



DOI: 10.22363/2312-797X-2023-18-4-566-579

EDN: MQNQAC

УДК 631.671:628.381.1

Научная статья / Research article

Повышение эффективности оросительных мелиораций в агроценозах картофеля и сои на основе применения иловых осадков

А.Е. Новиков^{1,2}  , А.А. Поддубский³ , А.А. Новиков¹ ,
Р.В. Збукарев¹ , Н.В. Богомолова³ 

¹ВНИИОЗ — филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», г. Волгоград,
Российская Федерация

²Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская
Федерация

³Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

 ae_novikov@mail.ru

Аннотация. Цель исследования состояла в оценке влияния доз внесения осадка сточных вод (ОСВ) на продуктивность использования оросительной воды агроценозами картофеля (Жуковский ранний) и сои (ВНИИОЗ 31), на их урожай, а также индекс загрязнения почвы и семенной продукции. Агрометеорологические условия периодов проведения вегетационных опытов характеризуются как сухие со значением гидротермического коэффициента не более 0,39. С учетом сложившихся климатических условий был составлен регламент поливов картофеля и сои. Установлено, что внесение ОСВ в дозах 20, 40 и 60 т/га по-разному повлияло на структуру суммарного водопотребления культур. В посадках картофеля оросительная норма изменялась от 2590 на контроле и до 1850 м³/га на варианте ОСВ₆₀, а в посевах сои на аналогичных вариантах — от 3700 до 2960 м³/га. При этом затраты оросительной воды на получение тонны урожая картофеля и сои на контроле составили соответственно 124,5 и 1298,2 м³/т против 118,3...72,8 и 1213,1...886,2 м³/т по вариантам ОСВ₂₀, ОСВ₄₀ и ОСВ₆₀, что соответствовало повышению продуктивности использования воды от 5,0 до 41,5 и от 6,6 до 31,7 %. Лабораторными исследованиями почвенных образцов пахотного слоя установлено, что индекс загрязнения применительно к тяжелым металлам Cd, Pb, Zn, Cu варьирует от 2,54 ед. на варианте ОСВ₂₀ до 4,04 ед. на варианте ОСВ₆₀, что свидетельствует об отсутствии загрязнения почвы. Оценка показателей клубней картофеля на содержание крахмала, сухого вещества, нитратов и тяжелых металлов демонстрирует достаточное высокое качество и приемлемый уровень загрязнения семенного материала.

© Новиков А.Е., Поддубский А.А., Новиков А.А., Збукарев Р.В., Богомолова Н.В., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Ключевые слова: орошение, продуктивность оросительной воды, осадок сточных вод, индекс загрязнения почвы, урожайность, качество семенной продукции

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Благодарности. Работа подготовлена в рамках выполнения государственного задания FNFR-2023–0001.

История статьи: поступила 2 ноября 2023 г., принята к публикации 23 ноября 2023 г.

Для цитирования: Новиков А.Е., Поддубский А.А., Новиков А.А., Збукарев Р.В., Богомолова Н.В. Повышение эффективности оросительных мелиораций в агроценозах картофеля и сои на основе применения иловых осадков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агронимия и животноводство. 2023. Т. 18. № 4. С. 566—579. doi: 10.22363/2312-797X-2023-18-3-566-579

Increasing efficiency of irrigation reclamation in potato and soybean agrocenoses using sludge

Andrey E. Novikov^{1,2}  , Anton A. Poddubsky³ ,
Alexey A. Novikov¹ , Roman V. Zbukarev¹ , Natalya V. Bogomolova³ 

¹Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, Volgograd, Russian Federation

²Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

³RUDN University, Moscow, Russian Federation

 ae_novikov@vniioz.ru

Abstract. The purpose of the study was to assess effect of different doses of wastewater sludge on productivity of irrigation water use by agrocenoses of potatoes (Zhukovsky rannii) and soybeans (VNIIOZ 31), on their yield, as well as the index of soil contamination and seed production. Agrometeorological conditions of the periods of vegetation experiments are characterized as dry with hydrothermal coefficient value of no more than 0.39. Considering the current climatic conditions, regulations for watering potatoes and soybeans were drawn up. It was established that application of WWS in doses of 20, 40 and 60 t·ha⁻¹ had different effects on crops total water consumption. In potato crops, irrigation rate varied from 2590 m³·ha⁻¹ in the control to 1850 m³·ha⁻¹ in WWS₆₀ variant, and in soybean crops, it varied from 3700 in the control to 2960 m³·ha⁻¹ in WWS₆₀ variant. At the same time, amount of irrigation water to obtain a ton of potato and soybean yield in the control averaged 124.5 and 1298.2 m³·t⁻¹, respectively, against 118.3...72.8 and 1213.1...886.2 m³·t⁻¹ for variants WWS₂₀, WWS₄₀ and WWS₆₀, which corresponded to increase in water use productivity from 5.0 to 41.5 % and from 6.6 to 31.7 %, respectively. Laboratory studies of soil samples of the arable layer showed that pollution index in relation to heavy metals Cd, Pb, Zn, Cu varies from 2.54 in variant WWS₂₀ to 4.04 in variant WWS₆₀, which indicates the absence of soil contamination. Evaluation of potato tubers for values of starch, dry matter, nitrates and heavy metals demonstrates sufficiently high quality and acceptable level of contamination of the seeds.

Keywords: irrigation, irrigation water productivity, wastewater sludge, soil pollution index, yield, quality of seeds

Conflicts of interest. The authors declared no conflicts of interest.

Funding. The work was prepared as part of the State order FNFR-2023–0001.

Article history: Received: 2 November 2023. Accepted: 23 November 2023.

