

Динамика продуктивной влаги в дерново-подзолистой почве при возделывании ярового ячменя

© 2024. А. К. Свечников ✉, С. А. Замятин

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

В статье представлены результаты проведённого в 1996–2021 гг. в двух закладках многолетнего двухфакторного стационарного опыта в условиях Республики Марий Эл. Цель исследований – изучение динамики продуктивной влаги в слое дерново-подзолистой почвы 0–20 см в зависимости от предшественников ярового ячменя в шестипольных севооборотах. Предшественники – картофель с внесением 60 т/га навоза, яровые (овёс, яровая пшеница) и озимые зерновые (озимая пшеница и озимая рожь). При исследовании проведён корреляционно-регрессионный анализ данных между соответствующими гидротермическими коэффициентами Селянинова (ГТК) и запасами доступной влаги в почве в посевах ячменя в фазы «выход в трубку» и «восковая спелость зерна» после различных предшественников. В результате выяснено, что при размещении ячменя после овса повышение ГТК на единицу увеличивало к уборке ячменя количество доступной растениям почвенной влаги на $17,45 \pm 7,95$ мм. Мёртвые запасы влаги в этом случае формировались при ГТК менее 0,79. Данные корреляционно-регрессионного анализа по другим предшественникам были менее выраженными, но сохраняли отмеченную тенденцию. Установлено, что погодные условия 1996–2021 гг. в Республике Марий Эл к моменту посева ярового ячменя в основном обеспечивали «удовлетворительное» (20–30 мм) количество продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см. Самым лучшим предшественником в опыте определен картофель, после которого в течение вегетации ячменя запасы доступной влаги в почве меньше всего определялись ГТК – коэффициент детерминации (R^2) составил $0,306 \pm 0,096$, количество продуктивной влаги снизилось в среднем на 34,6 %. После зерновых культур, особенно овса, ГТК влиял на изменчивость показателя «количество продуктивной влаги» к уборке урожая значительно (R^2 – до $0,802 \pm 0,028$), уменьшая его от момента посева в два раза (до $15,1 \pm 5,1$ мм).

Ключевые слова: предшественники, овёс, пшеница, картофель, ГТК, регрессия, коэффициент детерминации

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № FNWE-2022-0005).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Свечников А. К., Замятин С. А. Динамика продуктивной влаги в дерново-подзолистой почве при возделывании ярового ячменя. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(6):1112–1123.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1112-1123>

Поступила: 03.04.2024

Принята к публикации: 06.12.2024

Опубликована онлайн: 25.12.2024

Productive moisture dynamics in sod-podzolic soil under spring barley cultivation

© 2024. Alexandr K. Svechnikov ✉, Sergey A. Zamyatin

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

The article presents the results of a long-term two-factor stationary experiment in the conditions of the Republic of Mari El, which was conducted in 1996–2021 in two plots. The aim of the research was to study the dynamics of productive moisture in the 0–20 cm layer of sod-podzolic soil depending on the predecessors of spring barley in six-field crop rotations. The predecessors were potatoes with application of 60 t/ha of manure, spring grain crops (oats, spring wheat) and winter cereals (winter wheat and winter rye). In the course of study a correlation and regression data analysis was carried out between the corresponding hydrothermal coefficient of Selyaninov (HTC) and the reserves of available soil water in barley sowings during “shooting” and “wax ripeness” phases after various predecessors. As a result, it was found out that sowing barley after oats led to one unit increase of HTC, that raised the amount of soil water available to plants by 17.45 ± 7.95 mm by the time of barley harvesting. Dead moisture reserves were possible at HTC less than 0.79 in this case. Correlation and regression analysis data for other predecessors were less evident, but retained the noted trend. It was established that the weather conditions of 1996–2021 in the Republic of Mari El to the time of spring barley sowing mainly provided “satisfactory” (20–30 mm) amount of productive soil moisture in the 0–20 cm soil layer. Potatoes were the best predecessors in the experiment. After that during the vegetation of barley the reserves of available water in the soil were least determined by the HTC – R -squared (R^2) was 0.306 ± 0.096 , the amount of productive moisture decreased by 34.6 % on average. After cereal crops, mainly oats, HTC affected significantly the variability of the “amount of productive moisture” indicator by the time of harvesting (R^2 up to 0.802 ± 0.028) reducing the yield twice from the moment of sowing (up to 15.1 ± 5.1 mm).

Keywords: predecessors, oat, wheat, potato, HTC, regression, R -squared

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme no. FNWE-2022-0005).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

Conflict of interests: the authors stated that there was no conflict of interests.

For citation: Svechnikov A. K., Zamyatin S. A. Productive moisture dynamics in sod-podzolic soil under spring barley cultivation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(6):1112–1123. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1112-1123>

Received: 03.04.2024

Accepted for publication: 06.12.2024 Published online: 25.12.2024

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) яровой формы в Нечерноземье – одна из ведущих яровых зерновых культур [1, 2]. Обеспеченность почвы влагой и питательными веществами является основным лимитирующим фактором получения стабильного урожая зерна хорошего качества [3, 4]. Известно, что доля влияния погодных факторов в формировании урожайности культуры достигает 81 % [5, 6, 7]. Польскими исследователями установлено, что добавление эффекта экстремальных погодных явлений к регрессионным моделям объясняло свыше 44 % изменчивости урожайности ячменя [8].

Исследователи со всего мира [9, 10], включая европейских [11, 12] и африканских [13], утверждают, что засуха, как одно из наиболее пагубных погодных явлений, по прогнозам будет возникать чаще и усилится к концу XXI века. Это приведёт к снижению в почве запасов продуктивной влаги, что повлечёт за собой уменьшение урожайности сельскохозяйственных культур [14], синтеза и отложения основных запасующих веществ в зерне [15, 16]. Повышению урожайности современных сортов ярового ячменя в подобных условиях может способствовать рациональный уровень внесения минеральных удобрений [17]. Так, в степной зоне Южного Урала в слое почвы 0–30 см при возделывании ячменя коэффициент корреляции между продуктивной влагой и сбором кормовых единиц составлял 0,530 [18]. Однако систематическая переувлажнённость почвы может вызывать загнивание семян и препятствовать росту биомассы растений, создавая неблагоприятные условия для корней [19]. Согласно некоторым исследованиям, в более влажные сезоны увеличиваются оптимальные нормы внесения азота [20], что способствует развитию корневых гнилей [21].

Кроме погодных условий, на величину запаса продуктивной влаги при неорошаемом земледелии также могут повлиять система внесения удобрений, предшественники, виды обработок почвы и ее плотность [22]. Так,

в Центрально-Черноземном регионе в 9-польном зернопаропропашном севообороте внесение минеральных удобрений (относительно неудобренного варианта) снижало запас продуктивной влаги корнеобитаемого слоя почвы под ячменём в среднем на 20,4 %, при существенном повышении коэффициента водопотребления культурой – в среднем на 25,6 % [23].

