

ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ С УЧЕТОМ РЕЛЬЕФА, КЛИМАТА И ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВЫ

*О.В. Рухович, д.б.н., С.И. Шкуркин, к.ю.н.,
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии
имени Д.Н. Прянишникова»
127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 31а*

Изучение влияния климата, типа и гранулометрического состава серых лесных почв, а также рельефа на урожайность озимой пшеницы в Нечерноземной зоне России на протяженных участках местности осуществляется с использованием базы данных Геосети «Агрогеос». Выявлено, что ведущим природным фактором является микроклимат, который определяется освещенностью мезосклонов. Пространственные вариации рельефа, климата, типа почв и их гранулометрического состава объясняли 74–78% 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.

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

Для цитирования: Рухович О.В., Шкуркин С.И. Прогнозные оценки урожайности озимой пшеницы с учетом рельефа, климата и гранулометрического состава почвы// Плодородие. – 2021. – №6. – С. 3–5.
DOI: 10.25680/S19948603.2021.123.01.

Для изучения влияния природных факторов – рельефа, климата, гранулометрического состава почв – используют эмпирико-статистические модели урожайности, главное достоинство которых очевидная оценка неопределенности [1]. Например, если модель плохо описывает отклик урожая на климат, то это выражается низким коэффициентом детерминации R^2 . При сравнении урожаев с одним лишь климатом типичны низкие R^2 [2]. Но, помимо климата, урожайность также зависит 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, т. е. зависит от рельефа. В работе [11] для достижения статистической значимости для урожая яровой пшеницы в Аргентине использовали 347 полей и множество факторов, включая органический углерод, азот, фосфор, удобрения, предшествующие культуры, систему вспашки, осадки и др. Однако эти факторы смогли объяснить лишь 67% дисперсии урожая. Вопрос влияния природных факторов на урожайность сельскохозяйственных культур изучен недостаточно.

Целью нашей работы – построить пространственно-временные модели урожайности озимой пшеницы с учетом влияния климата, типа и гранулометрического состава почвы, а также рельефа. Установить насколько велика роль мезорельефа.

Методика. Для анализа особенностей пространственного распределения различных показателей урожая на протяженных (сотни километров) участках местности необходимы данные урожайности на опытных полях, имеющих точные географические координаты и расположенных в пределах изучаемой территории. Для этих целей использовали единую электронную базу данных результатов полевых опытов с удобрениями Агрохимической службы и Геосети – БД «Агрогеос».

Для моделирования пространственного распределения различных показателей урожая в агроландшафтах с рельефом из базы данных «Агрогеос» были отобраны и проанализированы материалы полевых опытов с озимой пшеницей, проводившихся в разные годы и расположенных в бассейне реки Оки. Бассейн реки Оки является относительно замкнутой природной системой, а для ее составляющих характерны взаимозависимость и взаимодействие.

Данные о рельефе взяты из SRTM30 [4], о почвах – с почвенной карты М 1 : 2,5 млн, об урожайности озимой пшеницы – в 27 точках наблюдения, а также характеристики свойств серых лесных почв в этих точках – из базы данных «Агрогеос» [5]. Характеристики мезорельефа рассчитывали по методике [6].

Характеристики климата, усредненные за 1950–2000 г., взяты из глобальной базы данных WorldClim [3] разрешения 900 м по меридиану, полученной интерполяцией данных метеостанций по широте, долготе и высоте. Эти характеристики включают в себя температуру 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 рассчитывали также сумму активных температур $> 10^\circ\text{C}$. Разрешение матриц всех природных факторов (климата, рельефа и почв) было 600 м в проекции Каврайского для европейской части России. 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. Исследования по физике приземных слоев атмосферы показывают [12], 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 разрешение (600 м) вполне подходит для учета мезорельефа и микроклимата.

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 характеристиками природных факторов, поскольку освобождает от привязки к дозам вносимых удобрений и применяемым севооборотам. Средняя по точкам наблюдения прибавка составляла 60% от контроля (табл. 1).

