели (5), для зоны дерново-подзолистых почв – 23,8%, для зоны серых лесных – 6,9%, для черноземов юга западной части Окского бассейна – 2,5%.

Учет освещенности мезосклонов при планировании площадей для посевов озимой пшеницы в условиях меняющегося климата может привести к получению больших урожаев. При этом даже малые изменения в освещенности на 5% (примерно на 25 Вт/м²) способны приводить к заметным изменениям урожайности – прибавка возрастает в 1,6–1,9 раз.

Исследования по физике приземных слоев атмосферы показывают [19], что близ земной поверхности турбулентные потоки воздуха осуществляют физическое усреднение температуры воздуха на расстояниях в сотни метров, поэтому для оценки микроклимата формы мезорельефа важнее, чем микрорельефа. Выбранное нами разрешение (600 м) вполне подходит для учета мезорельефа и микроклимата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рельеф, введенный в анализ для тестирования наравне с характеристиками климата и почв, оказался самым влиятельным фактором. Пространственные вариации рельефа, климата и почв определяли 74–76% дисперсии прибавки к урожайности озимой пшеницы базового

периода. Ведущей характеристикой рельефа была относительная освещенность склонов с юго-запада. Все построенные модели содержали освещенность склонов с юго-запада в качестве наиболее сильно влияющего на прибавку природного фактора. Вариация одного лишь этого фактора на территории Нечерноземной зоны площадью около $3^{\circ}4'$ объясняла 40% дисперсии прибавки к урожаю озимой пшеницы.

Отношение среднего значения прибавки на хорошо освещенных склонах, то есть характеризующихся значениями большими, чем средняя освещенность по выборке, и плохо освещенных, имеющих освещенность ниже средней, составляла для изученного региона 1,8.

Учет хронологической последовательности действия февральских осадков и весенних температур позволил выявить более тесную связь с прибавкой к урожайности. Это также делает прогнозные модели более надежными, так как климатические модели лучше предсказывают температуру, чем осадки, и в прогнозные сроки ожидается изменение обоих показателей.

Методы пространственно-временного моделирования позволяют получать подробные, разрешения 600 м, карты прогнозируемых характеристик урожаев, причем в каждом элементе соответствующих матриц содержатся рассчитанные значения этих характеристик.

Для прогноза характеристик урожая среднее по региону иногда может быть мало информативно. Например, для рассматриваемого региона – западной части бассейна р. Оки – пространственная неоднородность по модели (3) приводит к прогнозу возрастания прибавки к урожаю на севере и убывания на юге; в регионе же в целом она могла бы иметь любой знак. Выявлена существенная пространственная «коротковолновая» гетерогенность. Такая гетерогенность прогнозируемой прибавки определяется в основном не более плавным («длинноволновым») изменением климатических характеристик, а мезосклонами разной освещенности. Методы пространственно-временного моделирования и карты, рассчитанные с их помощью, дают более подробную и корректную картину ожидаемых изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Росгидромет, 2014. 58 с.
2. Lobell D.B., Field C.B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming // *Environmental Research Letters*. 2007. V. 2. P. 014002.
3. Huang K. The economic impacts of global warming on US agriculture: the role of adaptation. Working

Paper No. 2016-03, February 2016. The University of Adelaide. 40 p.

- 4] Lobell D.B., Burke M.B., Tebaldi C., Mastrandrea M.D., Falcon W.P., Naylor R.L. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030 // *Science*. 2008. V. 319. P. 607-610.
5. Lobell D.B., Burke M.B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2010. doi:10.1016/j.agrformet.2010.07.008
6. Lobell D.B., Burke M.B. Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation // *Environmental Research Letters*. 2008. V. 3. P. 034007.
7. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.J., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // *International Journal of Climatology*. 2005. V. 25. P. 1965-1978.
8. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, 2005. 143 p.
9. Сычев В.Г., Рухович О.В., Романенков В.А., Беличенко М.В., Листова М.П. Опыт создания единой систематизированной базы данных полевых опытов Агрохимслужбы и Геосети «Агрогеос» // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2008. № 3. С. 35-38.
10. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. V. 107. P. 1-32.
11. Шарый П.А., Рухович О.В., Шарая Л.С. Методология анализа пространственной изменчивости характеристик урожайности пшеницы в зависимости от условий агроландшафта // *Агрохимия*. 2011. № 2. С. 57-81.
12. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
13. Шарый П.А., Пинский Д.Л. Статистическая оценка связи пространственной изменчивости содержания органического углерода в серой лесной почве с плотностью, концентрацией металлов и рельефом // *Почвоведение*. 2013. № 11. С. 1344-1356.
14. Куперман Ф.М. Физиология устойчивости пшеницы // Генкель П.А. (ред.) Физиология сельскохозяйственных растений. Том IV. Физиология пшеницы. М.: Изд-во МГУ, 1969. С. 401-497.
15. Alvarez R., Grigera S. Analysis of soil fertility and management effects on yields of wheat and corn in the Rolling Pampa of Argentina // *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2005. V. 191. P. 321-329.
16. Физиология сельскохозяйственных растений. Том IV. Физиология пшеницы. Под ред. Генкель П.А. М.: Изд-во МГУ, 1969. 555 с.
17. Шарый П.А. Ряды стабильностей пар элементов в серой лесной почве // Биосферные функции почвенного покрова. Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 40-летию Института физико-химических и био-

- логических проблем почвоведения РАН. Пушкино: SYNCHROBOOK, 2010. Часть 3. С. 347-349.
18. *Burke M., Dykema J., Lobell D.B., Miguel E., Satyanath S.* Incorporating climate uncertainty into estimates of climate change impacts // *The Review of Economics and Statistics*. 2015. V. 97. P. 461-471.
19. *Floors R., Peña A., Gryning S.E.* The effect of baroclinicity on the wind in the planetary boundary layer // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2015. V. 141. P. 619-630.

FORECAST EVALUATION OF WINTER WHEAT PRODUCTIVITY USING TOPOGRAPHY

© 2018 L.S. Sharaya¹, P.A. Shary², O.V. Rukhovich³

¹ Institute of Volga Basin Ecology, Togliatti

² Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Pushchino

³ All-Russian Scientific Research Institute of Agronomy named after D.N. Pryanishnikov, Moscow

As demonstrated in this study of influence of climate, soils and topography on winter wheat productivity in the non-chernozem zone of Russia, the leading environmental factor was microclimate as defined by insolation of meso-slopes. Spatial variations of topography, climate and soils explained 74–76% of the variance in crop yields, while topography alone explained 40%. It was shown that yields are greater on more illuminated slopes by 1.6–1.9 times. Models of winter wheat productivity for the base period and by the year 2050 are constructed with the use of NASA's climatic GISS Model E. A new variable, climatic invariant, was introduced for spatial models that describes a combination of February precipitation and spring temperature composed using certain rules. This variable describes a chronological consequence of climatic factors that is important for yields. The spatial heterogeneity of projected yields is essential and is defined not only by climate, but by slope insolation as well. Taking the latter into account may be important for planning of field locations for the conditions of climate change by the year 2050.

Keywords: winter wheat, spatial distribution of yields, multiple regression, predictive climatic model, topography, productivity forecast, WorldClim

Larisa Sharaya, Candidate of Biology.

E-mail: l_sharaya@mail.ru

Peter Shary, Doctor of Biology. E-mail: p_shary@mail.ru

Olga Rukhovich, Doctor of Biology.

E-mail: o_rukhovich@mail.ru