

14. *Оптимальное управление поливами на основе современных вычислительных алгоритмов* / В. В. Бородычев, М. Н. Лытов, А. С. Овчинников, В. С. Бочарников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 4(40). – С. 21-28.
15. *Шадских В.А., Кижасева В.Е., Романова Л.Г.* К вопросу влияния орошения на плодородие почв степной и сухостепной зон Поволжья // Орошаемое земледелие. – 2019. – № 4. – С. 46-49.

16. *Агро-мелиоративные приемы восстановления плодородия деградированных и вышедших из оборота сельскохозяйственных земель и пастбищных территорий* / В. А. Шевченко, Э. Б. Дедова, Н. З. Шамсутдинов [и др.]; Под ред. акад. РАН В.А. Шевченко. – М.: ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова, 2022. – 205 с.
17. *Rusakova I.V.* Microbiological and ecophysiological parameters of sod-podzolic soil upon long-term application of straw and mineral fertilizers, the correlation with the yield // Agricultural Biology. – 2020. – V. 55. – N 1. – P. 153-162.

CONCEPTUAL MODELING OF THE BIOGEOCHEMICAL CYCLE OF ORGANIC CARBON AND NITROGEN WITH INTEGRATED PROCESS REGULATORS

V.A. Shevchenko, M.N. Lytov

Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakova

The aim of the study was to develop a conceptual model of the bio-geochemical cycle of organic carbon and nitrogen with integrated process regulators. The research is based on modern ideas about the formation of a small biogeochemical cycle of organic carbon and nitrogen. The model is focused on agroecosystems, which, in addition to natural processes, assume anthropogenic impact and the possibility of implementing regulatory functions. Experimental estimates of the regulatory potential of leguminous soybeans and winter wheat have been obtained, which confirm that no more than 0.83 t/ha of organic carbon enters the soil with crop-root residues. However, this level can be increased 2.3-2.4 times due to the use of aboveground soybean biomass and 5.6 times when using aboveground biomass of winter wheat. The model makes it possible to organize the effective operation of regulators at different levels of the biogeochemical cycle.
Keywords: biogeochemical cycle, organic carbon, nitrogen, model, process regulators

УДК 631.8:633.1:631.559

DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.17

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК УРОЖАЙНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В БАССЕЙНЕ Р. ОКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗНЫХ ДОЗ УДОБРЕНИЙ

Л.С. Шарая^{1*}, О.В. Рухович¹, П.А. Шарый^{1, 2}, А.В. Навров¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова, г. Москва, Россия*

² *Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пушкино, Россия, *E-mail: l_sharaya@mail.ru*

Проведен сравнительный анализ изменений в пространстве характеристик урожайности озимой пшеницы, полученных при применении разных доз удобрений в различных полевых опытах на западе Окского бассейна. С помощью множественной регрессии показано, что урожай озимой пшеницы, полученный на контроле (К), средний урожай (О), при применении разных доз, и максимальный урожай для оптимальных доз удобрений (Ох) зависят от температуры июня и осадков июля. Для О и Ох важен рельеф: они больше на юго-западных склонах. Для прибавок от внесения удобрений О-К и Ох-К важны освещенность и типы почв. Даны полученные от регрессии карты К, О, Ох, О-К и Ох-К.

Ключевые слова: озимая пшеница, пространственная изменчивость, множественная регрессия, удобрения, климат, экспозиция, освещенность склонов.

Для цитирования: Шарая Л.С., Рухович О.В., Шарый П.А., Навров А.В. Сравнительное изучение пространственной изменчивости характеристик урожайности озимой пшеницы в бассейне р. Оки при использовании разных доз удобрений // Плодородие. – 2024. – №5. – С. 80-85. DOI: 10.25680/S19948603.2024.140.17.

Влияние природных факторов на эффективность действия удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур освещалось во многих работах [1-4 и др.]. Показано, что урожайность зерновых культур в многолетних экспериментах на южных склонах была достоверно выше, чем на северных [5, 6]. Отмечалось, что потоки солнечной энергии находятся под влиянием крутизны, азимута и высоты, поскольку ими модифицируется падающая радиация [2]. Используя анализ многочисленных литературных данных, была сформирована концепция агроэкологической неравнозначности склонов [1], различающихся экспозицией.

Ранее нами были рассчитаны пространственные модели урожаев и прибавок урожаев озимой пшеницы в регионе Окского бассейна на основе их связей с

мезорельефом [3]. В полученных моделях климатические характеристики не применяли. Позже на примере прибавки урожая озимой пшеницы проведено пространственное моделирование с помощью множественной регрессии при использовании климата, рельефа и типов почв [7]. Однако, в литературе неизвестны сравнения связей с факторами окружающей среды различных характеристик урожайности (контроля, опыта и прибавки к контролю за счет внесения удобрений), в то время как эти связи могут сильно различаться.