Даже при биологически схожих предшественниках может сильно различаться запас продуктивной влаги. Например, в слое почвы 0–30 см в условиях степи Южного Урала данный показатель весь период вегетации ярового ячменя (предшественник – яровой ячмень, монокультура) был ниже, чем после яровой пшеницы в 2,0–2,3 раза, гороха – в 2,4–3,2 раза [18].

Также замечено, что с повышением плотности почвы можно получить более высокую урожайность ярового ячменя благодаря лучшему сохранению влаги [24].

Сорта ярового ячменя, возделываемые на неорошаемых землях, как и многих зерновых культур, при дефиците влаги особенно страдают на репродуктивных стадиях и стадиях налива зерна [25]. Так, при возделывании ярового ячменя на черноземе обыкновенном (эрозионно опасный склон) от фазы выхода в трубку до молочно-восковой спелости растения расходуют в среднем около 40 % суммарной влаги [26].

Критическим периодом ячменя по теплообеспеченности и недостатку влаги являются фазы «кущение» и «трубкование» [7, 27]. В условиях Московской области в эти периоды коэффициент корреляции между показателем влагообеспеченности и урожайностью зерна составлял около 0,522 [7].

Исследования в условиях Калужской области показали, что дефицит осадков в период «кущение–колошение», относительно повышенного увлажнения, снижал урожайность зерна ярового ячменя сорта Владимир на 40,0–54,8 %. Кроме того, увеличивалось содержание белка в зерне на 1,4–1,7 % [28].

Цель исследований – изучить динамику продуктивной влаги в пахотном слое дерново-подзолистой почвы в течение вегетации ярового ячменя с учетом различных предшественников в шестипольных севооборотах.

Научная новизна – выявление зависимостей количества доступной влаги в слое дерново-подзолистой почвы 0–20 см от гидротермических условий вегетации ярового ячменя и предшественника культуры в различных севооборотах.

Материал и методы. На опытном поле Марийского НИИСХ – филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в 1996–2021 гг. был проведен многолетний двухфакторный стационарный опыт в двух закладках (табл. 1). Согласно схеме опыта, яровой ячмень возделывали в четырех севооборотах. Структура севооборотов:

1. Зернотравяной – овёс + клевер; клевер 1-го года пользования (г. п.) или вика + овёс; яровая пшеница; вика + овёс; озимая или яровая пшеница; ячмень.

Таблица 1 – Схема опыта /
Table 1 – Scheme of the experiment

Фактор А – севооборот / Factor A – crop rotation	Предшественник ярового ячменя / Predecessor of spring barley	Годы возделывания ярового ячменя / Spring barley cultivation (years)
1. Зернотравяной / Cereal-grass	Озимая пшеница / Winter wheat	2001, 2002, 2007, 2009
	Яровая пшеница / Spring wheat	2013, 2015, 2019, 2021
2. I плодосменный / I fruit-changing	Озимая рожь / Winter rye	2010, 2012, 2016, 2018
	Озимая пшеница / Winter wheat	1998, 2000, 2006, 2004
3. II плодосменный / II fruit-changing	Картофель с внесением навоза (80 т/га) / Potatoes with manure application (80 t/ha)	1999, 2001, 2005, 2007, 2011, 2013, 2017, 2019
4. III плодосменный / III fruit-changing	Овёс / Oat	1996, 1998, 2002, 2004, 2008, 2010, 2014, 2016
Фактор В – минеральные удобрения / Factor B – mineral fertilizers		1. N ₀ P ₀ K ₀ 2. N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀

Все применяемые агротехнические мероприятия в опыте проводили в соответствии с зональными рекомендациями.

Так, для яровых зерновых и зернобобовых культур (после однолетних) осеннюю обработку почвы проводили лущением тяжёлой бороной на глубину 6–8 см и отвальной вспашкой на 20–22 см, после картофеля ограничивались лущением тяжёлой бороной на 10–12 см, после многолетнего использования клевера – дисковой бороной на 6–8 см и отвальной вспашкой на 20–22 см. Весенняя обработка заключалась в бороновании на 3–5 см, культивации на 6–8 см и прикатывании. Под озимые все названные обработки проводили в осенний период (после

2. I плодосменный – вика + овёс; озимая рожь или пшеница; ячмень; картофель; вика + овёс; яровая пшеница.

3. II плодосменный – вика + овёс или горох + ячмень; яровая пшеница; картофель; ячмень + клевер; клевер 1-го г. п.; озимая пшеница или рожь).

4. III плодосменный – ячмень + клевер; клевер 1-го г. п. или вика + овёс + клевер; клевер 1-го или 2-го г. п.; озимая пшеница или рожь; картофель; овёс).

Таким образом, яровой ячмень возделывали по пяти предшественникам. Культуру не высевали только в 1997, 2003 и 2020 гг. эксперимента. Озимая рожь и яровая пшеница в качестве предшественников составляют слишком малую выборку, поскольку возделывались всего четыре раза вместо озимой пшеницы и овса соответственно. Поэтому в результатах исследований они включены в объединённую категорию – соответственно озимых и яровых зерновых культур.

многолетних трав почву культивировали дважды: на 6–8 и 5–6 см). Под посадки картофеля осенью проводили лущение тяжёлой дисковой бороной на 6–8 см и зяблевую вспашку – на 20–22 см, весной – боронование на 3–5 см, после внесения навоза проводили вспашку на 16–18 см, нарезку гребней. За вегетационный период картофель окучивали трижды.

Согласно схеме опыта, минеральные удобрения вносили перед посевом культур поделаячно в виде аммиачной селитры, двойного суперфосфата и хлористого калия. Под многолетние бобовые травы азотные удобрения не применяли.

Повторность вариантов трёхкратная. Делянки размещали систематически расщеплённым методом. Общая площадь делянок первого порядка 330 м², второго – 165 м².

Почва опытного участка – дерново-подзолистая среднесуглинистая. Перед началом исследований (1998 г.) пахотный слой (0–20 см) характеризовался следующими агрохимическими показателями: объёмная масса – 1,19 г/см³ по методу М. А. Качинского¹; влажность устойчивого завядания – 7,2 % (ГОСТ 28268-89²); содержание гумуса по Тюрину – 1,72 % (ГОСТ 26213-91³); рН солевой вытяжки – 5,67 (ГОСТ 26483-85⁴); гидролитическая кислотность – 14,1 мг·экв/100 г почвы; сумма поглощенных оснований – 89,0 мг·экв/100 г почвы (ГОСТ 27821-88⁵); содержание подвижных форм Р₂О₅ – 270 мг/кг почвы и К₂О по Кирсанову – 130 мг/кг почвы (ГОСТ 26207-84⁶).

Запасы продуктивной влаги рассчитывали по формуле:

$$W = 0,1 \cdot (W_{\text{ф}} - W_3) \cdot \delta \cdot h, \quad (1)$$

где W – запасы продуктивной влаги, мм;

$W_{\text{ф}}$ – фактическая полевая влажность почвы, %;

W_3 – влажность устойчивого завядания, %;

δ – объёмная масса почвы, г/см³;

h – толщина слоя почвы, см (20 см).