For citation: Novikov AE, Poddubsky AA, Novikov AA, Zbukarev RV, Bogomolova NV. Increasing efficiency of irrigation reclamation in potato and soybean agrocenoses using sludge. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2023; 18(4):566—579. doi: 10.22363/2312-797X-2023-18-3-566-579

Введение

Продовольственная безопасность остается одной из главных глобальных проблем человечества, требующей систематического поиска решений, что связано с флуктуациями климата, ростом численности населения Земли и дефицитом пресных водных ресурсов. По оценкам ФАО в 2022 г. в мире насчитывалось более 780 млн голодающих, и это на 19 % больше допандемийного 2019 г., при этом доступность пресной воды на душу населения сократилась более чем на 20 % [1, 2]. В этой связи сельское хозяйство для повышения производительности и обеспечения возросшей потребности в продовольствии должно стать более невосприимчивым к участвовавшим биофизическим и социально-экономическим стрессам. Проблема усугубляется еще и тем, что аграрное производство является крупнейшим водопользователем, на его долю приходится более 70 % глобального объема забираемой пресной воды. А так как 40 % мирового объема продовольствия производится на орошаемых землях, занимающих не более 19 % в структуре посевных площадей, продовольственная безопасность в различных вододефицитных регионах мира может быть достигнута за счет реализации передовых агротехник в сочетании с повышением продуктивности использования оросительной воды [3, 4].

Помимо традиционных методов повышения эффективности орошения за счет увеличения урожайности возделываемых сельскохозяйственных культур и уменьшения эвапотранспирации, некоторое распространение в земледелии получило использование очищенных сточных вод [5–7] и иловых осадков [8–10] в качестве альтернатив поливной воде и удобрительно-мелиорирующим веществам соответственно. Однако широкое применение данных «продуктов» сдерживается наличием в них небезопасных биологических и химических компонентов, требующих нейтрализации. К примеру, в России применение осадков сточных вод (ОСВ) в качестве удобрений не превышает 7 % от производимого объема (около 13 млн т при влажности 75 %, или 2,5 млн т в пересчете на сухое вещество) [11, 12]. Тем не менее уже имеются технологии, обеспечивающие получение стабилизированного ОСВ, обладающего влагосорбирующими и водоудерживающими свойствами за счет рыхлой и шероховатой пористой структуры с размером частиц от 0,1 до 500 мкм [13, 14]. Для разработки практических рекомендаций по применению ОСВ в условиях орошения, в т. ч. в целях оптимизации процессов эвапотранспирации и регламента поливов культур, необходимо проведение комплексной оценки эффективности и экологичности действия ОСВ на компоненты агроценозов.

Цель исследования — оценка влияния доз внесения ОСВ на продуктивность использования оросительной воды в агроценозах картофеля и сои, на их урожай, а также индекс загрязнения почвы и семенной продукции.

Материалы и методы исследования

Опыты с картофелем (Жуковский ранний) и соей (ВНИИОЗ 31) при их ротации проводили в условиях Нижнего Поволжья на экспериментальном стационаре ВНИИОЗ по методикам Б.А. Доспехова¹ и В.Н. Плешакова². Варианты размещали систематически в 3-кратной повторности (рис. 1). Площадь деланки составляла 140 м² (2,8 × 50), учетной 56 м² (1,4 × 40). ОСВ в дозах 20, 40 и 60 (ОСВ₂₀, ОСВ₄₀, ОСВ₆₀) т/га вносили поверхностно, взброс после отвальной вспашки.

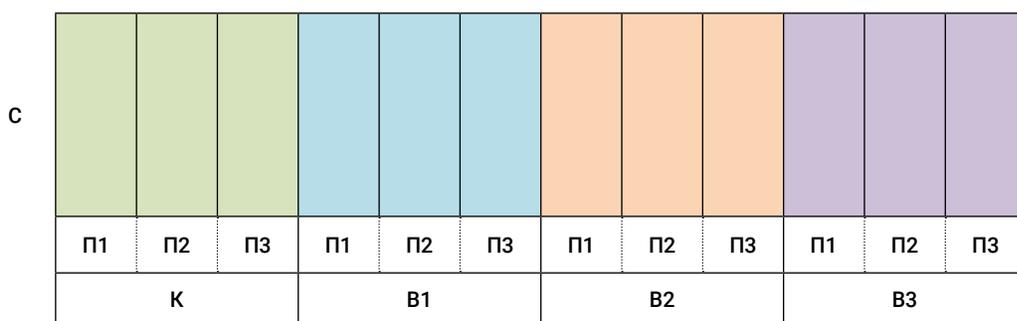


Рис. 1. Схема вегетационного опыта: С – сорт картофеля, сорт сои, К – контроль; В1, В2, В3 – варианты внесения ОСВ; П1, П2, П3 – повторности
Источник: сделано авторами

Fig. 1. Scheme of the pot experiment: C – potato/soybean cultivar; K – control; В1, В2, В3 – variants for application of WWS; П1, П2, П3 – replicates
Source: made by authors

На варианте без использования ОСВ (контроль) под планируемую урожайность картофеля 20 т/га и сои 2,5 т/га вносили минеральные удобрения соответственно в дозах $N_{80}P_{40}K_{90}$ и $N_{75}P_{50}K_{35}$ кг д.в./га, рассчитанных по методике В.И. Филина³.

Картофель высаживали по предварительно нарезанным гребням с междурядьями 0,75 м нормой 40 тыс. шт./га во II декаде июля, сою высевали с междурядьями 0,7 м нормой 600 тыс. шт./га во II декаде мая.

Предполивной порог влажности почвы в расчетном (активном) слое 0,0...0,6 м поддерживали не ниже 80 % НВ поливами дождеванием [15, 16]. Поливную норму рассчитывали по формуле А.Н. Костякова, а суммарное водопотребление культур — методом водного баланса⁴. Продуктивность использования оросительной

¹ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

² Плешаков В.Н. Методика полевого опыта в условиях орошения. Волгоград, 1983. 150 с.

