

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ С УЧЕТОМ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА ЗАПАДЕ ОКСКОГО БАССЕЙНА

П.А. Шарый,<sup>1,3</sup> д.б.н. Л.С. Шарая<sup>2,3</sup>, д.б.н., О.В. Рухович<sup>3</sup>, д.б.н., С.И. Шкуркин<sup>3</sup>, к.ю.н.

<sup>1</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН;

142292 г. Пушкино Московской области, ул. Институтская, д.2;

<sup>2</sup>Институт экологии Волжского бассейна РАН, 445003, г. Тольятти ул. Комзина д.10;

<sup>3</sup>ФГБНУ «ВНИИ агрохимии», 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д.31а

Для запада Окского бассейна построены модели множественной регрессии для описания связи урожайности ярового ячменя в опыте Ох и на контроле К с климатом, типами почв и рельефом. Связи с природными факторами более тесные в К ( $R^2 = 0,651$ ), чем в Ох ( $R^2 = 0,580$ ), что вызвано, по-видимому, влиянием удобрений в Ох, уменьшающих зависимость урожайности ячменя от климата. В К ведущим фактором среды был дефицит воды, в Ох – осадки мая. Для описания нелинейных связей урожайности с климатом полезны переменные  $|P - P_{av}|$  и  $(P - P_{av})^2$ , где  $P$  – сумма осадков данного периода,  $P_{av}$  – ее среднее. Показано, что пространственные средние этих величин близки к стандартному отклонению и дисперсии осадков, характеризующих вариабельность климата. Как в Ох, так и в К значимым природным фактором среды помимо климата был тип почвы; так, в серой лесной почве дополнительное влияние на Ох оказывала расчлененность рельефа, а в К – экспозиция склонов.

Ключевые слова: яровой ячмень, климат, вариабельность климата, WorldClim, дефицит воды, множественная регрессия.

Для цитирования: Шарый П.А., Шарая Л.С., О.В. Рухович, Шкуркин С.И. Прогнозирование урожайности ярового ячменя с учетом природных факторов на западе Окского бассейна // Плодородие. – 2021. – № 4. – С. 66-69. DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.20.

Помимо совершенствующихся удобрений и агротехнических приемов, урожайность ярового ячменя зависит от климата, почв и рельефа, к которым можно лишь адаптировать дозы удобрений или сорта. Поэтому важно знать, каковы тренды зависимости этой урожайности от климата. Несмотря на то, что посевная площадь ячменя в стране составляла в 2003-2007 г. 9,4 млн га, что является наибольшей среди стран мира, средняя урожайность в стране за этот период была относительно низкой – 2,2 т/га при среднемировой 2,6 т/га.

Средняя за 2003-2007 г. урожайность ячменя в разных странах [16], т/га: Франция – 7,4, Англия – 7,1, Германия – 7,0, Дания – 6,2, Китай – 4,7, США – 4,2, Иран – 2,2, Австралия – 2,1.

Низкую урожайность ячменя в Австралии связывают с недостаточными осадками, а в России – с климатом и несовершенными технологиями менеджмента (удобрения и защита от вредителей), во Франции, Англии и Германии климат считают благоприятным для ячменя, а технологии менеджмента – высокими [16].

Зависимость урожайности от климата видна из следующих данных для Западной Европы: в 2006 г. в ее центре, где климат благоприятен для ячменя и велики дозы удобрений и пестицидов, урожайность была 5,96 т/га, на прохладном и влажном севере региона – 4,25, в холодных Нордических странах – 3,55, на жарком и сухом юге – 2,72 т/га [16]. В Африке на границе с Сахарой – 1,17 т/га, на высокогорьях Боливии и Перу – 1,05 т/га [16]. Из-за низкой зимостойкости ячмень в России, как и в мире, возделывается в основном как яровая культура; 99 % площади озимого ячменя высевают в Южном, Северо-Кавказском федеральных округах [4] и в Крыму [3], в то время как в изучаемом Приволжском федеральном округе его посевы занимают площадь на два-три порядка меньшую [4]. Поэтому будет рассматриваться яровой ячмень, хотя его урожайность ниже,

чем озимого: за 2002-2005 г. в странах Евросоюза 3,15 и 3,75 т/га соответственно [16].