Цель нашего исследования – выявить и сравнить закономерности пространственных изменений в регионе озимой пшеницы с помощью характеристик ее урожайности, различных доз вносимых удобрений при использовании широкого спектра показателей климата и рельефа.

Методика. Изученные выборки по показателям урожайности озимой мягкой пшеницы в 41 полевым опыте размером $50 \times 50 \text{ м}^2$ каждый на западе бассейна р. Оки были сформированы из базы данных «Агрогеос» [8], которая содержит информацию с тысяч опытных участков по всей России за последние 50 лет. На всех полевых опытах культуру выращивали по единой методике при разных дозах удобрений НРК. Расположение опытных площадок показано на рисунке 1.

Используемые характеристики урожайности включали усредненные данные по годам: 1 – урожай без внесения удобрений – контроль (К); 2 – средний урожай (О), полученный при разных дозах удобрений, которые не дают максимального урожая (*неоптимальные* дозы); 3 – максимальный урожай (Ох), полученный при внесении *оптимальных* доз удобрений; 4 – средняя прибавка урожая при неоптимальных дозах удобрений, т.е. разность О-К; 5 – максимальная прибавка урожая при внесении оптимальных доз удобрений Ох-К (табл.).

Полевые опыты располагались на территории западной части бассейна р. Оки размером $2,1^\circ$ по долготе и $3,4^\circ$ по широте (см. рис. 1); на севере региона находилась зона дерново-подзолистых почв, южнее – серых лесных, в южной части – оподзоленных черноземов. Средние значения изучаемых характеристик озимой пшеницы и долю, которую они составляют от контроля на разных типах почв, показаны в таблице. Средняя многолетняя сумма годовых осадков для изучаемой выборки

составляла 637 мм (от 621 до 677 мм), среднегодовая температура $4,9^\circ \text{C}$ (от $4,3$ до $5,6^\circ \text{C}$).

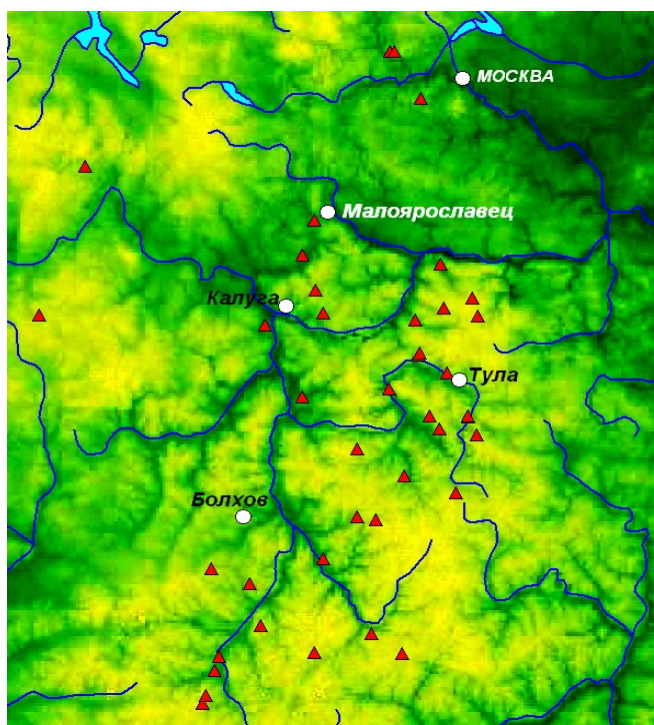


Рис. 1. Расположение площадок озимой пшеницы (треугольники) на фоне карты высоты (светлее – высота больше) участка на западе Окского бассейна. Размер участка исследования: $2,1^\circ$ по широте и $3,4^\circ$ по долготе

Значения средних характеристик урожайности озимой пшеницы и их доля в урожае без удобрений на разных типах почв

Показатель (ц/га)	Характеристика урожайности, ц/га / % от контроля			
	Дерново-подзолистые почвы	Серые лесные почвы	Черноземы	Среднее по опытам
1. Урожай без удобрений (контроль), К	20,7/100	19,7/100	20,6/100	19,6/100
2. Средний урожай при неоптимальных дозах удобрений, О	25,1/121,3	26,7/135,5	25,4/123,3	25,7/126,7
3. Максимальный урожай с оптимальными дозами удобрений, Ох	30,4/155,1	31,8/162,2	29,5/150,5	30,6/155,9
4. Прибавка урожая при неоптимальных дозах удобрений, О-К	8,4/42,9	5,8/29,6	5,5/28,1	6,6/31,6
5. Прибавка урожая при оптимальных дозах удобрений, Ох-К	9,7/46,8	12,1/61,4	8,9/43,2	11,7/59,7

Отметим, что урожай при оптимальных дозах удобрений Ох в 1,2 раза больше, чем при неоптимальных дозах О, прибавка максимального урожая Ох-К почти в 2 раза выше прибавки среднего урожая О-К.