³ Филин В.И. Справочная книга по растениеводству с основами программирования урожая. Волгоград, 1994. 266 с.

⁴ Костяков А.Н. Основы мелиораций. М.: Сельхозгиз, 1960. 616 с.

воды оценивали по ее затратам на производство тонны урожая K_M и коэффициенту водопотребления растений K_E , м³/т:

$$K_M = M/Y,$$

где M — оросительная норма, м³/га; E — суммарное водопотребление, м³/га; Y — урожайность культуры, т/га.

Влажность почвы определяли прибором Aquaterr M-350 до посадки (посева), в фазы созревания клубней картофеля и полной спелости зерна сои в слое 0,0...1,0 м, в период вегетации культур в слое 0,0...0,6 м. Замеры влажности почвы проводили на постоянно закрепленных динамических площадках (5 м²) послойно через 0,1 м в 3-кратной повторности не реже одного раза в декаду, а также перед проведением полива и через 2 дня после полива ($P_{оде}$)⁵.

Почвы на экспериментальном стационаре светло-каштановые тяжелосуглинистые, в пахотном слое 0,22...0,24 м содержат около 2,0 % гумуса, 37...48 мг/кг доступных форм азота, 60...75 мг/кг фосфора, 265...290 мг/кг калия. В слое 0,0...0,6 м плотность 1,34 т/м³, наименьшая влагоемкость 22,7 % м.с.п. Грунтовые воды в водообмене активного слоя не участвуют.

Для назначения сроков поливов и определения суммарного водопотребления картофеля и сои проводили учет и анализ метеоусловий (метеостанция г. Волгограда; табл. 1). Обеспеченность периода вегетации культур естественным теплом и влагой оценивали по гидротермическому коэффициенту ГТК (Селянинов)⁶.

Таблица 1

Метеоусловия вегетации культур*

Месяцы года	Температура воздуха, °С			Относительная влажность воздуха, %			Осадки, мм	
	$t_{ср}$	t_{max}	$t_{ср.мнл}$	$\Phi_{ср}$	Φ_{min}	$\Phi_{ср.мнл}$	P	$P_{ср.мнл}$
Май	<u>19,0</u> 15,7	<u>32,4</u> 29,6	17,0	<u>54</u> 59	<u>32</u> 51	53	<u>28,8</u> 73,5	33,0
Июнь	<u>25,8</u> 25,5	<u>36,5</u> 33,2	21,0	<u>31</u> 32	<u>20</u> 20	53	<u>15,3</u> 18,6	36,0
Июль	<u>22,9</u> 28,8	<u>33,8</u> 40,0	23,4	<u>50</u> 27	<u>24</u> 22	37	<u>71,5</u> 0,6	33,0
Август	<u>22,8</u> 23,5	<u>37,3</u> 36,0	22,0	<u>39</u> 35	<u>26</u> 32	51	<u>1,7</u> 13,6	31,0
Сентябрь	<u>16,0</u> 19,2	<u>27,6</u> 34,8	16,2	<u>45</u> 39	<u>25</u> 36	57	<u>28,9</u> 1,8	25,0
Сумма	<u>3259</u> 3449	—	3048	—	—	—	<u>146,2</u> 108,1	158,0

*Над чертой — для картофеля (2019 г.), под чертой — сои (2020 г.).

⁵ Роде А.А. Методы изучения водного режима почв. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 243 с.

⁶ Селянинов Г.Т. Методика сельскохозяйственной характеристики климата // Мировой агроклиматический справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1937. С. 5–27.

Meteorological vegetation conditions of crops*

Month	Air temperature, °C			Relative humidity, %			Precipitation, mm	
	T_{avg}	t_{max}	$T_{avg.mnl}$	φ_{avg}	φ_{min}	$\varphi_{avg.mnl}$	P	$P_{avg.mnl}$
May	<u>19.0</u> 15.7	<u>32.4</u> 29.6	17.0	<u>54</u> 59	<u>32</u> 51	53	<u>28.8</u> 73.5	33.0
June	<u>25.8</u> 25.5	<u>36.5</u> 33.2	21.0	<u>31</u> 32	<u>20</u> 20	53	<u>15.3</u> 18.6	36.0
July	<u>22.9</u> 28.8	<u>33.8</u> 40.0	23.4	<u>50</u> 27	<u>24</u> 22	37	<u>71.5</u> 0.6	33.0
August	<u>22.8</u> 23.5	<u>37.3</u> 36.0	22.0	<u>39</u> 35	<u>26</u> 32	51	<u>1.7</u> 13.6	31.0
September	<u>16.0</u> 19.2	<u>27.6</u> 34.8	16.2	<u>45</u> 39	<u>25</u> 36	57	<u>28.9</u> 1.8	25.0
Sum	<u>3259</u> 3449	—	3048	—	—	—	<u>146.2</u> 108.1	158.0

*Above the line – potatoes (2019), below the line – soybeans (2020).

Обеспеченность теплом посадок картофеля и посевов сои была близкой к среднелетним значениям, суммы активных температур было достаточно до полного вызревания. В 2019 г. с мая по август практически ежедневно максимальные температуры воздуха достигали 32,4...37,3 °C, в 2020 г. с июня по август в отдельные дни температура поднималась до 33,2...40,0 °C. Высокие температуры при низкой относительной влажности оказывали термический стресс на растения.

Распределение осадков за вегетационные периоды картофеля и сои было более неравномерным, 146,2 мм в 2019 г. и 108,1 мм в 2020 г. или соответственно 92 и 68 % от среднелетнего значения. Июль (2019 г.) и май (2020 г.) были влажными, выпало более двух норм осадков, но высокая интенсивность дождей образовывала ливневые стоки и не приводила к существенному накоплению почвой продуктивной влаги. Август (2019 г.), июль и сентябрь (2020 г.) были практически без осадков с суховеями. В целом периоды вегетации растений можно охарактеризовать как сухие с ГТК не более 0,39.