Наряду с климатом, на урожайность ярового ячменя влияют сорта, почвы, рельеф, солнечная радиация и удобрения/менеджмент. Рельеф может сильно влиять на водную эрозию почв, но это важно лишь при большой крутизне склонов – 4-14° [11]. Климат является главным не зависящим от человека фактором, от которого зависит урожайность. Мы изучаем прежде всего его влияние, но дополнительно рассматриваем и другие природные факторы, применяя для анализа множественную регрессию.

**Методика.** Опытные участки располагались в западной части Окского бассейна и занимали территорию протяженностью 2,04° по долготе и 3,18° по широте. Показатели урожайности ярового ячменя взяты из базы данных, объединяющей данные Агрохимслужбы и Геосети «Агрогеос» за 40 лет [5]. На каждой площадке наблюдения эти данные усреднялись по времени, что давало в ней среднюю по времени урожайность по опыту Ох (с «оптимальной», т.е. дающей максимальную урожайность, дозой удобрений NPK) и контролю К (без внесения удобрений). Таких площадок исходно было 96, но для близких площадок с расстоянием между ними меньше 1 км брали среднее по ним, получив в результате выборку «А49» из 49 точек наблюдения, расстояние между которыми было больше 1 км. Это соответствовало подробности данных о климате, взятых из базы данных WorldClim разрешения 1 км, где температуры и осадки каждого месяца усреднены более, чем за 50 лет (1950-2000 г.) [10]. Данные о высотах земной поверхности [13] взяты с тем же разрешением 1 км. Высота в точках наблюдения менялась от 136 до 283 м при средней 201 м.

Дефицит воды WD определен как разность испаряемости РЕТ и испарения АЕТ [12]. РЕТ рассчитывали по методу Торнтвейта [15], АЕТ – по методу Будыко [1].

Типы почв являются качественной характеристикой, поэтому для использования их в статистическом анализе введены индикаторные переменные [7]. В работе также применена индикаторная переменная ИМ, которая равна 1 при значениях площади сбора больше средней площади по выборке и равна 0 в противоположном случае. 18 количественных характеристик рельефа и методы их расчета описаны в работе [14]. Часть из них нуждалась в нелинейном преобразовании для приближения их распределения к нормальному, что нужно для статистической обработки; эти преобразования делали по формулам работы [7]. Преобразованные характеристики рельефа обозначены ниже верхним индексом Т.

В моделях множественной регрессии использовали фиксированное число – четыре предиктора (независи-

мых переменных), поскольку связь с пятым предиктором обычно незначима. Любые комбинации зависимых по известному критерию [7] предикторов исключали из рассмотрения. Значимость предикторов в модели оценивали по модулям *t*-статистик Стьюдента, они расположены в порядке убывания значимости; незначимых предикторов в представленных моделях нет.

**Результаты и их обсуждение.** Урожайность Ох ярового ячменя в точках наблюдения А49 запада Окского бассейна менялась от 1,13 до 4,71 т/га при средней 2,75 т/га, урожайность на контроле К – от 0,68 до 3,52 при средней 1,87 т/га.

Данные таблицы показывают, что коэффициент увлажнения  $MI > 1$  в регионе, т.е. осадков за год выпадает больше, чем может испариться, и полив не нужен.

Описательные статистики климата на западе Окского бассейна

	МАР, мм/год	МАТ, °С	АЕТ, мм/год	PET, мм/год	MI, безразм.	IDM, (мм/год)/°С	WD, мм/год	IC, °С
Минимум	621	4,18	420	574	1,016	41,3	151	35,0
Максимум	673	5,24	437	616	1,150	46,7	185	36,7
Среднее	644	4,77	430	599	1,076	43,6	169	35,9

Примечание. МАР – среднегодовые осадки; МАТ – среднегодовая температура; АЕТ – суммарное испарение; PET – испаряемость; MI = МАР/PET – коэффициент увлажнения; IDM = МАР/(МАТ+10) – индекс де Мартона; WD = PET–АЕТ – дефицит воды; IC =  $T_{max} - T_{min}$  – индекс континентальности (амплитуда температур года).

