

## ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ СТОКОВ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ТРАВ

*В. И. Желязко, доктор сельскохозяйственных наук  
В. М. Лукашевич, кандидат сельскохозяйственных наук*

*Белорусская государственная сельскохозяйственная академия,  
г. Горки, Беларусь*

### Аннотация

Исследования по обоснованию эффективности удобрительного орошения стоками животноводческих комплексов проведены в различных регионах Российской Федерации, странах Балтии, государствах дальнего зарубежья. В Беларуси этой проблемой в разные годы занимались ученые УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», РУП «Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси», НИРУП «Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси», некоторых отраслевых институтов Национальной академии наук. Вместе с тем, несмотря на более чем 20-летний опыт орошения животноводческими стоками, применяемая технология утилизации требует дальнейшего совершенствования. Обоснование режимов технологии использования животноводческих стоков на полях орошения в условиях техногенного загрязнения земель является актуальной научной проблемой, а разработка новых экологически безопасных технологических решений имеет важное практическое значение.

**Ключевые слова:** *эколого-экономическая эффективность, животноводческие стоки, мелиорируемые агроландшафты, орошение, загрязнения окружающей среды.*

### Abstract

*V. I. Zhelyazko, V. M. Lukashevich*

### ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF THE USE OF LIVESTOCK STREAMS FOR IRRIGATION OF PER- MANENT GRASSES

Studies to substantiate the effectiveness of fertilizing irrigation with livestock runoff have been conducted in various regions of the Russian Federation, the Baltic States, and foreign countries. In the Republic of Belarus, scientists of the Belarusian State Agricultural Academy, the Institute of Land Reclamation and Meadow Management of the National Academy of Sciences of Belarus, the Institute of Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, and some branch institutes of the National Academy of Sciences have been working on this problem in different years. At the same time, despite more than 20 years of experience in irrigation with livestock runoff, the applied recycling technology requires further improvement. That is why the justification of the modes of technology for the use of livestock runoff in irrigation fields in the conditions of technological pollution of land is an urgent scientific problem, and the development of new environmentally friendly technological solutions is of great practical importance.

**Keywords:** *ecological and economic efficiency, livestock runoff, reclaimed agricultural landscapes, irrigation, environmental pollution.*

### Введение

При любом виде антропогенной деятельности водные ресурсы, почва, воздушный бассейн и ландшафт подвергаются изменениям, так как окружающая среда становится непосредственным участником производства общественного продукта. Устойчивость взаимосвязи состояния экологической системы и уровня экономики во многом зависит от состояния окружающей среды, которое ухудшается вследствие антропогенного воздействия. Оценка конечных результатов не учитывает величину ущерба, причиненного производ-

ственным объединениям и отдельным предприятиям, что исключает их экономическую ответственность за соблюдение нормативов использования природных ресурсов и поддержания норм выбросов загрязняющих веществ, находящихся в отходах производства. В основном любое производство – это производство отходов и лишь отчасти получение нужной продукции, да и сама нужная продукция после употребления превращается в отходы.

Характерная особенность сельскохозяйственного производства Республики Беларусь

заключается в переводе животноводства на промышленную основу. С экономической точки зрения это позволило сократить в свиноводстве затраты труда в 8–10 раз, а расход кормов более чем в 2 раза. При этом снизилась стоимость скотоместа по сравнению со средними показателями по стране, изменился характер труда, положительно решаются многие социальные вопросы.

Вместе с тем переход к индустриальным технологиям привел к концентрации жидкого навоза на сравнительно небольших площадях. Анализ и изучение проектных материалов показывают, что решение проблемы утилизации стоков с целью использования их в качестве органических удобрений сводится к решению трех основных задач: во-первых, удалению навоза из животноводческих помещений; во-вторых, его обеззараживанию и очистке; в третьих, агротехническому использованию в качестве органического удобрения.

Агротехническое использование навозных стоков реализуется в Беларуси по трем технологическим схемам: на земледельческих полях орошения (далее – ЗПО) для проведения удобрительного орошения, внесение мобильным транспортом, комбинированным способом (компостирование, ЗПО и внесение мобильным транспортом).