Индекс загрязнения почвы ИЗП (МУ 2.1.7.730–99) рассчитывали по формуле

$$\text{ИЗП} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{fi}} - (n - 1),$$

где C_i — фактическое содержание i -го вещества в почве, мг/кг; C_{fi} — фоновое содержание i -го вещества в почве, мг/кг; n — количество определяемых веществ (Cd, Pb, Zn, Cu).

Для качественной характеристики клубней картофеля проводили лабораторные исследования на содержание в них тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu), крахмала, сухого вещества и нитратов.

Результаты исследования и обсуждение

Проведение оросительных мелиораций в комплексе с другими видами мелиорации земель сельскохозяйственного использования является одним из важнейших факторов реализации биологической продуктивности культур и устойчивости производства продовольствия в условиях засушливого климата Нижнего Поволжья [17, 18].

С учетом запасов влаги в почве перед посадкой и посевом культур (табл. 2) и календарных сроков окончания их вегетации рассчитали поливные нормы и суммарное водопотребление растений (табл. 3). Так фаза созревания клубней картофеля наступила во II декаде сентября, а фаза полной спелости зерна сои — в I декаде сентября. Вегетационный период картофеля продолжался в течение 62 суток при сумме среднесуточных температур воздуха приблизительно равной 1340 °С, а сои — 119 суток при сумме среднесуточных температур воздуха около 2660 °С.

Таблица 2

Запасы продуктивной влаги в расчетном слое почвы 0,6 м*

Варианты опыта	Запасы влаги на начало вегетации		Запасы влаги на конец вегетации	
	Картофель	Соя	Картофель	Соя
Контроль	<u>88,2</u> 1610	<u>89,3</u> 160	<u>67,8</u> 1237	<u>72,2</u> 1318
ОСВ ₂₀	<u>89,9</u> 1641	<u>91,8</u> 1675	<u>80,5</u> 1469	<u>88,4</u> 1613
ОСВ ₄₀	<u>92,4</u> 1686	<u>93,6</u> 1708	<u>76,6</u> 1398	<u>87,8</u> 1602
ОСВ ₆₀	<u>94,0</u> 1716	<u>95,7</u> 1747	<u>76,1</u> 1389	<u>85,8</u> 1566

*Над чертой — % НВ, под чертой — в м³/га.

Table 2

Productive moisture reserves in 0.6 m soil layer*

Variant	Moisture reserves at the beginning of the growing season		Moisture reserves at the end of the growing season	
	Potato	Soybean	Potato	Soybean
Control	<u>88.2</u> 1610	<u>89.3</u> 160	<u>67.8</u> 1237	<u>72.2</u> 1318
WWS ₂₀	<u>89.9</u> 1641	<u>91.8</u> 1675	<u>80.5</u> 1469	<u>88.4</u> 1613
WWS ₄₀	<u>92.4</u> 1686	<u>93.6</u> 1708	<u>76.6</u> 1398	<u>87.8</u> 1602
WWS ₆₀	<u>94.0</u> 1716	<u>95.7</u> 1747	<u>76.1</u> 1389	<u>85.8</u> 1566

*Above the line — % FC, below the line — м³·га⁻¹.

Структура суммарного водопотребления культур*

Варианты опыта	Оросительная норма		Влага от осадков		Влага из почвы		Суммарное водопотребление	
	м ³ /га	%	м ³ /га	%	м ³ /га	%	м ³ /га	%
Контроль	<u>2590</u> 3700	<u>76,8</u> 81,4	416 568	<u>12,3</u> 12,5	<u>368</u> 280	<u>10,9</u> 6,1	<u>3374</u> 4548	100
ОСВ ₂₀	<u>2590</u> 3700	<u>81,5</u> 85,5		<u>13,1</u> 13,1	<u>172</u> 57	<u>5,4</u> 1,4	<u>3178</u> 4325	
ОСВ ₄₀	<u>2220</u> 3330	<u>75,8</u> 83,0		<u>14,2</u> 14,2	<u>292</u> 114	<u>10,0</u> 2,8	<u>2928</u> 4012	
ОСВ ₆₀	<u>1850</u> 2960	<u>71,2</u> 79,8		<u>16,0</u> 15,3	<u>332</u> 183	<u>12,8</u> 4,9	<u>2598</u> 3711	

*Над чертой – картофеля (2019 г.), под чертой – сои (2020 г.)

Table 3

The structure of the total water consumption of crops*

Variant	Irrigation rate		Precipitation moisture		Soil moisture		Total water consumption	
	m ³ ·ha ⁻¹	%	m ³ ·ha ⁻¹	%	m ³ ·ha ⁻¹	%	m ³ ·ha ⁻¹	%
Control	<u>2590</u> 3700	<u>76.8</u> 81.4	416 568	<u>12.3</u> 12.5	<u>368</u> 280	<u>10.9</u> 6.1	<u>3374</u> 4548	100
WWS ₂₀	<u>2590</u> 3700	<u>81.5</u> 85.5		<u>13.1</u> 13.1	<u>172</u> 57	<u>5.4</u> 1.4	<u>3178</u> 4325	
WWS ₄₀	<u>2220</u> 3330	<u>75.8</u> 83.0		<u>14.2</u> 14.2	<u>292</u> 114	<u>10.0</u> 2.8	<u>2928</u> 4012	
WWS ₆₀	<u>1850</u> 2960	<u>71.2</u> 79.8		<u>16.0</u> 15.3	<u>332</u> 183	<u>12.8</u> 4.9	<u>2598</u> 3711	

*Above the line – potatoes (2019), below the line – soybeans (2020).