Для характеристики гидротермических условий вегетации использовали значения гидротермического коэффициента, рассчитанного по методике Селянинова⁷. Исследования и статистический анализ данных проводили в соответствии с методикой полевого опыта⁸ с помощью программы Microsoft Office Excel 2013. Значения стандартной ошибки средней, доверительного интервала, коэффициента детерминации и кри-

терия существенности коэффициента регрессии приведены при 5%-ном уровне значимости.

Результаты и их обсуждение. Количеству запасов продуктивной влаги при его содержании в слое почвы 0–20 см свыше 40 мм принято давать оценку «хорошо», при 20–40 мм – «удовлетворительно», при менее 20 мм – «неудовлетворительно»⁹. В опыте существенных различий по влиянию применяемых удобрений на запасы продуктивной влаги не прослеживалось. Согласно полученным данным, средние величины рассматриваемого показателя перед посевом ярового ячменя из года в год в основном находились в пределах «удовлетворительной» зоны (табл. 2). В случае выращивания культуры после овса подобные условия увлажнения (21,3±3,1 мм) в предпосевной период достигали «неудовлетворительных» значений (каждый второй год). Некоторые исследователи считают, что благоприятный запас почвенной влаги в слое 0–20 см во время прорастания семян составляет 30–40 мм [4]. В наших исследованиях данные значения перед посевом достигались лишь каждый третий год (в основном при размещении ячменя после озимой пшеницы и картофеля).

Неустойчивое влияние предшественника на обеспечение доступной почвенной влагой всходов ячменя подтверждают также значения коэффициента вариации (свыше 33 %), свидетельствующие о неоднородности данных по накоплению продуктивной влаги. Высокая изменчивость показателя может сигнализировать о необходимости введения мероприятий (например, по снегозадержанию) для создания более стабильного уровня влажности почвенного пласта перед посевом.

¹Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почв: учебное пособие по специальности «Агрохимия и почвоведение». М.: Агропромиздат, 1986. Вып. 3-е изд., перераб. и доп. 415 с. URL: <https://reallib.org/reader?file=478697>

²ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. М.: Стандартинформ, 1990. 8 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/798/4294826517.pdf>

³ГОСТ 26213-91 Почвы. Методы определения органического вещества (по Тюрину). М.: Стандартинформ, 1993. 8 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/f09/4294828267.pdf>

⁴ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение её рН по методу ЦИНАО. М.: Издательство стандартов, 1985. 6 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/738/4294827946.pdf>

⁵ГОСТ 27821-88. Почвы. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. М.: Издательство стандартов, 1990. 7 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/3a6/4294826916.pdf>

⁶ГОСТ 26207-91. Определение подвижных форм фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Издательство стандартов, 1993. 7 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/c43/4294828273.pdf>

⁷Селянинов Г. Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата. В кн.: Мировой агроклиматический справочник. Л.-М.: Печатня, 1937. 77 с.

⁸Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. Вып. 5-е изд., доп. и перераб. 351 с.

⁹Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Указ. соч.

Таблица 2 – Динамика продуктивной влаги в пахотном слое дерново-подзолистой почвы (0–20 см) в течение вегетации ярового ячменя после разных предшественников (1996–2021 гг.) /
 Table 2 – Dynamics of productive moisture in the arable layer of sod-podzolic soil (0–20 cm) during the growing season of spring barley after different predecessors (1996–2021)

Фаза развития ячменя / Barley growth stage	Показатель / Parameter	Предшественник / Predecessors				
		картофель / potato	овёс / oat	озимая пшеница / winter wheat	озимые зерновые / winter cereals	яровые зерновые / spring cereals
Перед посевом / Before sowing	$\bar{X}$, мм / mm	26,3±1,5	21,3±3,1	28,8±2,4	26,6±2,1	23,9±2,3
	CV, %	15,4	37,9	21,9	26,5	32,4
Выход в трубку / Shooting	$\bar{X}$, мм / mm	18,0±3,2	13,2±2,0	16,6±1,5	16,1±1,7	14,1±2,0
	CV, %	49,2	41,7	25,2	35,8	47,9
Восковая спелость / Wax ripeness	$\bar{X}$, мм / mm	17,2±2,3	10,3±3,2	13,7±2,7	12,5±2,9	11,5±2,3
	CV, %	37,0	83,7	54,6	78,5	67,5

Примечания: $\bar{X}$ – среднее количество продуктивной влаги в почве со стандартной ошибкой ($\pm$) при 5%-ном уровне значимости; CV – коэффициент вариации /

Notes: $\bar{X}$ – average amount of productive soil moisture with standard error of $\pm$ at 5% significance level; CV – variation coefficient

Картофель – пропашная культура, поэтому несмотря на внесение навоза хорошо сохраняла доступную влагу в почве (26,3±1,5 мм) к посеву ярового ячменя при средней (от 10 до 20 %) степени изменчивости показателя. Незначительно больше, относительно картофеля, количество запасов продуктивной влаги наблюдали после озимой пшеницы (28,8±2,4 мм), главным образом, благодаря обработке участка по системе полупара после уборки урожая. Поэтому изучаемый показатель после озимых зерновых в целом (26,6±2,1 мм) был выше на 2,7 мм, чем после яровых (23,9±2,3 мм), но статистически доказано это увеличение лишь при уровне значимости свыше 10,8 %.

К моменту выхода в трубку у ярового ячменя весенние накопленные запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы теряются и в дальнейшем формируются лишь последующими атмосферными осадками. Поэтому количество доступной для растений почвенной влаги снизилось на 8,1–12,2 мм (31,6–42,3 %) в зависимости от предшественников. К уборке урожая показатель снизился на 0,8–3,6 мм (4,4–22,4 %). За весь вегетационный период ячменя снижение запасов продуктивной влаги составило 9,1–15,1 мм (34,6–53,0 %). Таким образом, основные потери влаги пришлось ближе к самому критическому периоду роста и развития ярового ячменя – фазе «выход в трубку». В последующий период – до восковой спелости зерна – запасы почвенной влаги в пахотном слое

снижались с меньшей интенсивностью, однако для растений ячменя в фазу созревания «неудовлетворительный» уровень влагообеспеченности был не критичным и вполне допустимым.

В посевах ячменя, размещенного после картофеля, было зафиксировано наибольшее количество продуктивной влаги как в середине (18,0±3,2 мм), так и конце (17,2±2,3 мм) вегетации, возможно, благодаря лучшему её накоплению в нижних слоях почвы. При данном предшественнике снижение рассматриваемого показателя составило 8,3±4,7 мм (31,6 %) к фазе «выход в трубку» и почти такое же (9,1±3,8 мм, или 34,6 %) к фазе «восковая спелость». Тем не менее, существенное преимущество картофеля по сравнению с озимой пшеницей по сохранению продуктивной влаги в посевах ячменя в фазу «выход в трубку» отмечали лишь при значимости 55,1 %, в фазу «восковая спелость» – 16,2 %. Наиболее иссушенной почва была после овса: в середине вегетации после данного предшественника запас продуктивной влаги составил 13,2±2,0 мм, в конце – 10,3±3,2 мм, что на 26,7 и 40,1 % ниже, чем после картофеля. Потери влаги за летний сезон в данном случае были двукратными и составили 11,0±6,3 мм. Различия по показателю между озимыми и яровыми зерновыми оставались несущественными.