Результаты многочисленных исследований, а также изучение проектных решений по технологии использования навозных стоков для удобрительного орошения на ЗПО в сочетании с комплексом природоохранных мероприятий показывают, что при благоприятных гидрогеологических условиях и обоснованном режиме удобрительных поливов достигается высокое качество почвенной очистки стоков. Одновременно с этим обеспечивается надежность эксплуатации, возможность вовлечения в сельскохозяйственный оборот малопродуктивных и бросовых земель, которые зачастую подвержены техногенному загрязнению.

Несмотря на очевидные достоинства земледельческих полей орошения, следует отметить, что ошибочно использовать навозные стоки для удобрительного орошения на землях с близким залеганием грунтовых вод, как это характерно для Белорусского Полесья. В этом регионе подземные воды нередко пере-

крыты рыхлыми песчаными породами и имеют слабую естественную защиту от загрязнения. Поэтому выбор площадки для подобных объектов хозяйственной деятельности должен проводиться на основе анализа альтернативных вариантов, обеспечивающих предотвращение деградации окружающей среды, восстановление нарушенных в результате предыдущей деятельности природных экосистем, эколого-экономическую сбалансированность будущего хозяйственного развития, создание благоприятных условий жизни людей.

Эколого-экономическую оценку на данном этапе рекомендуется проводить по двум основным показателям [1]. Первым из них является экономический ущерб, причиняемый народному хозяйству загрязнением природной среды, а вторым – сравнительная экономическая эффективность затрат на охрану окружающей среды. При этом под экономическим ущербом подразумеваются фактические или возможные потери или отрицательные изменения природы, которые обусловлены антропогенной деятельностью и могут быть выражены в стоимостных или натуральных показателях.

Отмечаются следующие виды ущербов, возникающих в результате загрязнения почвы и природных вод: потери в результате недополучения растениеводческой продукции в результате загрязнения почвы; потери в результате снижения продуктивности животноводства по причине низкого качества кормов; потери в результате снижения продуктивности водных экосистем в результате сброса неочищенных сточных вод; дополнительные затраты на ликвидацию загрязнения почвы; дополнительные затраты на восстановление устойчивости водных экосистем; эстетический ущерб, связанный с деградацией агроландшафтов; психологический ущерб в результате неудовлетворенности населения качеством окружающей среды; затраты на восстановление здоровья населения по причине увеличения патологических изменений в организме; необратимое разрушение биогеоценозов в агроландшафтах; необратимое разрушение водных экосистем; исчезновение видов в растительном и животном мире.

Ущерб, наносимый природной среде в результате ее загрязнения, могут быть вычис-

лены в стоимостных или натуральных показателях или быть условно исчисляемы, то есть не поддаваться количественной оценке.

В свою очередь, экономический ущерб подразделяется на фактический (расчетный  $U_p$ ), возможный ( $U_v$ ) и предотвращенный ( $U_n$ ).

Фактический (расчетный) ущерб определяется на стадии размещения объекта и учитывает фактический урон, наносимый окружающей среде в результате антропогенной деятельности в регионе. Возможный ущерб – это ущерб, который может быть в случае отсутствия природоохранных мероприятий. Предотвращен-

ный ущерб представляет собой разность между возможным и расчетным ущербами после проведения природоохранных мероприятий. Сейчас в Республике Беларусь отсутствуют исследования и соответствующие методики по количественной оценке изменения состояния отдельных видов реципиентов под воздействием загрязнения. Поэтому при определении величины экономического ущерба в результате сброса сточных вод используют величину выброса загрязняющих веществ в водные экосистемы.

### Методы исследований

Исследования проведены в 1980–2020 гг. на специализированных мелиоративных системах с использованием навозных стоков крупных животноводческих комплексов северо-восточного региона Беларуси. Основные экспериментальные исследования проведены на опытных участках в РСУП СГЦ «Заднепровский» Оршанского р-на Витебской обл. В данном хозяйстве осуществляются мероприятия по рациональному размещению и специализации производства. Удаление навоза из животноводческих помещений производится гидравлическим способом. В результате этого годовой выход навозных стоков колеблется от 303,4 до 498,4 тыс. м<sup>3</sup> в зависимости от количества поголовья на комплексе.

Оросительная система РСУП СГЦ «Заднепровский» запроектирована РУП «Белгипроводхоз» для использования навозных стоков селекционно-гибридного центра по выращиванию ремонтных свинок. Общая площадь оросительной системы составляет 1199 га, коэффициент земельного использования 0,99.