Рассмотрим вначале роль таких переменных как  $|P-Pav|$  и  $(P-Pav)^2$ , где P – сумма осадков за месяц или период, а Pav – их среднее значение по точкам наблюдения. Эти величины важны при часто наблюдаемой нелинейности связей урожайности ячменя с климатом. Если мы возьмем среднее в пространстве от  $|P-Pav|$ , т.е.  $\overline{|P-Pav|}$  (или  $\overline{|T-Tav|}$ ), и сравним со стандартным отклонением по тем же точкам SD(P) (или SD(T)), то они оказываются близкими (рис. 1). Аналогично, среднее  $(P-Pav)^2$ , т.е.  $\overline{(P-Pav)^2}$ , близко к дисперсии  $\sigma^2(P)$ . Ве-

личина  $|P-Pav|$  описывает в среднем, посредством близкой к SD(P) величины  $\overline{|P-Pav|}$ , вариабельность осадков данного периода.  $|P-Pav|$  есть отклонение от среднего по региону, и важно, как показано ниже, для урожайности ярового ячменя. Вариабельность условий среды рассматривают как один из факторов, потенциально влияющих на экосистему [9].

Согласно вышеприведенным данным, на участке исследования применение удобрений увеличивало урожайность ярового ячменя в 1,5 раза.

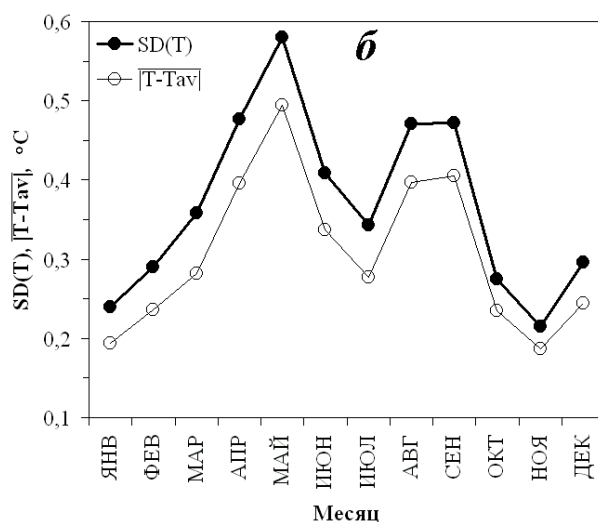
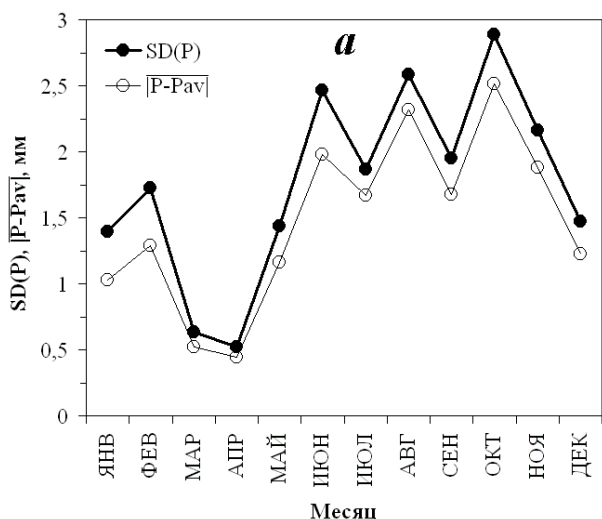


Рис. 1. Распределение по месяцам значений  $\overline{|P-Pav|}$  и стандартного отклонения SD(P) (а), а также  $\overline{|T-Tav|}$  и SD(T) (б) (пояснения даны в тексте)

Климатические факторы действуют на урожайность ячменя не порознь, а совместно. Для описания этого наилучшим образом подходит множественная регрессия. Урожайность ярового ячменя в опыте Ох (в т/га) выражается уравнением

$$Ox = -0,888 \cdot P05 + 0,353 \cdot (P05 - P05av)^2 - 3,65 \cdot \Delta T - 0,979 \cdot SL \cdot khe^T + 76,2; \\ R^2 = 0,580, P < 10^{-6}. \quad (1)$$