Количество продуктивной влаги в середине вегетации ярового ячменя в пахотном слое почвы продемонстрировало наибольшую связь со сбором кормовых единиц в зерне

(рис. 1). Однако это влияние было умеренное ($R^2 = 0,406 \pm 0,038$) для предельных значений продуктивной влаги – от 4,2 до 33,7 мм

(разница 29,5 мм). Согласно уравнению, заметную связь можно спрогнозировать лишь при диапазоне доступной влаги 34,7 мм.

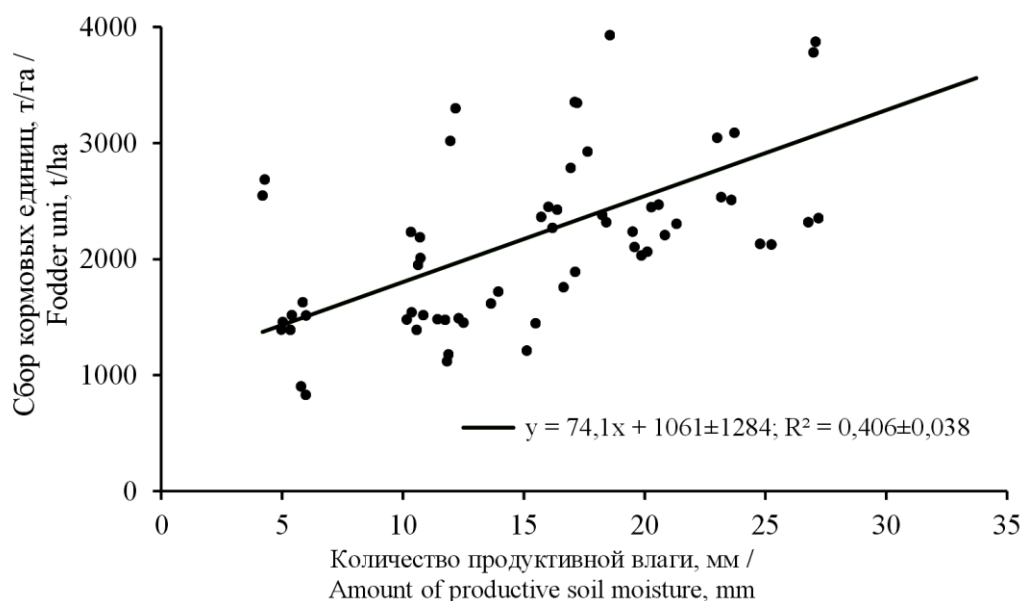


Рис. 1. Влияние количества продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см в середине вегетации ярового ячменя на сбор кормовых единиц (1996–2021 гг.) /

Fig. 1. Effect of productive moisture in the 0–20 cm soil layer in the middle of spring barley vegetation on fodder units harvesting (1996–2021)

В течение вегетации ярового ячменя влияние различных факторов на содержание продуктивной влаги усиливалось, что отражалось в повышении коэффициента вариации при его возделывании почти по всем предшественникам (кроме картофеля), особенно по овсу ($CV = 83,7\%$ в фазу восковой спелости ячменя).

Влияние предшественников на запасы доступной влаги хорошо продемонстрировал коэффициент детерминации R^2 линейного уравнения между количеством продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см и гидротермическим коэффициентом Селянинова (табл. 3). Также следует отметить, что отрицательного направления регрессии в эксперименте не наблюдали. Более того, самые низкие значения ГТК (в среднем 0,895) за период от посева семян до выхода в трубку ячменя пришлось при его возделывании после яровых зерновых, что лучше может объяснить наименьшее количество продуктивной влаги в почве при данных предшественниках, чем сами предшественники. Однако картофель обеспечил самые высокие запасы почвенной воды со средними по опыту ГТК – 1,070, а озимая пшеница – лишь средние запасы с наибольшим ГТК – 1,290.

К середине вегетации ярового ячменя наибольшая взаимосвязь между ГТК и коли-

чеством продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см прослеживалась при возделывании после овса. Коэффициент детерминации в этом случае составил $0,613 \pm 0,054$. Согласно шкале Чеддока, эта связь относится к значимой на 5%-ном уровне. При этом значения ГТК в наблюдениях были весьма различными: от 0,4 (очень засушливые условия) до 2,1 (избыточно увлажнённые), что можно увидеть на графике (рис. 2). Это демонстрировало и самый высокий коэффициент вариации (59,5 %) в данный период вегетации. Поскольку была выявлена значимая связь ГТК с запасами доступной влаги, вычислено и приведено на рисунке уравнение линейной регрессии ($y = 8,50x + 5,56 \pm 7,08$), согласно которому при полном отсутствии осадков с момента посева (после овса) до трубкования ячменя в пахотном слое почвы может сохраниться небольшая часть весенних запасов доступной воды ($5,56 \pm 7,08$ мм). Можно утверждать, что увеличение ГТК с 0,4 до 2,1 повышает количество продуктивной влаги с $8,96 \pm 7,08$ мм до $23,41 \pm 7,08$ мм.

Только после картофеля ГТК характеризовался значительной изменчивостью по годам ($CV = 32,4\%$), в то время как после остальных культур-предшественников показатель был неоднородным ($CV \geq 40,7\%$). Картофель в качестве

предшественника, независимо от гидротермических условий ($R^2 = 0,034 \pm 0,134$), способствовал сохранению влаги в слое почвы 0–20 см до фазы «выход в трубку» злака. После озимой пшеницы прослеживалась умеренная связь между изучаемыми показателями ($R^2 = 0,320 \pm 0,094$), что недостаточно для выявления регрессии. При сравнении озимых и яровых злаковых

культур сила связи становилась ожидаемо выше после второго предшественника ($R^2 = 0,349 \pm 0,057$), нежели первого ($R^2 = 0,064 \pm 0,082$). Таким образом, озимые зерновые предшественники уступали картофелю по влиянию на сохранение продуктивной влаги в верхнем слое почвы до середины вегетации ячменя в различных погодных условиях.