Поскольку оросительная система частично расположена на землях, испытывающих

временное переувлажнение, то на площади 528 га предусмотрено устройство закрытого дренажа. Дренажный сток, формируемый на осушительной системе, подлежит аккумулярованию в прудах-накопителях у дер. Кушевка и на канале Хотынь.

По предложению УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», с учетом сложности проблемы использования навозных стоков для орошения сельскохозяйственных культур, объемов мелиорации в хозяйстве и расположения оросительной системы в бассейне р. Днепр, в 1985 г. запроектирован и построен опытно-производственный участок, включающий водобалансовую площадку площадью 1,5 га, метеорологический пост и участок внутрпочвенного орошения.

Второй оросительной системой, на которой проводились исследования, была мелиоративная система агрокомбината «Юбилейный», расположенная также в Оршанском р-не Витебской обл. Общая площадь системы составляет 1500 га.

### Основная часть

Экономический ущерб рекомендуется определять по методике, приведенной в [2]:

$$U_n = K \sigma M, \quad (1)$$

где  $K$  – константа для оценки экономического ущерба от загрязнения (принимается согласно [3]);

$\sigma$  – константа, значение которой определено для водохозяйственного участка бассейна р. Днепр (Витебская и Могилевская области без западной части,  $\sigma = 1,75$ );

$M$  – приведенная масса годового сброса загрязняющих веществ, усл. т/год [2]:

$$M = V \sum_{i=1}^n A_i m_i, \quad (2)$$

где  $V$  – объем очищенных (использованных на орошение) сточных вод;

$n$  – общее число загрязнителей;

$i$  – номер сбрасываемого загрязнителя;

$m_i$  – предотвращенная масса годового сброса  $i$ -го загрязнителя, т/год;

$A_i$  – показатель относительной опасности сброса  $i$ -го загрязнителя для водных объектов [2]:

$$A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_i}, \quad (3)$$

где  $\text{ПДК}_i$  – предельно допустимая концентрация  $i$ -го загрязнителя в воде водных объектов.

На основе данной методики были определены расчетный и возможный ущербы в результате использования стоков свинокомплекса для удобрительного орошения. Ре-

зультаты проведенных расчетов представлены в табл. 1 и 2.

Теперь легко посчитать предотвращенный экономический ущерб [3]:

$$U_p = U_r - U_v.$$

В проведенных нами исследованиях экономический ущерб связан с недобором урожая сельскохозяйственных культур на загрязненных землях, а также со снижением продуктивности животных из-за низкого качества кормов. Ущерб в полеводстве, связанный с недобором урожая многолетних трав, проиллюстрирован на рис. 1.

Анализ приведенных данных показывает, что загрязнение почвы тяжелыми металлами приводит к недобору урожая на допустимом и критическом уровнях функционирования агроландшафта. Так, при загрязнении почвы преимущественно медью недобор урожая многолетних трав колеблется в пределах 0,9–60,7 %.

Таблица 1. Расчет фактического сброса загрязняющих веществ в водные экосистемы при использовании стоков свиноводческого комплекса РСУП СГЦ «Заднепровский» для орошения

Показатели	Химический состав стоков										Данные
	БПК <sub>5</sub>	взв. вещ	К	Na	Ca	Mg	NO <sub>3</sub> <sup>+</sup> +NH <sub>4</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	P	
	мг O <sub>2</sub> /л	мг/л									
концентрация стоков, подаваемых на орошение	210	320	–	57,8	102,2	58	717	132,8	166,0	327	анализов
ПДК	3	0,5	50	120	180	40	12	300	100	3,5	анализов
количество загрязнений, снятых почвой ( $m_i$ )	207	319,5	174	–	–	18	705	–	66,0	323,5	по расчету
показатель относительной опасности загрязняющего вещества ( $A_i$ )	0,33	2,0	0,02	0,0083	0,0056	0,025	0,083	0,0033	0,01	0,286	по расчету ф-ла 3
приведенная масса годового сброса ( $A_i m_i$ )	68,3	639,0	3,48	–	–	0,45	58,5	–	0,66	92,5	по расчету ф-ла 2
$\sum_{i=1}^n A_i m_i = 863 \frac{\Gamma}{\text{М}^3} = 0,000863 \text{ т/м}^3$						сумма годового сброса загрязняющих веществ $M = 0,000863 \cdot 437400 = 377,5 \text{ усл. т/год}$					