Здесь первые два предиктора описывают нелинейную связь Ох с осадками мая P05 (среднее  $P05av = 50$  мм), при этом отрицательная связь с P05 указывает на снижение урожайности при возрастании P05, а положительная с  $(P05 - P05av)^2$  – на тенденцию к росту Ох при возрастании дисперсии осадков. Ведущие предикторы отвечают известной чувствительности ярового ячменя к осадкам весны [2]. Третий предиктор есть  $\Delta T$  – средняя за год разность температур дня и ночи ( $T_{max} - T_{min}$ ).

Отрицательная связь с этим предиктором отвечает возрастанию урожайности Ох при снижении разности температур. В уравнении SL – индикатор серых лесных почв (равный 1 для них и 0 – иначе), khe – горизонтальная избыточная кривизна, увеличивающаяся с ростом расчлененности рельефа [14]; урожайность заметно снижается в серых лесных почвах на расчлененном рельефе. Модель объясняет 58 % дисперсии Ох, что вдвое больше, чем при учете только климата, ~27 %.

При исключении температур и осадков не вегетационного периода из рассмотрения находим для контроля К (т/га) с учетом климата, типов почв, площади сбора и экспозиции склонов уравнение регрессии ( $WD_{AV} = 169$  мм/год,  $T_{06AV} = 16,7$  °C,  $P_{warmAV} = 444$  мм)

$$K = 2,57 \cdot 10^{-6} \cdot (WD - WD_{AV})^4 - 1,67 \cdot |T_{06} - T_{06AV}| + 9,07 \cdot SL \cdot GA \cdot \cos A_{45} + 0,00230 \cdot IM \cdot (P_{warm} - P_{warmAV})^2 + 1,82;$$

$$R^2 = 0,651, P < 10^{-6} \quad (2)$$

Это уравнение показывает, что К нелинейно связано с дефицитом воды WD, температурами июня  $T_{06}$ , осадками теплого периода  $P_{warm}$ , и линейно – с крутими склонами северо-западной экспозиции в серых лесных почвах  $SL \cdot GA \cdot \cos A_{45}$ . Неполный многочлен  $(WD - WD_{AV})^4$

не дает локального максимума К в области средних WD 165–168 мм/год, показанного полным многочленом (рис. 2). Поэтому в модель вошел корректирующий предиктор  $|T_{06} - T_{06AV}|$  – вариабельность температуры, – который добавляет этот максимум. Чем больше отклоняется WD от оптимального значения, близкого к среднему  $WD_{AV}$ , тем сильнее отклонена влажность почв от оптимального значения, а значит, урожайность ярового ячменя на контроле может иметь максимум как функция WD, что и наблюдается. Возрастание К при малом дефиците воды WD объяснимо, оно вызвано ростом благоприятных для ярового ячменя осадков теплого периода, поскольку WD определяется в основном ими: в холодный период испаряемость PET и испарение AET, а значит и их разность  $WD = PET - AET$ , близки к нулю. Интересно, что при больших WD, в более сухих атмосферных условиях, К также возрастает. Однако большинство точек наблюдения в этих условиях находятся на малых высотах, т.е., связаны с пойменными почвами, где недостаток атмосферной влаги, описываемый увеличенным дефицитом воды WD, с избытком компенсируется почвенной влагой.