1. Урожайность на разных типах почв в западной части бассейна р. Ока

Показатель	Дерново-подзолистые почвы	Серые лесные почвы	Черноземы	Все точки наблюдения
Контроль, ц/га	20,7	19,7	20,6	19,6
Максимальная урожайность, ц/га	30,4	31,8	29,5	31,3
Прибавка: ц/га	9,7	12,1	8,9	11,7
% к контролю	46,8	61,4	43,2	59,7

Относительная освещенность склонов $F(a, b)$. Описывает перпендикулярность падения солнечных лучей на земную поверхность и пропорциональна интенсивности прямого падающего солнечного излучения [6]. Это есть характеристика рельефа, зависящая от крутизны и экспозиции склонов, но также и от склонения Солнца над горизонтом a и его азимута b . Обычно освещенность выражают в процентах, когда за 100% принимается перпендикулярное падение солнечных лучей. Но ее также можно выразить в энергетических единицах, разделив значения в % на 100 и умножив на солнечную постоянную над уровне моря, равную 2100 Вт/м².

Статистический анализ. Была использована множественная регрессия, связывающая прибавку X с факторами среды Y_i уравнением

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

где регрессионные коэффициенты a_i вычисляют из статистических сравнений [8]. Число независимых переменных Y_i фиксировалось как равное 4, так как при большем количестве факторов среды некоторые из них обычно незначимы [9]. Из всех факторов среды отбирали также четыре независимых, для которых R^2 был наибольшим. Независимость предикторов Y_i оценивали по описанному в работе [9] критерию. Нормальность распределения остатков и постоянство дисперсии оценивали известными методами [7]. 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 [8]. В правой части уравнения регрессии предикторы упорядочены по убыванию значимости, так что слева стоит наиболее значимый.

Неколичественные факторы среды, такие как гранулометрический состав, требуют особого описания [8].

Для учета гранулометрического состава использовали индикатор I_{ss} , который полагали равным 1 для среднего суглинка и 0 для тяжелого и легкого суглинков (табл. 2).

2. Индикаторы гранулометрического состава

Индикатор		Гранулометрический состав
I_{ss}	I_{ds}	
0	0	Легкий суглинок
1	0	Средний суглинок
0	1	Тяжелый суглинок

Каждая полученная модель проходила верификацию, т. е. проверку ее эффективности в новых точках, отличных от точек наблюдения. Верификацию проводили по методике кросс-валидации Аллена [8], дающей для новых точек «предсказательный» коэффициент детерминации R^2_{Pr} , который меньше R^2 . Ухудшение работы модели в новых точках наблюдения описывает показатель деградации $Degr = (R^2/R^2_{Pr} - 1) \cdot 100\%$; модель считалась успешно прошедшей верификацию при выполнении критерия [13]:

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

Расчеты моделей проводили с помощью программ «Аналитическая ГИС Эко», версии 1.08г и «R2».

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим 27 точек наблюдения, находящихся в зоне серых лесных почв бассейна реки Ока. Регрессионная модель такова:

$$\begin{aligned} \text{Прибавка} = & 5,107 \cdot F(230) + 0,00006 P_{\text{июнь+июль}} - \\ & - 8,867 \cdot kh^{\text{II}} - 2,178 \cdot I_{ss} kh + 268,164, \\ R^2 = & 0,788; P < 10^{-5}; R^2_{\text{Pred}} = 0,718. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $F(230)$ – освещенность склонов с юго-запада, $P_{\text{июнь+июль}}$ – средняя многолетняя сумма осадков июня и июля, kh – максимальная кривизна, описывающая механизм аккумуляции в плане, индикатор I_{ss} описывает гранулометрический состав (1 – средний суглинок, 0 – остальные).

Статистическая связь здесь весьма тесная, изменчивость факторов среды объясняет 78,8% изменчивости в максимальной прибавке к урожаю. Рассмотрим факторы среды, вошедшие в (3).

Главным природным фактором, влияющим на прибавку урожайности, является освещенность склонов с юго-запада $F(230^\circ)$, рассчитанная для мезорельефа.

Второй ведущий природный фактор – средняя многолетняя сумма осадков июня и июля ($P_{\text{июнь+июль}}$). Связь максимальной прибавки с ней положительная, т. е. прибавка увеличивается с ростом осадков этого периода. На заметную роль осадков летних месяцев указывают также результаты работы [13], показывающие отрицательную связь урожая озимой пшеницы с осадками августа в Канаде.

Третьим ведущим природным фактором является горизонтальная кривизна земной поверхности kh . Значения этой МВ описывают 1 механизм аккумуляции [15]. Отрицательная связь максимальной прибавки к урожаю с kh означает, что прибавка уменьшается в зонах смыва дождевых и талых вод.