Характеристики климата, усредненные за 1950–2000 г., взяты из глобальной базы данных WorldClim [9] разрешения $30''$ (900 м по меридиану), полученной интерполяцией данных метеостанций по широте, долготе и высоте. Эти характеристики включают в себя температуры и осадки каждого месяца, сезона, среднегодовые, а также 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 больше 10°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 [10], о почвах – с почвенной карты М 1 : 2,5 млн. Для анализа использованы индикаторные переменные, обозначающие тип почвы: И_{дерн.} – дерново-подзолистые, И_{сер.} – серые лесные, И_{черн.} – черноземы. Индикатор равен единице для используемого типа и нулю – для неиспользуемых [7]. Характеристики мезорельефа рассчитывали по методике [11].

Результаты и их обсуждение. Урожай с разными О и Ох связаны линейно с контролем, т.е. с урожаем без удобрений (рис. 2). Тесная линейная связь между контролем и урожаями позволяет оценить О и Ох по свободному члену: О больше контроля в среднем на 6,4, Ох – на 10,8 ц/га (рис. 2).

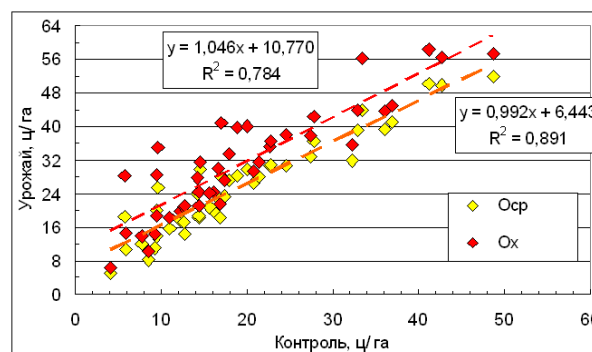


Рис. 2. Связь значений урожаев О и Ох с контролем

Отметим, что прибавки урожаев О-К и Ох-К не связаны с контролем К, что позволяет полагать их основную зависимость от удобрений, других характеристик климата и рельефа. Прибавки урожаев О-К и Ох-К также

относительно слабо связаны со своими урожаями О и Ох (рис. 3 а, б), и эта связь нелинейная ($R^2 = 0,27$ и $0,37$ соответственно). Характеризуется связь тем, что при значениях около 30 ц/га для среднего урожая и 40 ц/га в случае максимального урожая происходит падение значения прибавок при дальнейшем росте урожаев.

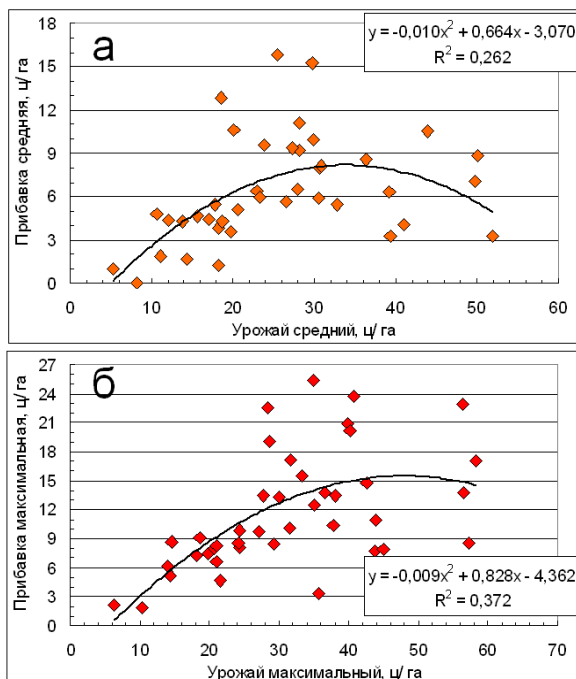


Рис. 3. Связи значений прибавок с урожаями О-К(а) с О, Ох-К с Ох (б)

Установлено, что в интервале увеличения урожаев О и Ох и одновременного снижения значений прибавок О-К и Ох-К происходит рост значений контроля К. Иными словами, в интервале больших значений урожаев рост этих урожаев поддерживается за счет не только нарастания прибавки из-за действия удобрений, но и роста значений контроля. Таким образом, при больших значениях на контроле в условиях хорошего роста урожая, эффект от применения удобрений может снижаться.

Если контроль К принять за *естественный ресурс урожая*, а прибавки О-К и Ох-К за *искусственный ресурс*, то можно отметить явление «насыщения искусственного ресурса» или снижение эффекта действия удобрений на фоне роста естественного ресурса.

Уравнения, описывающие изменения на территории запада бассейна р. Оки разных характеристик урожайности озимой пшеницы, полученных в различных условиях приведены ниже.