Период от посадки до первого полива картофеля составил 7 суток на контроле, 9, 11 и 13 суток на вариантах ОСВ₂₀, ОСВ₄₀ и ОСВ₆₀ соответственно. В структуре суммарного водопотребления картофеля доля оросительной воды составила от 76,8 (2590 м³/га на контроле) до 71,2 % (1850 м³/га на варианте ОСВ₆₀), доля атмосферных осадков — от 12,3 до 16,0 %, а доля почвенной влаги — от 10,9 (368 м³/га) до 12,8 % (332 м³/га) соответственно. Вегетационных поливов проведено: 7 на контроле при межполивном периоде 6...8 суток, 7 на варианте с ОСВ₂₀ при межполивном периоде 7...10 суток, 6 на варианте ОСВ₄₀ и 5 на варианте ОСВ₆₀ при межполивных периодах соответственно 8...12 и 10...13 суток. Суммарное водопотребление составило от 3374 до 2598 м³/га, а среднесуточное — 54,4...41,9 м³/га.

На посевах сои без внесения ОСВ первый полив произвели через 20 суток, на вариантах ОСВ₂₀, ОСВ₄₀ и ОСВ₆₀ — через 23, 26 и 28 суток соответственно. Оросительная норма на посевах сои была значительно выше, чем на посадках картофеля (2960...3700 против 1850...2590 м³/га), что обусловлено физиологией

растений, разными сроками вегетации и наступления межфазных периодов «нарастающего» и «затухающего» водопотребления.

В структуре суммарного водопотребления сои на контроле и на варианте ОСВ₆₀ доля оросительной воды составила 81,4 и 79,8 %, доля атмосферных осадков — 12,5 и 15,3 %, а доля почвенной влаги — 6,1 и 4,9 % соответственно. Вегетационных поливов проведено: 10 на контроле при межполивном периоде 6...10 суток, 10 на варианте с ОСВ₂₀ при межполивном периоде 7...11 суток, 9 на варианте ОСВ₄₀ и 8 на варианте ОСВ₆₀ при межполивных периодах соответственно 8...13 и 9...14 суток. Суммарное водопотребление составило от 4548 до 3711 м³/га, а среднесуточное — 38,2...31,2 м³/га.

Степень загрязнения почвы валовыми формами тяжелых металлов определяли путем сравнения с предельно допустимой концентрацией (ПДК) и ориентировочно допустимой концентрацией (ОДК) соответствующего элемента или его фоновым содержанием, а также индексом загрязнения (ИЗП). Анализ результатов (рис. 2) показывает, что все наблюдаемые элементы в пахотном слое почвы не превышают ПДК и ОДК. ИЗП варьирует от 2,54 ед. на варианте ОСВ₂₀ до 4,04 ед. на варианте ОСВ₆₀. При ИЗП < 16 почва относится к категории с допустимым загрязнением (МУ 2.1.7.730–99).

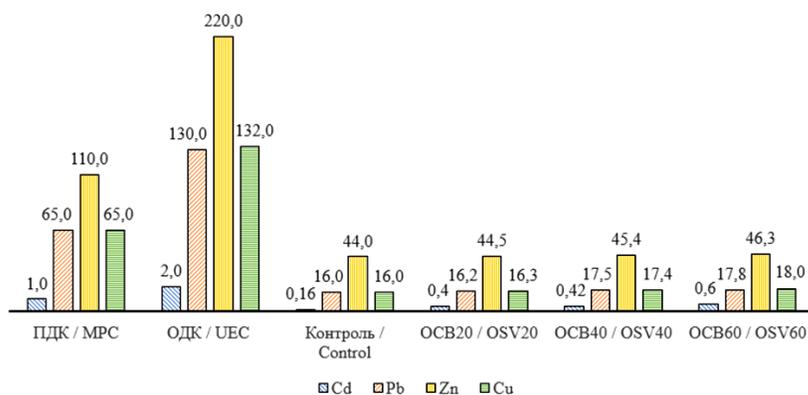


Рис. 2. Содержание валовых форм тяжелых металлов в пахотном слое почвы на посадках картофеля, мг/кг

Источник: сделано авторами

Fig. 2. Content of gross forms of heavy metals in the arable soil layer of potato crops, mg·kg⁻¹

Source: made by authors

Химический состав растений отражает элементный состав почвы, чем и обусловлено некоторое наличие тяжелых металлов в клубнях картофеля (рис. 3). Тем не менее, оценивая полученный урожай (рис. 4) по содержанию крахмала, сухого вещества и нитратов, клубни картофеля можно отнести к качественной продукции, а по тяжелым металлам — к «чистой» и «условно годной» (СанПиН 2.3.2.1078–01). Учитывая семенную направленность производства картофеля, наличие тяжелых металлов в пределах от ПДК до 2 ПДК нивелируется в дальнейшем при выращивании товарной продукции.

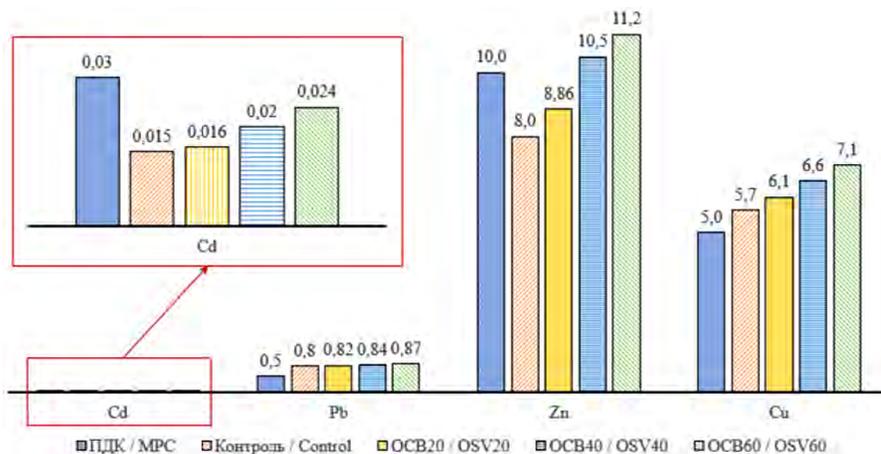


Рис. 3. Содержание тяжелых металлов в клубнях картофеля, мг/кг
 Источник: сделано авторами