Таблица 3 – Взаимосвязи между гидротермическим коэффициентом и количеством продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см при разных предшественниках в начале и конце вегетации ярового ячменя (1996–2021 гг.) /
Table 3 – Relationships between the hydrothermal coefficient and the amount of productive moisture in the 0–20 cm soil layer under different predecessors at the beginning and at the end of spring barley vegetation (1996–2021)

Фаза развития / Growth stage	Показатель / Index	Предшественник / Predecessor				
		картофель / potato	овёс / oat	озимая пшеница / winter wheat	озимые зерновые / winter cereals	яровые зерновые / spring cereals
Выход в трубку / Shooting	R^2	0,034±0,134	0,613±0,054	0,320±0,094	0,064±0,082	0,349±0,057
	$\bar{X}_{ГТК} / \bar{X}_{НТС}$	1,070	0,893	1,290	1,079	0,895
	$CV_{ГТК}, \% / V_{НТС}, \%$	32,4	59,5	40,7	50,3	47,9
Восковая спелость / Wax ripeness	R^2	0,306±0,096	0,802±0,028	0,6385±0,050	0,535±0,041	0,793±0,018
	$\bar{X}_{ГТК} / \bar{X}_{НТС}$	1,343	0,922	1,320	1,110	1,190
	$CV_{ГТК}, \% / V_{НТС}, \%$	29,2	50,4	26,4	68,0	68,4

Примечания: R^2 – коэффициент детерминации между гидротермическим коэффициентом (ГТК) и количеством продуктивной влаги в почве с доверительным интервалом $\pm$ при 5%-ном уровне значимости; $\bar{X}_{ГТК}$ – средний ГТК к моменту измерения; $CV_{ГТК}$ – коэффициент вариации ГТК /

Notes: R^2 – R-squared between hydrothermal coefficient (HTC) and amount of productive soil moisture with confidence interval $\pm$ at 5% significance level; $\bar{X}_{НТС}$ – average HTC at the time of measurement; $CV_{НТС}$ – variation coefficient of HTC

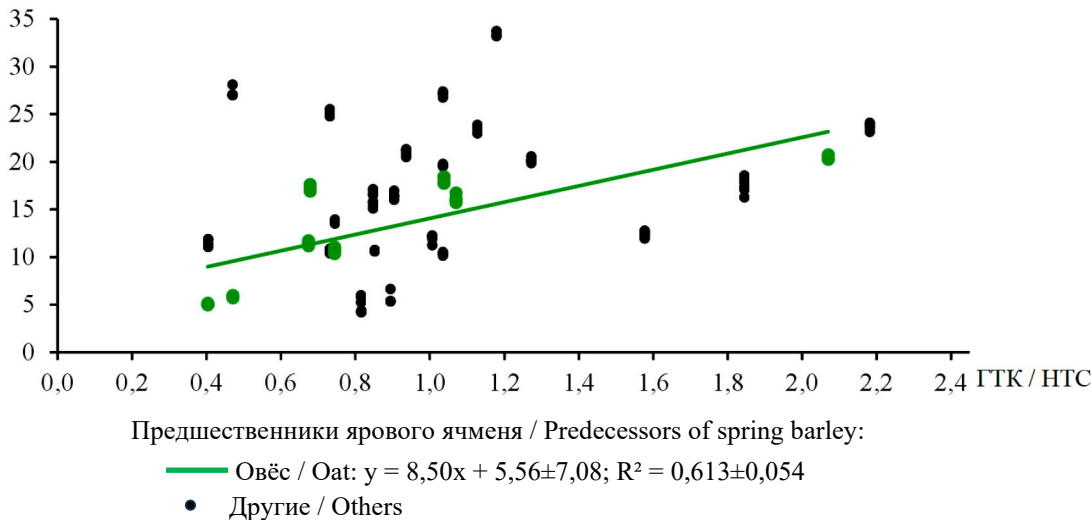


Рис. 2. Связь между ГТК (в период от посева до фазы «трубкование» ярового ячменя) и продуктивной влагой в слое почвы 0–20 см (в середине вегетации) в зависимости от предшественников (1996–2021 гг.) /
Fig. 2. Relationship between HTC (from spring barley sowing to shooting stage) and productive moisture in 0–20 cm soil layer (in the mid-growth) depending on its predecessors (1996–2021)

К восковой спелости изучаемой культуры гидротермические условия улучшились. В результате ГТК за всю вегетацию (относи-

тельно периода «посев-трубкование») в среднем повысился на 19,7 %. Многолетние колебания показателя стали существенными не только

после картофеля ($CV = 29,2\%$), но и озимой пшеницы ($CV = 26,4\%$). После других предшественников коэффициент вариации свидетельствовал о неоднородности значений ГТК.

Поскольку со второй половины вегетации яровой ячмень начинает полностью зависеть от летних осадков, взаимосвязь между ГТК и запасом продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см значительно усилилась ($R^2 = 0,591$).

Самая тесная корреляционная связь установлена между ГТК и доступной почвенной влагой в те годы, когда изучаемая культура возделывалась после овса. Эта зависимость характеризовалась как высокая по шкале Чеддока ($0,802 \pm 0,028$), которую можно выразить через прямолинейную регрессию, представленную на графике (рис. 3). Согласно уравнению ($y = 17,45x - 5,80 \pm 7,95$), установленному в ходе вычислений, при отсутствии осадков в течение вегетации после данного предшественника

запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы к уборке ярового ячменя могли достигать отрицательных значений (до $-5,80 \pm 7,95$ мм). При этом повышение ГТК на единицу сопровождалось увеличением количества доступной растениям почвенной влаги на $17,45 \pm 7,95$ мм. Стоит отметить, что согласно данной модели, удовлетворительные запасы влаги обеспечивались при среднеарифметических ГТК в пределах 1,47...2,62, что обычно соответствует зонам избыточного увлажнения. С учётом 5%-ной значимости данных, подобных запасов возможно достичь при ГТК свыше 1,02 (условия зоны обеспеченного увлажнения). Минимально возможный ГТК с оценкой «хорошо» в этом случае составил 2,17, чего в опыте не наблюдали. Уравнение показало, что слой почвы 0–20 см к концу вегетации ярового ячменя при данном предшественнике мог иметь мёртвый запас влаги при ГТК менее 0,79.