1. Урожай, полученный без удобрений – контроль (К).

$$K = 2,774 \cdot Tx_06 + 5,280 \cdot P_07 + 3,149 \cdot E + 1,100 \cdot H9 - 1053$$

$$R^2 = 0,348 \text{ (Degr} = 58,4\%), P < 10^{-2}, \quad (1)$$

где характеристики климата: Tx_06 – дневная температура июня, P_07 – сумма осадков в июле; характеристики рельефа: E – разностная кривизна и $H9$ – относительная высота холмов, которая рассчитывается специальным методом [11] от подножия холма (т.е. от наибольшей замкнутой горизонтали). Уравнение описывает рост контроля при возрастании дневной температуры июня и суммы июльских осадков. Контроль также возрастает с ростом высоты холмов и в зонах рельефа, которые

характеризуют положительные значения E , где преобладают процессы, определяемые профилем склонов (выпуклые или вогнутые) над процессами в плане, происходящими под влиянием выпуклых или вогнутых отрогов.

Отметим, что в тенденции урожай озимой пшеницы без удобрений на изученной территории возрастает при движении в восточном направлении в среднем на 7 ц/га на каждые 100 км. Это заметно на изображении матрицы контроля (рис. 4а), рассчитанной по уравнению (1). По данным парной корреляции в этом же направлении растет дневная температура июня Tx_06 (на каждые 100 км увеличивается на $0,4^\circ\text{C}$). Соответственно, в изучаемом регионе при движении на восток повышение температуры июня на полградуса приводит к росту контроля К в среднем на 8,75 ц/га.

В уравнении (1) и далее в уравнениях предикторы записаны в порядке убывания их статистической значимости: Tx_06 определяет пространственную изменчивость контроля на 37,1%, P_07 – на 36,3, E – на 12,9, $H9$ – на 13,7%. Эти значения показывают, что июньская дневная температура и осадки июля являются самыми влиятельными предикторами контроля и действуют почти с одинаковыми весами.

2. Средний урожай О, полученный при применении неоптимальных доз удобрений.

Он характеризуется следующим уравнением:

$$O = 2,708 \cdot Tx_06 + 5,092 \cdot P_07 + 4,202 \cdot E - 5,093 \cdot \sin A_{45} - 1015$$

$$R^2 = 0,378 \text{ (Degr} = 47,2\%), P < 10^{-3} \quad (2)$$

В уравнении (2) первые три предиктора такие же, как в уравнении (1), новый четвертый $\sin A_{45}$ определяет выраженность ориентации склонов на северо-восток. В итоге получаем, что закономерная изменчивость в пространстве среднего урожая при применении неоптимальных доз удобрений подобна закономерностям изменения контроля по трем факторам. Фактор $\sin A_{45}$ со знаком «минус» в уравнении характеризует возрастание урожая на юго-западных склонах. Отметим, что статистическая значимость предикторов в уравнении (2) отличается от уравнения (1). Tx_06 и P_07 определяют в меньшей степени пространственную изменчивость по сравнению с контролем: на 31,0 и 29,5% соответственно. Почти в 2 раза возрастает вес E (21,0%), $\sin A_{45}$ определяет изменчивость на 18,4%. По сути, пространственные изменения среднего урожая О пропорциональны изменениям контроля, но добавляется зависимость от экспозиции склонов. Карта, рассчитанная по уравнению (2) показана на рисунке 4б: О возрастает на восток, ориентация склонов в мозаике почти не выражена из-за малого веса.

Остановимся на значениях экспозиции склонов. Показатель $\sin A_{45}$ принимает значения от $-1,0$ до $+1,0$. Диапазон от $0,001$ до $+1,0$ определяет ориентацию склонов на северо-восток: малые значения – выраженность ориентации на северо-восток слабая, большие значения – ориентация выражена значительно ($\sin A_{45} = +1,0$ означает точную ориентацию на северо-восток, что встречается крайне редко). По аналогии диапазон от $-0,001$ до $-1,0$ определяет ориентацию склонов на юго-запад: малые по модулю значения – выраженность слабая, большие – ориентация выражена лучше ($\sin A_{45} = -1,0$ означает точную ориентацию на юго-запад). Если в уравнении присутствует $-\sin A_{45}$, это означает, что именно ориентация примерно на юго-запад (не на север или восток и др.) имеет решающее значение для урожая.