Четвертым ведущим природным фактором является индикатор I_{ss} , различающий средний суглинок от остальных видов гранулометрического состава – легкого и тяжелого суглинков, точнее произведение $I_{ss} kh$. Поскольку связь максимальной прибавки с $I_{ss} kh$ отрицательна, то для среднесуглинистых почв связь с зонами смыва выражена слабее, чем для почв с другим гранулометрическим составом. Действительно, рассмотрим в (3) ветвь решения, отвечающую среднесуглинистой почве, т. е. $I_{ss} kh = 1$. Это дает уравнение

$$\begin{aligned} \text{Прибавка} = & 5,107 \cdot F(230) + 0,00006 P_{\text{июнь+июль}} - \\ & - 11,045 \cdot kh + 268,164, \end{aligned} \quad (3')$$

в котором коэффициент при kh отрицателен, но меньше по абсолютной величине, чем коэффициент при kh в (3). Для отвечающей остальным видам гранулометрического состава ветви решения $Iss = 0$, и модель (3) принимает вид

$$\text{Прибавка} = 5,107 \cdot F(230) + 0,00006 P_{\text{июнь+июль}} - 8,867 \cdot kh + 268,164 \quad (3'')$$

Отсюда видно, что для остальных видов гранулометрического состава коэффициент регрессии при kh также отрицателен, но меньше по абсолютной величине, т.е. зоны смыва дождевыми и тальными водами в рельефе для прибавки урожая играют менее существенную роль.

Отметим, что для серых лесных почв в список ведущих предикторов модели (3) вошел индикатор гранулометрического состава. Это говорит о том, что среднесуглинистые серые лесные почвы могут иметь свои специфические особенности, которые особо важны для увеличения эффективности применения удобрений.

Заключение. 1. Методы пространственно-временного моделирования позволяют получать подробные (разрешение 600 м) карты прогнозируемых характеристик урожая, причем в каждом элементе соответствующих матриц содержатся рассчитанные значения этих характеристик.

2. Рельеф, введенный в анализ для тестирования наравне с характеристиками климата и гранулометрического состава серых лесных почв, оказался самым влиятельным фактором. Ведущей характеристикой рельефа была относительная освещенность склонов с юго-запада. Построенная модель содержала освещенность склонов с юго-запада в качестве природного фактора, наиболее сильно влияющего на величину прибавки. Вариация одного лишь этого фактора на территории Нечерноземной зоны площадью охвата около $3^\circ \times 4^\circ$ объясняла 40% дисперсии прибавки урожая озимой пшеницы.

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

4. Гранулометрический состав серых лесных почв особо важен для увеличения эффективности применения удобрений. Наиболее благоприятны для увеличения прибавки среднесуглинистые почвы.

Литература

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Сычев В.Г., Рухович О.В., Романенков В.А., Беличенко М.В., Лустова М.П. Опыт создания единой систематизированной базы данных полевых опытов Агрохимслужбы и Геосети «Агрогеос» // *Проблемы агрохимии и экологии*. – 2008. – № 3. – С. 35-38.
6. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. 2002. V. 107. P. 1-32.
7. 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.
8. Montgomery D.C., Peck E.A. Introduction to Linear Regression Analysis. New York: John Wiley & Sons, 1982. 504 p.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Cabas J., Weersink A., Olale E. Crop yield response to economic, site and climatic variables // *Climatic Change*, 2009. – Springer Science: published online 06 November 2009. – DOI 10.1007/s10584-009-9754-4.
14. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*, 2002. – V.107. – № 1-2. – P.1-32.

FORECAST ESTIMATES OF WINTER WHEAT YIELD TAKING INTO ACCOUNT RELIEF, CLIMATE AND GRANULOMETRIC SOIL COMPOSITION

O.V. Rukhovich, Doctor of Biological Sciences, S.I. Shkurkin, Ph.D., Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Agrochemistry" 127434, Moscow, st. Pryanishnikova, 31a

The study of the influence of climate, the type and granulometric composition of gray forest soils, as well as the relief on the yield of winter wheat in the Non-Chernozem zone of Russia in extended areas of the terrain is carried out using the database of the Geonet "Agrogeos". It was revealed that the leading natural factor is the microclimate, which is determined by the illumination of the mesoslopes. Spatial variations in the topography, climate, soil type and their particle size distribution explained 74–78% of the variance in yield, and variations in only the relief - 40%. It is shown that on more illuminated mesoslopes the yield is 1.6-1.9 times higher. Models of winter wheat yield were built.

Key words: winter wheat, spatial distribution of yield, multiple regression, predictive climate model, relief, yield forecast, WorldClim.