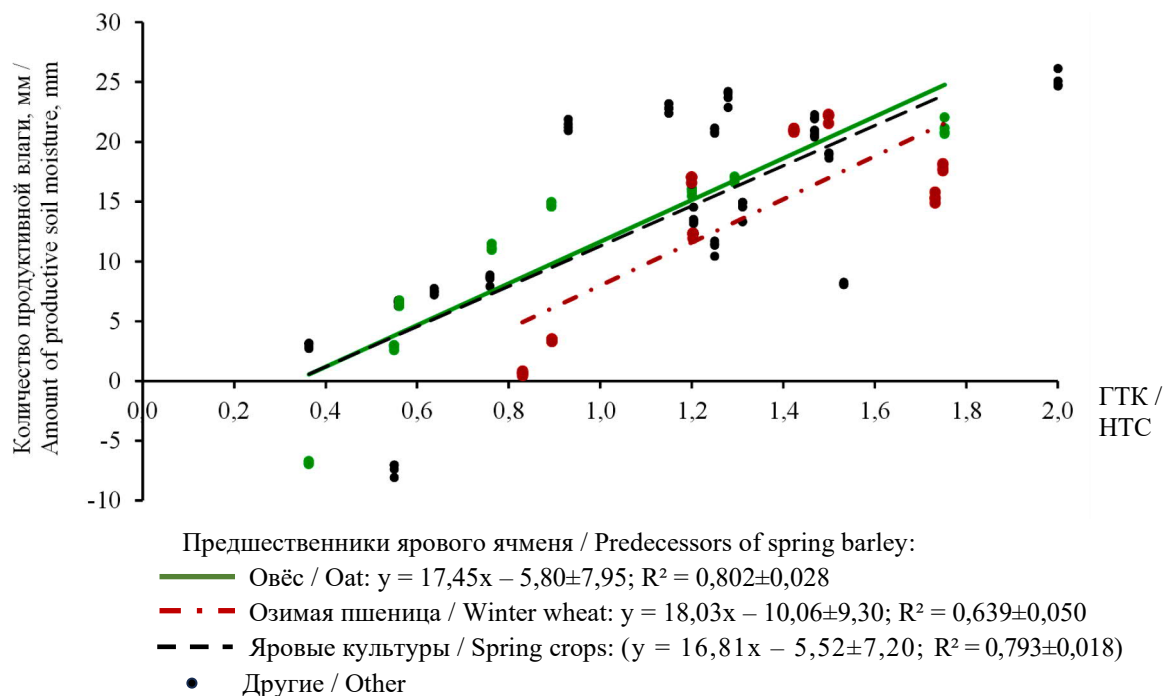


Рис. 3. Связь между значениями ГТК за вегетацию ярового ячменя и продуктивной влагой в слое почвы 0–20 см (перед уборкой урожая) в зависимости от предшественников (1996–2021 гг.) /

Fig. 3. Relationship between HTC for the spring barley vegetation and productive moisture in 0–20 cm soil layer (before harvesting) depending on its predecessors (1996–2021)

После озимой пшеницы количество продуктивной влаги в пахотном слое почвы к фазе восковой спелости ячменя также стало существенно зависеть от погодных условий. В данном случае ГТК, наблюдавшийся в пределах от 0,83 до 1,75 (рис. 3), с доступной почвенной влагой коррелировал в значительной степени ($R^2 = 0,639 \pm 0,050$). Представленное в графике линейное уравнение ($y = 18,03x - 10,06 \pm 9,30$)

имеет коэффициент регрессии, очень близкий к полученному по предшественнику «овес». Тем не менее, согласно полученному уравнению, минимально возможное значение ГТК, позволяющее при 5%-ом уровне значимости достигать «удовлетворительных» запасов продуктивной влаги, составило 1,24, что характерно для условий зон обеспеченного увлажнения. Запасы продуктивной влаги с оценкой

«хорошо» могли быть достигнуты при значении ГТК, равном 2,26, чего не наблюдали в эксперименте. Уравнение показало, что слой почвы 0–20 см к концу вегетации ярового ячменя при данном предшественнике (озимая пшеница) в редкие годы может достичь мёртвого запаса влаги, даже при умеренном ГТК (1,07). Это значение выше, чем после овса, что обусловлено более высокой рассеянностью данных и коэффициентом регрессии. Благодаря полученным уравнениям можно утверждать, что в целом за вегетацию ярового ячменя овёс в качестве предшественника не уступает озимой пшенице по накоплению продуктивной влаги в слое почвы 0–20 см.

По предшественнику ячменя – картофелю – уравнение регрессии не вычисляли, поскольку связь между ГТК и продуктивной влагой незначительная ($R^2 = 0,306 \pm 0,096$). По озимым зерновым культурам также не приведено, т. к. нижняя граница доверительного интервала коэффициента детерминации находится в средней зоне по шкале Чеддока ($R^2 = 0,535 \pm 0,041$). На графике отображена пунктиром линия, описывающая связь между изучаемыми показателями после яровых культур, которая была крайне близка с приведённой для предшествующего овса. Всё же стоит отметить, что точность данной регрессионной модели в опыте самая высокая. Согласно уравнению, при отсутствии осадков в течение вегетации после яровых предшественников количество доступной воды

в пахотном слое почвы к уборке ярового ячменя составило $5,52 \pm 7,20$ мм. При этом повышение ГТК на единицу увеличивало количество доступной растениям почвенной влаги на $16,81 \pm 7,20$ мм. Значения ГТК, позволившие при 5%-ном уровне значимости обеспечивать запасы продуктивной влаги с оценкой «удовлетворительно» в слое почвы 0–20 см составили 1,09–3,13, «хорошо» – свыше 2,28. В данном профиле почвенного пласта к концу вегетации ярового ячменя при данных предшественниках и ГТК до 0,76 можно достичь мёртвых запасов влаги.

Заключение. В результате исследований выяснено, что погодные условия 1996–2021 гг. в Республике Марий Эл к посеву ярового ячменя в различных севооборотах в основном обеспечивали «удовлетворительное» (20–30 мм) количество продуктивной влаги в слое дерново-подзолистого почвы 0–20 см. Самым лучшим предшественником ячменя по сохранению доступной почвенной влаги в опыте установлен картофель. После него в течение вегетации ячменя запасы доступной воды в почве меньше всего определялись ГТК (R^2 к уборке составил $0,306 \pm 0,096$, количество продуктивной влаги снизилось в среднем на 34,6 %). После зерновых культур, особенно овса, ГТК определял изменчивость показателя к уборке урожая значительно или высоко (R^2 – до $0,802 \pm 0,028$), уменьшая количество доступной влаги от момента посева в два раза (до $15,1 \pm 5,1$ мм).

Список литературы

1. Носкова Е. Н., Козлова Л. М., Попов Ф. А., Светлакова Е. В. Влияние способов обработки почвы и видов удобрений на агрофизические свойства почвы, засоренность посевов и урожайность ячменя. Таврический вестник аграрной науки. 2022;3(31):148–158. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49865417> EDN: URZDYV
2. Гаврилова А. Ю., Конова А. М., Самсонова Н. Е. Влияние доз и сочетаний минеральных удобрений на формирование урожайности и качества зерна пивоваренного ячменя в центральном Нечерноземье. Агрохимия. 2020;(9):24–31. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120090069> EDN: UNDGHD
3. Морозов Н. А., Ходжаева Н. А., Хрипунов А. И., Община Е. Н. Продуктивная влага и урожайность озимой пшеницы в сухостепной полосе Ставрополья. Аграрная наука. 2021;(5):47–50. DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-349-5-47-50> EDN: PCQNLU
4. Gorash O., Klymyshena R., Khomina V., Vilchynska L. Ecological and biological conformity of conditions of the brewing barley cultivation zone. Ukrainian Journal of Ecology. 2020;10(1):246–253. DOI: https://doi.org/10.15421/2020_39
5. Курылева А. Г. Адаптивная реакция сортов ячменя при экологическом испытании в условиях Удмуртской Республики. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018;(6):52–57. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.67.6.52-57> EDN: YPVSZN
6. Ключков А. В., Соломко О. Б., Ключкова О. С. Влияние погодных условий на урожайность сельскохозяйственных культур. Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2019;(2):101–105. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38552716> EDN: HHOJJO
7. Левакова О. В., Дедушев И. А., Ерошенко Л. М., Ромахин М. М., Ерошенко А. Н., Ерошенко Н. А., Болдырев М. А., Гладышева О. В. Влияние агрометеорологических изменений климата на зерновую продуктивность ярового ячменя в условиях Нечерноземной зоны РФ. Юг России: экология, развитие. 2022;171(62):128–135. DOI: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-1-128-135> EDN: APZPOW