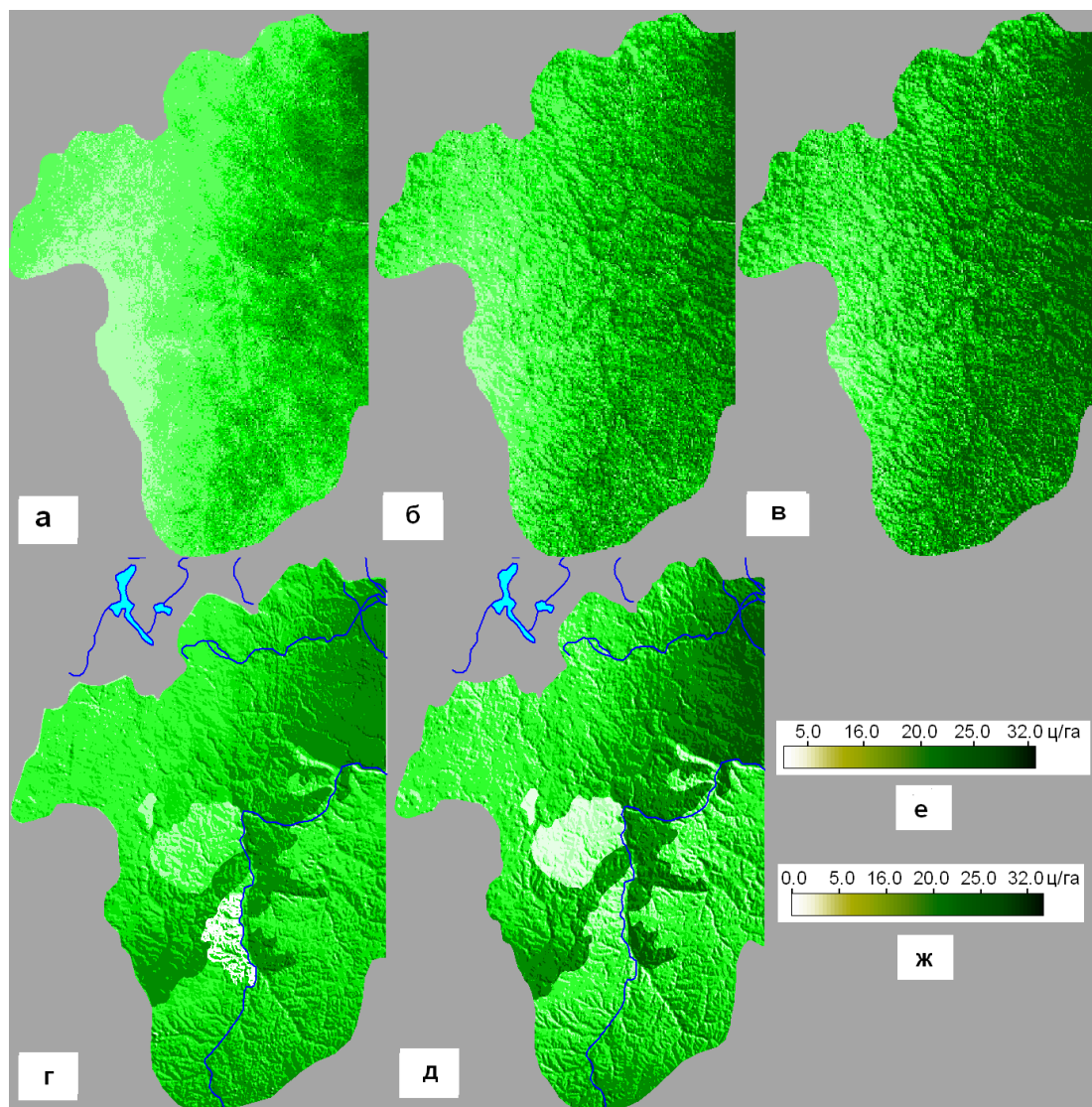


Рис.4. Карты, рассчитанные по моделям: а – контроля К (уравнение 1), б – среднего урожая при неоптимальных дозах удобрений О (ур. 2), в – максимального урожая при оптимальных дозах удобрений Ох (ур. 3), г – прибавки урожая при неоптимальных дозах О-К (ур. 6), д – максимальной прибавки урожая при оптимальных дозах Ох-К (ур. 7).
Единые легенды: е – для карт урожаев К, О, Ох, ж – для карт прибавок О-К, Ох-К

3. Максимальная урожайность Ох, полученная применением оптимальных доз удобрений.

Она описывается следующим уравнением:

$$Ox = 2,862 \cdot Tx_06 + 5,262 \cdot P_07 - 7,521 \cdot \sin A_{45} + 5,026 \cdot E + 1058$$

$$R^2 = 0,408 (Degr = 43,8\%), P < 10^{-3}, \quad (3)$$

все предикторы описаны в уравнении (2). В уравнении (3) изменен порядок последних двух предикторов: место третьего предиктора заняла экспозиция юго-западных склонов, характеристика потоков E на последнем месте. Таким образом, максимальный урожай Ох озимой пшеницы в изучаемом регионе, также как и средний урожай О, растет с увеличением дневной температуры июня и осадков июля, на склонах юго-западной экспозиции и в зонах преобладания первого (конвергентного) механизма аккумуляции над вторым. В уравнении (3) веса предикторов близки к весам в уравнении (2), но заметно возрастает вес $\sin A_{45}$: Tx_06 определяет пространственную изменчивость на 29,3%, и P_07 на 26,4%, $\sin A_{45}$ на 23,5% и E на 21,8%.

Из уравнения (3) видно, что изменения в пространстве урожая Ох так же, как и урожай О, подобны закономерностям изменения контроля К, но с учетом влияния юго-западной экспозиции: чем меньше значения $\sin A_{45}$ или

чем больше склоны ориентированы на юго-запад, тем выше урожай Ох. Матрица урожая Ох, рассчитанная по модели (3), показана на рисунке 3в, где происходит возрастание урожая на востоке региона с увеличением значений Tx_06 и P_07 .