Fig. 3. Contents of heavy metals in potato tubers, mg·kg⁻¹
 Source: made by authors

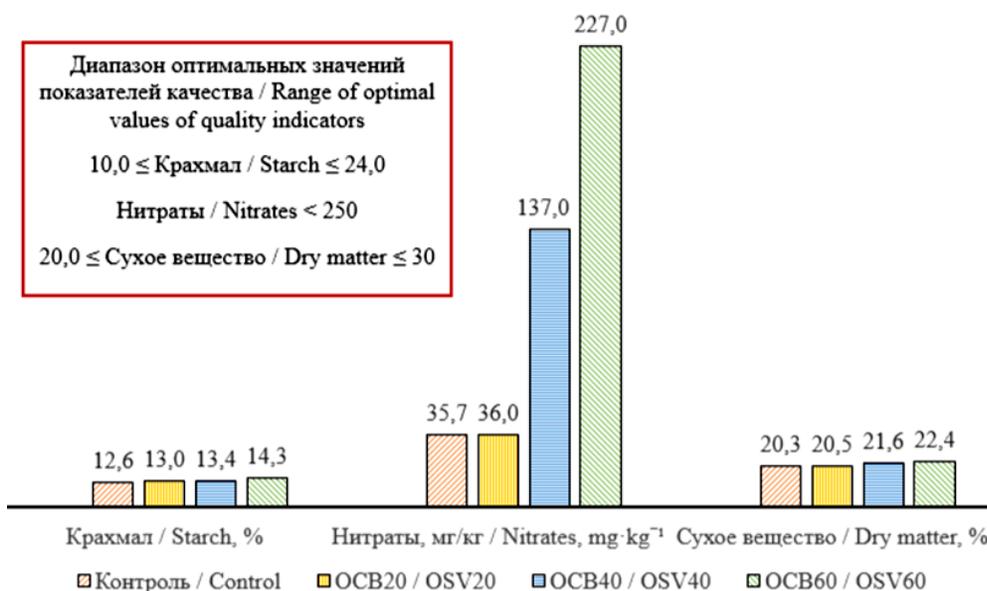


Рис. 4. Оценка качества клубней картофеля
 Источник: сделано авторами

Fig. 4. Assessment of potato tubers quality
 Source: made by authors

Вследствие низких показателей загрязнения почвы и клубней картофеля валовыми формами тяжелых металлов и нитратами на посевах сои определение ИЗП и качества зерна не проводили.

Оценка продуктивности использования воды растениями с учетом сформированного урожая по вариантам опыта приведена в табл. 4.

Таблица 4

Эффективность использования оросительной воды

Варианты опыта	$\frac{M}{E}, \text{ м}^3/\text{га}$		$Y, \frac{\text{т/га}}{\% \text{ к контролю}}$		$\frac{K_M}{K_V}, \text{ м}^3/\text{т}$	
	Картофель	Соя	Картофель	Соя	Картофель	Соя
Контроль	<u>2590</u> 3374	<u>3700</u> 4548	<u>20,8</u> 100	<u>2,85</u> 100	<u>124,5</u> 162,2	<u>1298,2</u> 1595,8
ОСВ ₂₀	<u>2590</u> 3178	<u>3700</u> 4325	<u>21,9</u> 5,30	<u>3,05</u> 7,01	<u>118,3</u> 145,1	<u>1213,1</u> 1418,0
ОСВ ₄₀	<u>2220</u> 2928	<u>3330</u> 4012	<u>23,7</u> 13,9	<u>3,27</u> 14,7	<u>93,7</u> 123,5	<u>1018,3</u> 1226,9
ОСВ ₆₀	<u>1850</u> 2598	<u>2960</u> 3711	<u>25,4</u> 22,1	<u>3,34</u> 17,2	<u>72,8</u> 102,3	<u>886,2</u> 1111,0

Table 4

Irrigation water use efficiency

Variant	$\frac{M}{E}, \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$		$Y, \frac{\text{т} \cdot \text{га}^{-1}}{\% \text{ to control}}$		$\frac{K_M}{K_V}, \text{ м}^3 \cdot \text{т}^{-1}$	
	Potato	Soybean	Potato	Soybean	Potato	Soybean
Control	<u>2590</u> 3374	<u>3700</u> 4548	<u>20.8</u> 100	<u>2.85</u> 100	<u>124.5</u> 162.2	<u>1298.2</u> 1595.8
WWS ₂₀	<u>2590</u> 3178	<u>3700</u> 4325	<u>21.9</u> 5.30	<u>3.05</u> 7.01	<u>118.3</u> 145.1	<u>1213.1</u> 1418.0
WWS ₄₀	<u>2220</u> 2928	<u>3330</u> 4012	<u>23.7</u> 13.9	<u>3.27</u> 14.7	<u>93.7</u> 123.5	<u>1018.3</u> 1226.9
WWS ₆₀	<u>1850</u> 2598	<u>2960</u> 3711	<u>25.4</u> 22.1	<u>3.34</u> 17.2	<u>72.8</u> 102.3	<u>886.2</u> 1111.0

Согласно результатам статистической обработки данных все различия существенны и значимы. Урожайность клубней картофеля на вариантах ОСВ₂₀, ОСВ₄₀ и ОСВ₆₀ превышает контроль соответственно на 1,1, 2,9 и 4,6 т/га ($НСР_{05} = 0,74$ т/га) или на 5,3, 13,9 и 22,1 %. Затраты оросительной воды на получение тонны продукции и коэффициент водопотребления растениями картофеля на контроле составили 124,5 и 162,2 м³/т против 118,3 и 72,8; 145,1 и 102,3 м³/т по вариантам ОСВ₂₀, ОСВ₄₀ и ОСВ₆₀, что соответствовало экономии водных ресурсов от 5 до 41,5 и от 10,5 до 36,9 %.