8. Piniewski M., Marcinkowski P., O'Keeffe J., Szcześniak M., Nieróbca A., Kozyra J., Kundzewicz Z. W., Okruszko T. Model-based reconstruction and projections of soil moisture anomalies and crop losses in Poland. *Theor Appl Climatol.* 2020;140(1):691–708. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03106-6>
9. Lee H., Calvin K., Dasgupta D., Krinner G., Mukherji A., Thorne P., et al. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
10. Dube K., Nhamo G., Chikodzi D. Climate change-induced droughts and tourism: Impacts and responses of Western Cape province, South Africa. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism.* 2022;39:100319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jort.2020.100319>
11. Martínez-Fernández J., González-Zamora A., Sánchez N., Gumuzzio A. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *Journal of Hydrology.* 2015;522:265–273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.051>
12. Benito-Verdugo P., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Almendra-Martín L., Gaona J., Herrero-Jiménez C. M. Impact of Agricultural Drought on Barley and Wheat Yield: A Comparative Case Study of Spain and Germany. *Agriculture.* 2023;13(11):2111. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13112111>
13. Appiah M., Abdulai I., Schulman A. H., Moshelion M., Dewi E. S., Daszkowska-Golec A., Bracho-Mujica G., Rötter R. P. Drought response of water-conserving and non-conserving spring barley cultivars. *Frontiers in Plant Science.* 2023;14:1247853. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1247853>
14. Groh J., Vanderborght J., Pütz T., Vogel H. J., Gründling R., Rupp H., et al. Responses of soil water storage and crop water use efficiency to changing climatic conditions: a lysimeter-based space-for-time approach. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2020;24(3):1211–1225. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-1211-2020>
15. Havrlentová M., Dvořáček V., Jurkaninová L., Gregusová V. Unraveling the Potential of β -D-Glucans in Poales. *Life.* 2023;13(6):1387. DOI: <https://doi.org/10.3390/life13061387>
16. Khaleghdoust B., Esmailzadeh-Salestani K., Korge M., Alaru M., Möll K., Värnik R., et al. Barley and wheat beta-glucan content influenced by weather, fertilization, and genotype. *Frontiers in Sustainable Food Systems.* 2024;7:1326716. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1326716>
17. Bezpal'ko V. V., Stankevych S. V., Zhukova L. V., Zabrodina I. V., Turenko V. P., Horyainova V. V., et al. Pre-sowing seed treatment in winter wheat and spring barley cultivation. *Ukrainian Journal of Ecology.* 2020;10(6):255–268. DOI: https://doi.org/10.15421/2020_291
18. Mitrofanov D. V., Zorov A. A., Skorokhodov V. Y., Kaftan Y. V., Zenkova N. A. The influence of main factors on productivity of barley in the steppe zone of the Southern Urals. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci.* 2022;1045(1):012105. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012105>
19. Yang M., Wang G., Lazin R., Shen X., Anagnostou E. Impact of planting time soil moisture on cereal crop yield in the Upper Blue Nile Basin. *Agricultural Water Management.* 2021;243:106430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106430>
20. Osman R., Tahir M. N., Ata-Ul-Karim S. T., Ishaque W., Xu M. Exploring the Impacts of Genotype-Management-Environment Interactions on Wheat Productivity, Water Use Efficiency, and Nitrogen Use Efficiency under Rainfed Conditions. *Plants.* 2021;10(11):2310. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10112310>
21. Козлова Л. М., Носкова Е. Н., Попов Ф. А. Оценка развития болезней зерновых культур при ресурсосберегающих системах обработки почвы и применении биопрепаратов в адаптивно-ландшафтном земледелии. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2020;21(6):721–732. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.6.721-732> EDN: FUMOYG
22. Чернов О. С. Яровая пшеница в агроэкосистемах Верхневолжья. *Владимирский земледелец.* 2022;(4):43–52. DOI: <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2022-4-43-52> EDN: ZDHAUY
23. Чайкин В. В., Новичихин А. М. Влияние удобрений на водный режим культур севооборота в условиях Воронежской области. *Международный научно-исследовательский журнал.* 2023;(11(137)):22. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.80> EDN: QJSJRQ
24. Ward M., Forristal P. D., McDonnell K. Impact of field headlands on wheat and barley performance in a cool Atlantic climate as assessed in 40 Irish tillage fields. *Irish Journal of Agricultural and Food Research.* 2020;59(1):85–97. DOI: <https://doi.org/10.15212/ijafr-2020-0113>
25. Attia M., Mohamed M., Mofreh Abou Tahoun A., Abdelghany F., Elserafi R. Productivity of some barley cultivars as affected by supplemental irrigation under rainfed conditions. *Australian Journal of Crop Science.* 2022;16(05):665–675. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.05.p3647>
26. Батищев И. В., Ильинская И. Н. Почвенные влагозапасы и водный баланс посевов ячменя ярового на эрозионно опасном склоне. *Мелиорация и гидротехника.* 2023;13(4):161–181. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-161-181> EDN: OBHCXF
27. Глуховцев В. В., Санина Н. В. Эффективность листовых подкормок в аридных условиях Среднего Поволжья при возделывании ярового ячменя. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета.* 2016;4(60):40–42. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26586307> EDN: UDPVSK

28. Филатов А. Н., Мазуров В. Н., Храмой В. К., Арланцева Е. Р. Влияние способов обработки почвы и уровней минерального питания на урожайность и качество зерна ярового ячменя сорта Владимир в условиях центрального района Нечерноземной зоны. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2021;(1):18–28. DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2021-1-18-28> EDN: FZSJZN