Таблица 2. Расчет возможного сброса загрязняющих веществ в водные экосистемы при использовании стоков свиноводческого комплекса РСУП СГЦ «Заднепровский» для орошения

Показатели	Химический состав возвратного стока с ЗПО										Данные
	БПК <sub>5</sub>	взв. вещ.	K	Na	Ca	Mg	NO <sub>3</sub> +NH <sub>4</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	P	
	г O <sub>2</sub> /м <sup>3</sup>	г/м <sup>3</sup>									
поверхностный сток с полей орошения	27,3	127,4	44,9	19,6	29,3	28,1	35,1	13,7	46,2	39,6	анализов
ПДК	3	0,5	50	120	180	40	12	300	100	3,5	
количество загрязнений, снятых почвой ( $m_i$ )	24,3	126,9	–	–	–	–	23,1	–	–	36,1	по расчету
показатель относительной опасности загрязняющего вещества ( $A_i$ )	0,33	2,0	0,02	0,0083	0,0056	0,025	0,083	0,0033	0,01	0,286	по расчету ф-ла 3
приведенная масса годового сброса ( $A_i m_i$ )	8,02	253,8	–	–	–	–	1,92	–	–	10,3	по расчету ф-ла 2
$\sum_{i=1}^n A_i m_i = 274 \frac{\Gamma}{\text{М}^3} = 0,000274 \text{ т/м}^3$						сумма годового сброса загрязняющих веществ $M = 0,000274 \cdot 0,0051 \cdot 1150 \cdot 10^4 = 16,07 \text{ усл. т/год}$					

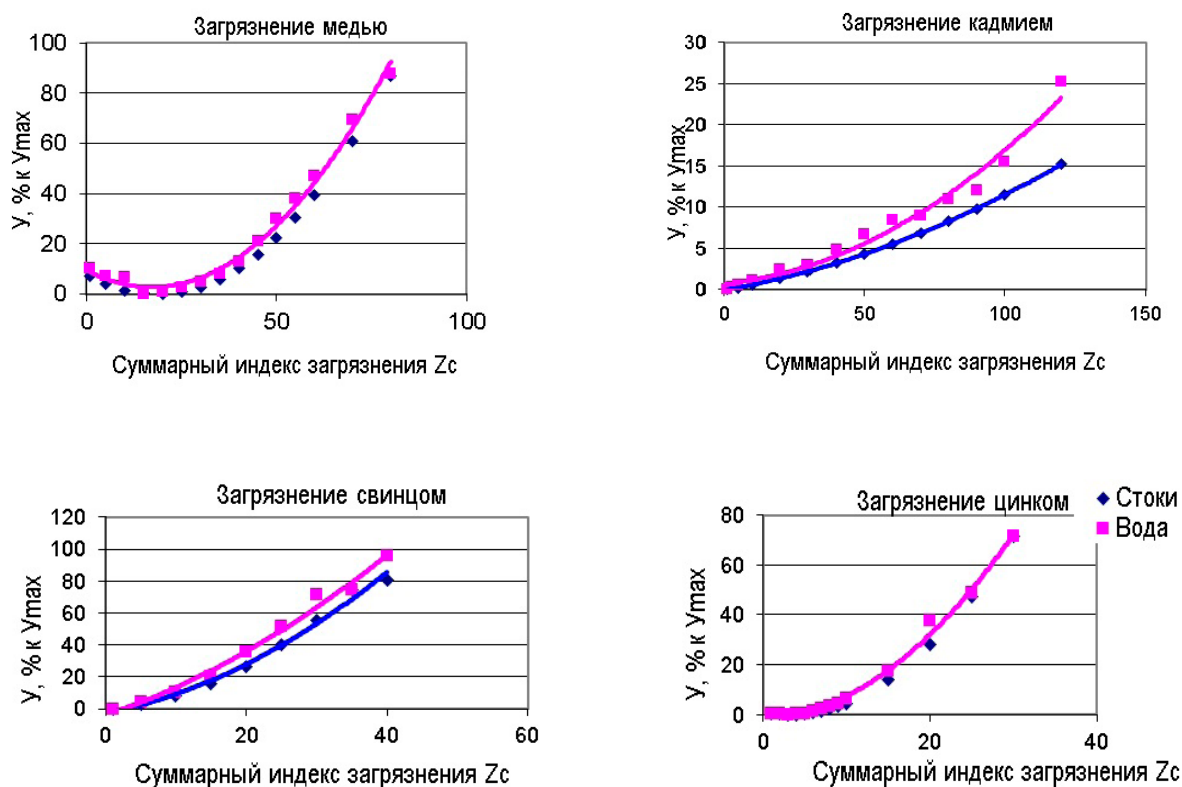


Рис. 1. Недобор урожая многолетних трав в зависимости от уровня загрязнения почвы ТМ