Подобная «картина» сложилась и на посевах сои. Урожай зерна по вариантам опыта ОСВ₂₀, ОСВ₄₀ и ОСВ₆₀ изменялся от 3,05 до 3,34 т/га при затратах оросительной воды от 1213,1 до 886,2 м³/т, что составило прибавку к контролю от 7,01 до 17,2 % и экономию воды на формирование тонны зерна от 85,1 до 412 м³. При этом коэффициент водопотребления от контрольного варианта составил от 88,8 до 69,6 %.

Заключение

В опытах с возделыванием картофеля и сои в условиях орошения установлено, что внесение в почву осадка сточных вод в дозах от 20 до 60 т/га позволяет к началу вегетационного периода дополнительно накопить продуктивной влаги в слое 0,6 м от 38 до 116 м³/га и таким образом более эффективно использовать оросительную воду на получение урожая, что подтверждает влагосорбирующие и водоудерживающие свойства ОСВ. Доказано: удобрительное действие и последствие ОСВ в указанных дозах обеспечивает к контролю прибавку урожая на уровне 5,3...22,1 % по картофелю и 7,01...17,2 % по сое, снижение коэффициента водопотребления на уровне 89,5...63,1 и 88,8...69,6 % соответственно. При этом обеспечивается высокое качество семенной продукции и допустимый индекс загрязнения почвы.

Список литературы

1. FAO. 2020. The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture. Rome. doi: 10.4060/cb1447en
2. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. 2023. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum. Rome, FAO. doi: 10.4060/cc3017en
3. Кружилин И.П., Новиков А.Е., Дубенок Н.Н. Обоснование водного режима почвы и регламента поливов аэробного риса // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 1. С. 62–66. doi: 10.30850/vrsn/2021/1/62-66
4. Новиков А.Е., Цепляев А.Н., Семенов С.Я. Ресурсосберегающие технологии возделывания картофеля при дождевании с применением гидрогеля // Известия НВ АУК. 2023. № 2(70). С. 416–423. doi: 10.32786/2071-9485-2023-02-49
5. Vasilyev S., Domashenko Y. Agroecological Substantiation for the Use of Treated Wastewater for Irrigation of Agricultural Land // Journal of Ecological Engineering. 2018. Vol. 19. № 1. P. 48–4. doi: 10.12911/22998993/79567
6. Iqbal M., Nauman S., Ghafari M., Parnianifard A., Gomes A., Gomes Ch. Treatment of Wastewater for Agricultural Applications in Regions of Water Scarcity // Biointerface Research in Applied Chemistry. 2021. Vol. 12. № 5. P. 6336–6360. doi: 10.33263/BRIAC125.63366360
7. Younas H., Younas F. Wastewater Application in Agriculture — A Review // Water, Air, and Soil Pollution. 2022. № 233(8). doi: 10.1007/s11270-022-05749-9
8. Шуравлин А.В., Овчинников А.С., Сурикова Н.В., Бордычев В.В., Пивень Е.А. Эффективное использование сточных вод и их осадка для орошения и удобрения сельскохозяйственных культур: монография. Волгоград, 2009. 636 с.
9. Межевова А.С. Влияние осадков сточных вод и приемов основной обработки почвы на динамику запасов влаги, продуктивность и качество семян Сафлора красильного // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 4. С. 9–12. doi: 10.31857/S2500262721040025
10. Касатиков В.А. Влияние мелиоративных доз осадка городских сточных вод на азотный режим дерново-подзолистой почвы и продуктивность зерновых культур // Агрохимия. 2020. № 6. С. 64–68. doi: 10.31857/S0002188120060058
11. Касатиков В.А., Габардина Н.П., Раскатов В.А. Агроэкологическая оценка применения осадка городских сточных вод в длительном полевом опыте // Плодородие. 2018. № 5 (104). С. 46–49. doi: 10.25680/S19948603.2018.104.14
12. Виноградов Д.В., Макарова М.П., Зубкова Т.В. Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 93–100. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-093-100
13. Pyndak V.I., Novikov A.E., Shtepa V.N. Optimization of organic-containing wastewater and sludge treatment systems // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2017. № 46(5). P. 507–511. doi: 10.3103/S1052618817040148

14. Межевова А.С., Новиков А.Е. Состав, структура и морфология осадка сточных вод // Известия НВ АУК. 2021. № 1(61). С. 389–398. doi: 10.32786/2071-9485-2021-01-37
15. Кружилин И.П., Мелихов В.В., Дронова Т.Н. и др. Научное обоснование дождевальной техники и режимов орошения сельскохозяйственных культур в Нижнем Поволжье: рекомендации. Волгоград, 2015. 36 с.
16. Дубенок Н.Н., Болотин Д.А., Болотин А.Г. и др. Продуктивность различных сортов картофеля при капельном орошении в Нижнем Поволжье // Известия НВ АУК. 2017. № 2(46). С. 28–37.
17. Мухаметханова С.С., Толоконников В.В., Канцер Г.П., Плющева Н.М. Сортовые особенности водопотребления сои // Орошаемое земледелие. 2021. № 3. С. 19–22. doi: 10.35809/2618-8279-2021-3-2
18. Мелихов В.В. Использование орошения для повышения стабильности результатов растениеводства // Орошаемое земледелие. 2015. № 4. С. 3–4.