References

1. Noskova E. N., Kozlova L. M., Popov F. A., Svetlakov E. V. Influence of tillage methods and fertilizer types on agrophysical properties of soil, weed infestation of crops and yield of barley. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2022;3(31):148–158. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49865417>
2. Gavrilova A. Yu., Konova A. M., Samsonova N. E. Influence of doses and combinations of mineral fertilizers on formation of productivity and quality of malting barley grain in the Central Non-chernozem region. *Agrokhimiya*. 2020;(9):24–31. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120090069>
3. Morozov N. A., Khodzhaeva N. A., Khripunov A. I., Obshchiya E. N. Productive moisture and yield of winter wheat in the dry-steppe belt of the Stavropol region. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2021;(5):47–50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-349-5-47-50>
4. Gorash O., Klymyshena R., Khomina V., Vilchynska L. Ecological and biological conformity of conditions of the brewing barley cultivation zone. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020;10(1):246–253. DOI: https://doi.org/10.15421/2020_39
5. Kuryleva A. G. Adaptive reaction of barley varieties during environmental testing in the Udmurt Republic. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018;(6):52–57. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.67.6.52-57>
6. Klochkov A. V., Solomko O. B., Klochkova O. S. The influence of weather conditions on crop yields. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy. 2019;(2):101–105. (In Belarus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38552716>
7. Levakova O. V., Dedushev I. A., Eroshenko L. M., Romakhin M. M., Eroshenko A. N., Eroshenko N. A., Boldyrev M. A., Gladysheva O. V. Influence of agrometeorological climate changes on grain productivity of spring barley in the Non-chernozem zone of the Russian Federation. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie* = South of Russia: ecology, development. 2022;17(1):128–135. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2022-1-128-135>
8. Piniewski M., Marcinkowski P., O'Keeffe J., Szczesniak M., Nieróbca A., Kozyra J., Kundzewicz Z. W., Okruszko T. Model-based reconstruction and projections of soil moisture anomalies and crop losses in Poland. *Theor Appl Climatol*. 2020;140(1):691–708. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03106-6>
9. Lee H., Calvin K., Dasgupta D., Krinner G., Mukherji A., Thorne P., et al. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
10. Dube K., Nhamo G., Chikodzi D. Climate change-induced droughts and tourism: Impacts and responses of Western Cape province, South Africa. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*. 2022;39:100319. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jort.2020.100319>
11. Martínez-Fernández J., González-Zamora A., Sánchez N., Gumuzzio A. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator. *Journal of Hydrology*. 2015;522:265–273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.051>
12. Benito-Verdugo P., Martínez-Fernández J., González-Zamora Á., Almendra-Martín L., Gaona J., Herrero-Jiménez C. M. Impact of Agricultural Drought on Barley and Wheat Yield: A Comparative Case Study of Spain and Germany. *Agriculture*. 2023;13(11):2111. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13112111>
13. Appiah M., Abdulai I., Schulman A. H., Moshelion M., Dewi E. S., Daszkowska-Golec A., Bracho-Mujica G., Rötter R. P. Drought response of water-conserving and non-conserving spring barley cultivars. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1247853. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1247853>
14. Groh J., Vanderborght J., Pütz T., Vogel H. J., Gründling R., Rupp H., et al. Responses of soil water storage and crop water use efficiency to changing climatic conditions: a lysimeter-based space-for-time approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020;24(3):1211–1225. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-1211-2020>
15. Havrlentová M., Dvořáček V., Jurkaninová L., Gregusová V. Unraveling the Potential of β -D-Glucans in Poales. *Life*. 2023;13(6):1387. DOI: <https://doi.org/10.3390/life13061387>
16. Khaleghdoust B., Esmailzadeh-Salestani K., Korge M., Alaru M., Möll K., Värnik R., et al. Barley and wheat beta-glucan content influenced by weather, fertilization, and genotype. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2024;7:1326716. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1326716>
17. Bezpal'ko V. V., Stankevych S. V., Zhukova L. V., Zabrodina I. V., Turenko V. P., Horyainova V. V., et al. Pre-sowing seed treatment in winter wheat and spring barley cultivation. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020;10(6):255–268. DOI: https://doi.org/10.15421/2020_291

18. Mitrofanov D. V., Zorov A. A., Skorokhodov V. Y., Kaftan Y. V., Zenkova N. A. The influence of main factors on productivity of barley in the steppe zone of the Southern Urals. IOP Conf Ser: Earth Environ Sci. 2022;1045(1):012105. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012105>
19. Yang M., Wang G., Lazin R., Shen X., Anagnostou E. Impact of planting time soil moisture on cereal crop yield in the Upper Blue Nile Basin. Agricultural Water Management. 2021;243:106430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106430>
20. Osman R., Tahir M. N., Ata-Ul-Karim S. T., Ishaque W., Xu M. Exploring the Impacts of Genotype-Management-Environment Interactions on Wheat Productivity, Water Use Efficiency, and Nitrogen Use Efficiency under Rainfed Conditions. Plants. 2021;10(11):2310. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10112310>
21. Kozlova L. M., Noskova E. N., Popov F. A. Assessment of the development of cereal diseases when applying resource saving soil tillage systems and using biopreparations in adaptive landscape crop farming. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(6):721–732. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.6.721-732>
22. Chernov O. S. Spring wheat in agroecosystems of the Upper Volga. *Vladimirskiy zemledelets* = Vladimir agriculturist. 2022;(4):43–52. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2022-4-43-52>
23. Chaykin V. V., Novichikhin A. M. Influence of fertilizers on the water regime of crop rotation in conditions of Voronezh oblast. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2023;(11(137)):22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.80>
24. Ward M., Forristal P. D., McDonnell K. Impact of field headlands on wheat and barley performance in a cool Atlantic climate as assessed in 40 Irish tillage fields. Irish Journal of Agricultural and Food Research. 2020;59(1):85–97. DOI: <https://doi.org/10.15212/ijaf-2020-0113>
25. Attia M., Mohamed M., Mofreh Abou Tahoun A., Abdelghany F., Elserafi R. Productivity of some barley cultivars as affected by supplemental irrigation under rainfed conditions. Australian Journal of Crop Science. 2022;16(05):665–675. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.05.p3647>
26. Batishchev I. V., Ilinskaya I. N. Soil water storage and water balance of spring barley crops on the erosion-hazardous slope. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023;13(4):161–181. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-4-161-181>
27. Glukhovtsev V. V., Sanina N. V. Effectiveness of foliar extra nutrition of spring barley under arid conditions of Central Povolzh'ye. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2016;4(60):40–42. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26586307>
28. Filatov A. N., Mazurov V. N., Khramov V. K., Arlantseva E. R. Effect of tillage methods and levels of mineral nutrition on yield and grain quality of the “Vladimir” spring barley variety in the central region of the Non-chernozem zone. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2021;(1):18–28. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2021-1-18-28>

Сведения об авторах

✉ **Свечников Александр Константинович**, кандидат с.-х. наук, научный сотрудник отдела технологий возделывания сельскохозяйственных культур, Марийский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Победы, д. 10, п. Руэм, Медведевский район, Республика Марий Эл, Российская Федерация, 425231, e-mail: via@mari-el.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0070-5348>, e-mail: koalder@yandex.ru

Замятин Сергей Анатольевич, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий возделывания сельскохозяйственных культур, заместитель директора по научной деятельности, Марийский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Победы, д. 10, п. Руэм, Медведевский район, Республика Марий Эл, Российская Федерация, 425231, e-mail: via@mari-el.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3999-9179>

Information about the authors

✉ **Alexandr K. Svechnikov**, PhD in Agricultural Science, researcher, the Department of Cultivation of Farm Crops, Mari Agricultural Research Institute – Branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Pobedy St., 10, Medvedevsky district, Ruem, Mari El Republic, Russian Federation, 425231, e-mail: via@mari-el.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0070-5348>, e-mail: koalder@yandex.ru

Sergey A. Zamyatin, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Department of Cultivation of Farm Crops, Principal Director of Scientific Research, Mari Agricultural Research Institute – Branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Pobedy St., 10, Medvedevsky district, Ruem village, Mari El Republic, Russian Federation, 425231, e-mail: via@mari-el.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3999-9179>

✉ – Для контактов / Corresponding author