4. Уравнения урожаев с применением удобрений при использовании в качестве предиктора урожай без удобрений.

Введем в уравнения 2 и 3 в качестве предиктора контроль К для того, чтобы больше проявить различия между пространственной дифференциацией контроля и урожаев с удобрениями. Получаем следующие уравнения для урожаев О и Ох.

$$O = 0,9823 \cdot K - 3,430 \cdot \sin A_{45} + 0,6690 \cdot E + 0,009687 \cdot Tx_06 + 4,293$$

$$R^2 = 0,940 (Degr = 1,8\%), P < 10^{-6}. \quad (4)$$

В уравнении (4) контроль К занял место осадков июля P_07 , предикторы E и Tx_06 статистически незначимы. Веса факторов распределились следующим образом: контроль К определяет пространственную изменчивость среднего урожая О на 77,1%, $\sin A_{45}$ – на 17,9, E – на 4,8, P_07 – на 0,3%. По сути, уравнение (4) описывает пространственные изменения контроля К с учетом выраженности юго-западных склонов. Иными словами, урожай О, сохраняя

закономерности изменения контроля К, который игнорирует экспозицию, проявляет зависимость от близости склонов к юго-западным.

Для максимального урожая Ох получаем уравнение аналогичное уравнению (4) с другими регрессионными коэффициентами.

$$\begin{aligned} \text{Ох} = & 1,023 \cdot K - 5,795 \cdot \sin A_{45} + 1,356 \cdot E + 0,0680 \cdot P_{07} - \\ & - 4,278 \\ R^2 = & 0,894 \text{ (Degr} = 3,7\%), P < 10^{-6}. \end{aligned} \quad (5)$$

В уравнении (5) контроль К, также как и в уравнении (4), является наиболее влиятельным предиктором; предикторы E и P₀₇ статистически незначимы. Вес фактора К в (5) снижается по сравнению с (4) и составляет 65,8%, а вес sinA₄₅ возрастает до 24,7% (вес E составил 8,0%, P₀₇ – 1,5%). Таким образом, пространственные изменения максимального урожая Ох повторяют закономерности изменения урожая О, но сильнее зависят от направления склонов на юго-запад за счет снижения веса контроля К.

5. Уравнения для прибавок урожаев с применением разных доз удобрений.

Пространственные изменения прибавки урожая с неоптимальными дозами удобрений О-К описываются уравнением:

$$\begin{aligned} \text{О-К} = & 2,525 \cdot F(35,225) + 0,1112 \cdot I_{\text{дерн}} \cdot F(35,225) + \\ & + 1,677 \cdot P_{02} - 0,1566 \cdot P_{\text{year}} - 91,94 \\ R^2 = & 0,617 \text{ (Degr} = 16,1\%), P < 10^{-5}, \end{aligned} \quad (6)$$

где F(35,225) – освещенность склонов с юго-запада (азимут = 225°), I_{дерн} · F(35,225) – освещенность склонов с юго-запада на дерново-подзолистых почвах (для других типов почв этот член равен нулю), P₀₂ – сумма осадков в феврале, P_{year} – сумма годовых осадков. Прибавка к среднему урожаю с неоптимальными дозами удобрений увеличивается с возрастанием освещенности склонов с юго-запада на всей изучаемой территории, а также дополнительно с возрастанием освещенности склонов с юго-запада на дерново-подзолистых почвах. Для среднего урожая О важна освещенность на склонах в более холодной и увлажненной зоне дерново-подзолистых почв. Изображение матрицы прибавки среднего урожая показана на рисунке 4г, мозаика значительно отличается от мозаики самих урожаев контролем освещенных склонов и учетом типов почв.

В целом прибавка урожая при использовании неоптимальных доз удобрений в большей степени зависит от внешних факторов, чем сами урожаи: коэффициент детерминации в уравнении (6) заметно выше, чем в уравнениях (1-3). При этом связь с освещенностью склонов важнее, чем связи с климатом. В уравнении (6) F(35,225) определяет на 34,8% пространственную изменчивость урожая, I_{дерн} · F(35,225) – на 24,9%, P₀₂ – на 23,4%, P_{year} – на 16,9%. Следует заметить, что урожаи зависят от направления или экспозиции склонов sinA₄₅, а прибавка – от освещенности с юго-запада. Освещенность учитывает не только направление склонов, их крутизну и азимут Солнца, но также перпендикулярность падения солнечных лучей на земную поверхность. Для освещенности важен именно угол падения или перпендикулярность падения лучей, выражается она в %, где точное перпендикулярное падение принимается за 100%.