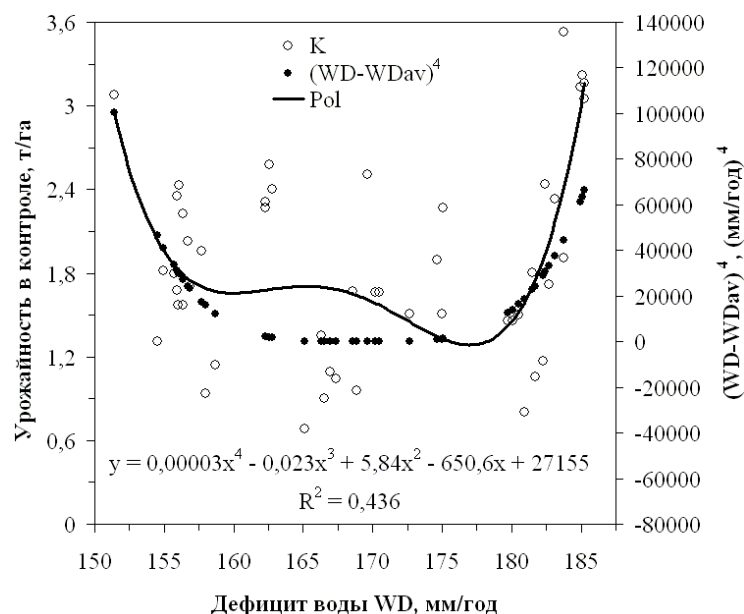


Рис. 2. Урожайность на контроле (К) и величина  $(WD - WD_{AV})^4$  в зависимости от дефицита воды – WD. (Кривая показывает полный многочлен четвертой степени, уравнение которого выписано на графике; неполный многочлен  $(WD - WD_{AV})^4$  обозначен черными кружками)

Третий предиктор,  $SL \cdot GA \cdot \cos A_{45}$  ( $A_{45} = A_0 + 45^\circ$ , где  $A_0$  – экспозиция), описывает изменение урожайности на контроле К в серых лесных почвах: положительное на северо-западных и отрицательное – на более сухих юго-восточных склонах. Четвертый предиктор,  $IM \cdot (P_{warm} - P_{warmAV})^2$ , описывает возрастание К в местах увеличенной площади водосбора МСА (где  $IM = 1$ ), которое тем сильнее, чем больше  $(P_{warm} - P_{warmAV})^2$ , т.е. чем больше дисперсия осадков теплого периода. МСА связана с содержанием воды в почвах от притока с вышележащих склонов,  $P_{warm}$  – с поставкой воды дождями *in situ*.

Применение удобрений уменьшает влияние климата, поэтому зависимость от климата в опыте менее тесная, чем на контроле. Отметим, что поскольку урожайность ярового ячменя усреднена за 40 лет, использовались характеристики климата (средние за 50 лет), а не погоды. Анализ таких данных позволил получить об-

щие тренды зависимости урожайности от климата, а не от погоды.

**Закключение.** Показано, что нелинейная связь урожайности ярового ячменя с климатом предполагает использование таких величин, как  $|T - T_{AV}|$  и  $(P - P_{AV})^2$ , средние которых близки к стандартным отклонениям и дисперсии температур и осадков соответственно, а потому связаны с описанием вариабельности климата. Множественная регрессия для опыта и контроля показала для урожайности ярового ячменя более тесную связь на контроле ( $R^2 = 0,651$ ), чем в опыте ( $R^2 = 0,580$ ), причем в опыте урожайность в 1,5 раза больше, чем на контроле. Это связано с тем, что удобрения не только улучшают физиологические свойства растений, но и уменьшают их зависимость от погодных условий, приводя к уменьшению тесноты связи  $R^2$  урожайности в опыте с условиями климата.

### Литература

1. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. – Л.: Гидрометеиздат, 1956. – 256 с.
2. Николаев Е.В., Изотов А.М., Лыков С.В. Ячмень в Крыму. – Симферополь: ЧП «Фактор», 2007. – 184 с.
3. Ренко Н.В. Селекция озимого ячменя в условиях юга России. – Краснодар: КубГАУ, 2018. – 258 с.
4. 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 Гео-сети «Агрогеос» // Проблемы агрохимии и экологии. – 2008. – № 3. – С. 35-38.
5. Ториков В.Е., Пакишина С.М., Ториков В.В. Устойчивость ярового ячменя к стрессовым факторам среды. Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2014. – 71 с.
6. 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.
7. Briggs D.E. Barley. London: Chapman and Hall Ltd. 612 p.
8. Currie D.J. Energy and large-scale patterns of animal- and plant- species richness // The American Naturalist. 1991. V. 137. P. 27-49.
9. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2005. V. 25. N. 15. P. 1965-1978.
10. Jankauskas B., Jankauskiene G. Erosion-preventive crop rotations for landscape ecological stability in upland regions of Lithuania // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2003. V. 95. P. 129-142.
11. Lutz J.A., van Wageningen J.W., Franklin J.F. Climatic water deficit, tree species ranges, and climate change in Yosemite National Park // Journal of Biogeography. 2010. V. 37. P. 936-950.
12. Rodríguez 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.
13. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V. 107. N. 1-2. P. 1-32.
14. Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of climate // Geographical Review. 1948. V. 38. N. 1. P. 55-94.
15. Ullrich S.E. (Ed.) Barley Production, Improvement, and Uses. UK: John Wiley and Sons, 2011. 691 p.