References

1. FAO. The State of Food and Agriculture 2020. Overcoming water challenges in agriculture. Rome; 2020. doi: 10.4060/cb1447en
2. FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural-urban continuum. Rome; 2023. doi: 10.4060/cc3017en
3. Kruzhillin IP, Novikov AE, Dubenok NN. Justification of water regime and regulations for aerobic rice. *Russian Agricultural Sciences*. 2021;(1):62–66. (In Russ.). doi: 10.30850/vrsn/2021/1/62-66
4. Novikov AE, Tseplyaev AN, Semenenko SY. Resource-saving technologies of potato cultivation during sprinkling using hydrogel. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2023;(2):416–423. (In Russ.). doi: 10.32786/2071-9485-2023-02-49
5. Vasilyev S, Domashenko Y. Agroecological substantiation for the use of treated wastewater for irrigation of agricultural land. *Journal of Ecological Engineering*. 2018;19(1):48–54. doi: 10.12911/22998993/79567
6. Iqbal M, Nauman S, Ghafari M, Parnianifard A, Gomes A, Gomes C. Treatment of wastewater for agricultural applications in regions of water scarcity. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 2021;12(5):6336–6360. doi: 10.33263/BRIAC125.63366360
7. Younas H, Younas F. Wastewater application in agriculture — a review. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2022;233:329. doi: 10.1007/s11270-022-05749-9
8. Shuravilin AV, Ovchinnikov AS, Surikova NV, Bordychev VV, Piven EA. *Effektivnoe ispol'zovanie stochnykh vod i ikh osadka dlya orosheniya i udobreniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* [Efficient use of wastewater and its sediment for irrigation and fertilization of agricultural crops]. Volgograd; 2009. (In Russ.).
9. Mezhevova AS. Influence of sewage sludge and basic tillage methods on the dynamics of moisture reserves, productivity and quality of *Carthamus tinctorius* seeds. *Russian Agricultural Sciences*. 2021;(4):9–12. (In Russ.). doi: 10.31857/S2500262721040025
10. Kasatkov VA. Effect of reclamation doses of sludge of municipal wastewater on nitrogen regime of sod-podzolic soil and crop productivity. *Agrohimiya*. 2020;(6):64–68. (In Russ.). doi: 10.31857/S0002188120060058
11. Kasatkov VA, Shabardina NP, Raskatov VA. Agroecological evaluation of influence of municipal wastewater sludge application in long-term field experiment. *Plodorodie*. 2018;(5):46–49. (In Russ.). doi: 10.25680/S19948603.2018.104.14
12. Vinogradov DV, Makarova MP, Zubkova TV. The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed agrocenoses. *Theoretical and Applied Ecology*. 2023;(1):93–100. (In Russ.). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-093-100
13. Pyndak VI, Novikov AE, Shtepa VN. Optimization of organic-containing wastewater and sludge treatment systems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017;46:507–511. doi: 10.3103/S1052618817040148
14. Mezhevova AS, Novikov AE. Composition, structure and morphology of sewage sludge. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2021;(1):389–398. (In Russ.). doi: 10.32786/2071-9485-2021-01-37
15. Melikhov VV, Kruzhillin IP, Bolotin AG, Dronova TN, Danilenko YP, Novikov AA, et al. *Nauchnoe obosnovanie dozhdval'noi tekhniki i rezhimov orosheniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v Nizhnem Povolzh'e* [Scientific substantiation of sprinkler technology and irrigation regimes for agricultural crops in the Lower Volga region]. Volgograd; 2015. (In Russ.).
16. Dubenok NN, Bolotin DA, Bolotin AG. Productivity of different varieties of potatoes during drip irrigation in the Lower Volga region. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2017;(2):28–37. (In Russ.).

17. Mukhametkhanova SS, Tolokonnikov VV, Kantser GP, Plyushcheva NM. Variety features of water consumption of soy. *Irrigated Agriculture*. 2021;(3):19–22. (In Russ.). doi: 10.35809/2618-8279-2021-3-2

18. Melikhov VV. The use of irrigation to increase the stability of crop production results. *Irrigated Agriculture*. 2015;(4):3–4. (In Russ.).

Об авторах:

Новиков Андрей Евгеньевич — доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор, ВНИИОЗ — филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9; заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, Российская Федерация, 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, д. 28; e-mail: ae_novikov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8051-4786

Поддубский Антон Александрович — кандидат технических наук, директор, агроинженерный департамент, агротехнологический институт, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: poddubskiy-aa@rudn.ru

ORCID: 0000-0001-9796-2924

Новиков Алексей Андреевич — доктор сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научной работе, ВНИИОЗ — филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9; e-mail: alexeynovikov@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-7698-8268

Збукарев Роман Валентинович — лаборант-исследователь, ВНИИОЗ — филиал ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, ул. им. Тимирязева, д. 9; e-mail: zbukarevr@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9237-547X

Богомолова Наталья Владимировна — ассистент, агроинженерный департамент, агротехнологический институт, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: bogomolova-nv@rudn.ru

ORCID: 0000-0002-0741-392X

About authors:

Novikov Andrey Evgenievich — Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAS, Director, Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, 9 Timiryazev st., Volgograd, 400002, Russian Federation; Head of the Department, Processes and Devices of Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University, 28 Lenin ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; e-mail: ae_novikov@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8051-4786

Poddubsky Anton Alexandrovich — Candidate of Technical Sciences, Director, Agroengineering Department, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: poddubskiy-aa@rudn.ru

ORCID: 0000-0001-9796-2924

Novikov Alexey Andreevich — Doctor of Agricultural Sciences, Deputy Director for Science, Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, 9 Timiryazev st., Volgograd, 400002, Russian Federation; e-mail: alexeynovikov@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-7698-8268

Zbukarev Roman Valentinovich — Laboratory researcher, Russian Research Institute of Irrigated Agriculture, 9 Timiryazev st., Volgograd, 400002, Russian Federation; e-mail: zbukarevr@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9237-547X

Bogomolova Natalya Vladimirovna — Assistant, Agroengineering Department, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: bogomolova-nv@rudn.ru

ORCID: 0000-0002-0741-392X