Максимальная прибавка урожая описывается следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \text{Ох-К} = & 4,269 \cdot F(35,230) + 3,117 \cdot P_{02} + \\ & + 0,3771 \cdot I_{\text{дерн}} \cdot P_{02} - 0,3034 \cdot P_{\text{year}} - 38,6 \\ R^2 = & 0,740 \text{ (Degr} = 6,9\%), P < 10^{-6}. \end{aligned} \quad (7)$$

Максимальная прибавка Ох-К более всех анализируемых характеристик урожайности зависима от внешних

факторов, коэффициент детерминации в уравнении (7) выше, чем в уравнениях (1-3, 6). В уравнении (7) F(35,230) – освещенность склонов с юго-запада (азимут = 230°), P₀₂ – сумма осадков февраля, I_{дерн} · P₀₂ – сумма осадков февраля в зоне дерново-подзолистых почв (для других почвенных зон этот член равен нулю), P_{year} – сумма годовых осадков. Прибавка максимального урожая с оптимальными дозами удобрений увеличивается с ростом освещенности склонов с юго-запада, возрастанием осадков февраля на всей изучаемой территории, а также с их возрастанием в зоне дерново-подзолистых почв и со снижением годовых осадков. Карта прибавки, рассчитанная по модели (7) показана на рисунке 4д, где выделяются зона дерново-подзолистых почв и хорошо освещенные склоны. Уравнение максимальной прибавки Ох-К (7) отличается от уравнения для прибавки урожая О-К (6) весом осадков в самый холодный и ветреный месяц года – февраль. Для максимальной прибавки Ох-К важна дополнительная доза осадков февраля, в отличие от прибавки О-К. Помимо защиты растений снежным покровом, увеличение осадков в феврале может быть важным фактором сохранения и накопления влаги в почвах перед весенней вегетацией. В уравнении (7) F(35,230) определяет на 31,6% пространственную изменчивость урожая, P₀₂ – на 25,3%, I_{дерн} · P₀₂ – на 24,9%, P_{year} – на 18,1%.

Заключение. 1. Анализ с помощью метода множественной регрессии показал, что урожай без применения удобрений К менее всего зависит от условий среды. Наибольшая зависимость от факторов среды характерна для прибавок урожая О-К и Ох-К. Это позволяет полагать, что позитивный эффект действия удобрений зависит от условий внешней среды. При очевидном влиянии удобрений дисперсия прибавки урожаев в регионе объясняется рельефом и климатом на 62% для О-К и на 74% для Ох-К.

2. Наиболее важными факторами для урожаев К, О и Ох являются T_{х_06} – одна из самых высоких дневных температур года и P₀₇ – сумма осадков самого сухого месяца. Для пространственных изменений урожаев с удобрениями О и Ох наряду с климатическими факторами присутствует характеристика рельефа – экспозиция склонов sinA₄₅. Это может означать, что для урожаев с удобрениями, в отличие от контроля К, важна экспозиция склонов, которая характеризует световой и тепловой режимы.

3. Использование как предиктора контроля К в уравнениях для урожаев О и Ох приводит к значительному увеличению коэффициентов детерминации. При этом вес контроля К в уравнении для среднего урожая О выше, а вес экспозиции ниже по сравнению с уравнением для урожая с оптимальными дозами удобрений Ох. Отсюда заключаем, что при оптимальных дозах удобрений для урожая Ох экспозиция склонов становится важнее.

4. Отождествление *естественного ресурса* с контролем К, а О-К и Ох-К с *искусственным ресурсом* приводит к тому, что для первого наиболее важными являются климатические факторы (температура и осадки), а для второго – освещенность склонов, характеризующая радиационный режим. Контроль по факту игнорирует изменения светового режима, однако предыдущее исследование показывает, что он несколько возрастает на склонах северных экспозиций по сравнению с южными [12]. Это может говорить о том, что *естественный ресурс* «тяготеет» большой освещенностью, возможно из-за ограничений фотосинтетического потенциала, который стимулируется светом. Напротив, *искусственный ресурс* способствует увеличению этого потенциала.

5. Освещенность склонов определяется перпендикулярностью падения солнечных лучей. Другими словами, фотосинтетическая активность озимой пшеницы в присутствии удобрений тесно связана с перпендикулярностью падения лучей. Идею решающего влияния перпендикулярности падения солнечных лучей на процессы земной поверхности описал классик почвоведения Н.М. Сибирцев более 125 лет назад [13]. Этому положению не было уделено должного внимания в научной литературе, в том числе и за рубежом, исключение составили работы [8]. Сравнение значений прибавок О-К и Ох-К при одних и тех же диапазонах освещенности склонов с юго-запада показывает, что прибавки О-К и Ох-К в 2 раза больше на относительно сильно освещенных склонах по сравнению с относительно слабо освещенными склонами. При этом О-К и Ох-К в этих же диапазонах освещенности различаются. Это может свидетельствовать в пользу того, что дозы и состав удобрений важнее для формирования прибавки, чем условия радиационного режима: в одних и тех же условиях освещенности прибавка среднего урожая О в 2 раза меньше, чем прибавка с оптимальными дозами Ох.