### THE DEPENDENCE OF SPRING BARLEY YIELDS ON CLIMATE AT THE WEST OF THE OKA BASIN

*Shary P.A., Institute of physicochemical and biological problems in soil science RAS; 142292 Pushchino, Moscow region, Institutskaya str. bldg. 2; The All-Russian scientific research institute of agrochemistry RAS; 127550 Moscow, Pryanishnikova str. bldg. 31a.*  
*Sharaya L.S., Institute of ecology of Volga basin RAS; 445003 Togliatti, Komzina str. bldg. 10; The All-Russian scientific research institute of agrochemistry RASHN; 127550 Moscow, Pryanishnikova str. bldg. 31a.*  
*Rukhovich O.V., S.I. Skurkin, The All-Russian scientific research institute of agrochemistry RAS; 127550 Moscow, Pryanishnikova str. bldg. 31a.*

*Abstract. Variables like  $|P-Pav|$  and  $(P-Pav)^2$ , where  $P$  is precipitation,  $Pav$  is average, are useful to describe non-linear links of yields with climate. We show that spatial averages of these variables are close to standard deviation and variance of precipitation that characterize climate variability. At the west of Oka basin models of multiple regression were constructed for description of links between spring barley yields and climate in the conditions of experimental yields  $Ox$  and control  $K$ , with no fertilizers. The links are stronger in  $K$  ( $R^2 = 0.651$ ) than in  $Ox$  ( $R^2 = 0.580$ ) due to fertilizers that diminish the dependence of yields on climate. The main environmental factors were water deficit for  $K$  and precipitation of May for  $Ox$ . Both in  $Ox$ , and in  $K$  the significant environmental factor besides climate was soil type; in gray forest soils for  $Ox$  terrain dissection was also important, and slope exposure – for  $K$ .*

*Keywords. Spring barley, climate, climate variability, WorldClim, water deficit, multiple regression.*

УДК 631.95:631.8:631.559:631.552

DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.21

## ВЛИЯНИЕ ЭКОЛОГО-АГРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В СЕВООБОРОТЕ

*Е.Т. Наумченко, к.с.-х.н., И.А. Кубасов, ФГБНУ ФНЦ Всероссийский НИИ сои  
Игнатьевское шоссе, 19, г. Благовещенск, Амурская обл., 675027, Российская Федерация  
e-mail: 89145656ilya@gmail.com*

*Исследования проводили в 2014-2019 г. на лугово-черноземовидной почве в длительном стационарном зерносовом севообороте. Объекты исследований: посевы овса (1-е поле севооборота) и пшеницы (3- и 5-е поля севооборота). Установлено, что воздействие гидротермических условий в период кушение-колошение пшеницы (выметывание метелки у овса) на 75 %, а содержание элементов питания в почве и надземной массе в фазе кушения, соответственно, на 37 и 81 % определяет изменение урожайности пшеницы и овса. Сложившиеся агроэкологические условия обеспечили среднюю за годы исследований урожайность зерновых культур в варианте без внесения удобрений (контроль) 1,87-2,98 т/га, под действием минеральных удобрений прибавка урожайности овса относительно контроля составила 0,35 т/га, пшеницы – 0,21-0,88 т/га.*

*Ключевые слова: пшеница, овес, гидротермические условия, удобрения, урожайность, севооборот, эколого-агрохимические условия.*

Для цитирования: Наумченко Е.Т., Кубасов И.А. Влияние эколого-агрохимических условий на урожайность зерновых культур в севообороте // Плодородие. – 2021. – №4. – С. 69-72. DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.21.