6. Принято считать, что посевные площади располагаются на ровных или почти плоских поверхностях. Однако небольшие различия в их наклонах могут существенно влиять на рост растений. В изучаемом регионе опытные площадки имеют среднюю крутизну склонов $0,7^\circ$ (от $0,2^\circ$ до $1,8^\circ$) при разрешении 600 м; средняя освещенность площадок, лежащих на северо-восточных склонах при положении Солнца на юго-западе, составляет $398,2 \text{ Вт/м}^2$, а для лежащих на юго-западных склонах, равна $407,0 \text{ Вт/м}^2$ [14]. Разность между этими двумя значениями, равная $8,8 \text{ Вт/м}^2$, составляет лишь 2,2% от средней освещенности с юго-запада для всех склонов, которая равна $402,2 \text{ Вт/м}^2$. Несмотря на малое изменение освещенности, происходит увеличение прибавки для озимой пшеницы на юго-западных склонах более чем в 2 раза по сравнению с северо-восточными склонами [14]. Выявленная зависимость открывает возможность влиять на урожай с помощью агротехнических приемов. При невозможности изменять климат, мы относительно свободны в выборе положений площадей для посевов. В случае озимой пшеницы, предпочтение склонов юго-западной ориентации другим положениям в рельефе

способно заметно увеличить прибавку к урожаю, а соответственно и сам урожай.

Литература

1. Каишанов А.Н., Явтушенко В.Е. Агроэкология почв склонов. – М.: Колос, 1997. – 240 с.
2. Ferrara R.M., Trevisiol P., Acutis M., Rana G., Richter G.M., Baggaley N. Topographic impacts on wheat yields under climate change: two contrasted case studies in Europe // Theoretical and Applied Climatology. 2010. V. 99. P. 53–65. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0126-9>
3. Рухович О.В., Шарая Л.С., Шарый П.А. Использование характеристик рельефа при анализе пространственной изменчивости урожайности озимой пшеницы в Окском бассейне // Агрохимия. – 2010. – № 8. – С. 49–57.
4. Рухович О.В., Шарая Л.С., Шарый П.А., Романенков В.А. Прогнозирование урожая озимой пшеницы в агроландшафтах методами геоморфометрии // Плодородие. – 2009. – №5(50). – С. 22–24.
5. Проценко Е.П., Караулов Л.Н. Влияние склонового рельефа на потребление питательных элементов и формирование урожая сельскохозяйственных культур / Материалы всероссийской конф. «Агроэкологические проблемы Центрального Черноземья». – Курск: Изд-во Курск. гос. с.-х. академии. – 2004. С. 46–50.
6. Караулов Л.Н., Проценко Е.П., Медянцева П.Л., Проценко К.А. Влияние экологических факторов на режим азота почвы и продуктивность озимой пшеницы и кукурузы в агроландшафте // Проблемы региональной экологии. – 2011. – № 3. – С. 119–123.
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. 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.
9. 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. DOI: 10.1002/joc.1276
10. 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.
11. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V. 107. P. 1–32.
12. Шарая Л.С., Рухович О.В., Шарый П.А., Иванова О.И., Никитина Л.В. Связь урожайности яровой пшеницы с климатом, почвами и рельефом на Урале // Плодородие. – 2023. – №5(134). – С. 68–71. DOI: 10.25680/S19948603.2023.134.17.
13. Сибирцев Н.М. (1901) Почвоведение: курс лекций, читанных студентам Института сельского хозяйства и лесоводства в Новой Александрии // Избр. соч. Т. 1. Почвоведение. – М.: Сельхозгиз. 1951. – 472 с.
14. Shary P.A., Sharaya L.S., Rukhovich O.V. The influence of slope exposure on the yield characteristics of winter wheat and spring barley in the Oka River basin, Russia // Advances in Modern Agriculture. 2024. V. 5. N 1. P. 2435. <https://doi.org/10.54517/ama.v5i1.2435>

COMPARATIVE STUDY OF SPATIAL VARIABILITY OF WINTER WHEAT YIELD CHARACTERISTICS IN THE BASIN OF THE OKI WHEN USING DIFFERENT DOSES OF FERTILIZERS

L.S. Sharaya^{1*}, O.V. Rukhovich¹, P.A. Shary^{1,2}, A.V. Navrov¹

¹ All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, Moscow, Russia

² Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia

*E-mail: l_sharaya@mail.ru

A comparative analysis of spatial variations in winter wheat yield characteristics obtained with the use of different doses of fertilizers in the western Oka basin was carried out. Using multiple regression, it was shown that the K control, the average O yield obtained with the use of different doses, and the maximum yield for optimal doses of Ox fertilizers depend on the June temperature and July precipitation. Relief is important for O and Ox: they are higher on the southwestern slopes. Illumination and soil types are important for the gains from O-K and Ox-K fertilizers. Regression maps of K, O, Ox, O-K and Ox-K are given.

Keywords: winter wheat, spatial variability, multiple regression, fertilizers, climate, exposure, slope illumination.