Для цинка снижение урожая составляло 0,1–71,5 %. Характеризуя влияние меди и цинка на урожай исследуемых культур, следует также отметить, что на нормальном уровне функционирования экосистемы имеет место положительное влияние антропогенного воздействия на урожай. Это связано с тем, что медь, как и цинк, являются биофильными элементами и устранение их дефицита улучшает физиологические процессы, что проявляется на количественных и качественных характеристиках урожая.

Несколько иная картина наблюдается для почв, загрязненных преимущественно свинцом и кадмием. При фоновом уровне содержание этих элементов на урожай влияет несущественно. Отклонения находятся в пределах точности вычислений. При увеличении загрязнения урожай снижается. Так, на допустимом и критическом уровнях функционирования агроландшафта недобор урожая многолетних трав составляет для кадмия 1,3–5,2 %, а для свинца – 2,5–94,9 %.

Орошение стоками свиноводческого комплекса снижает негативное действие загрязнения ТМ на урожай многолетних трав. Прежде всего это проявляется в большей урожайности их по сравнению с орошением природной водой. Однако уровень падения урожайности при преимущественном загрязнении почвы медью и цинком при орошении стоками и природной водой примерно одинаков.

Также нами проведено экспериментально-теоретическое обоснование норм орошения стоками свиноводческих комплексов многолетних трав с учетом уровня загрязнения почвы соединениями тяжелых металлов. Установлено, что оросительные нормы дифференцируются в зависимости от уровня загрязнения почвы и урожайности сельскохозяйственных культур. Определение норм орошения по предлагаемой методике приводит к экономии поливной воды и энергоресурсов благодаря учету изменения урожайности и водопотребления сельскохозяйственных культур. При этом экономию поливной воды можно рассчитать по формулам [4]:

$$\Delta M = M - M_z, \quad (4)$$

$$\Delta M_{\%} = \frac{M - M_z}{M_z} 100, \quad (5)$$

где  $\Delta M$  и  $\Delta M_{\%}$  – удельная экономия поливной воды, м<sup>3</sup>/га и в процентах соответственно;  $M$  – оросительная норма, рассчитанная для незагрязненной территории, м<sup>3</sup>/га;  $M_z$  – оросительная норма, рассчитанная с учетом индекса суммарного загрязнения территории, м<sup>3</sup>/га.

Энергозатраты на полив Э и Э<sub>z</sub> будут зависеть не только от величины оросительных норм  $M$  и  $M_z$ , но и от энерговооруженности техники полива, то есть от конкретного ее вида.

Расчет экономии энергетических затрат можно выполнить по аналогичным зависимостям [4]:

$$\Delta \Theta = \Theta - \Theta_z, \quad (6)$$

$$\Delta \Theta_{\%} = \frac{\Theta - \Theta_z}{\Theta_z} 100, \quad (7)$$

где  $\Delta \Theta$  и  $\Delta \Theta_{\%}$  – удельная экономия энергетических ресурсов (кВт·ч/га орошаемой площади и в процентах соответственно).

При выполнении расчетов экономии поливной воды и энергозатрат рекомендуется следующая последовательность.

1. Определяется величина оросительных норм  $M$  и  $M_z$  по соответствующим методикам.
2. Устанавливается величина поливной нормы  $m$  по региональным рекомендациям.
3. Вычисляется количество поливов [4]:

$$n = M/m, \quad (8)$$

$$n_z = M_z/m. \quad (9)$$

4. Определяется продолжительность работы дождевальной машины или аппарата на одной позиции [5]:

$$t = \frac{m \cdot \beta}{60 \cdot i}, \quad (10)$$

где  $t$  – время работы машины (аппарата) на позиции, час;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий потери воды в процессе дождевания;  $i$  – интенсивность искусственного дождя, мм/мин.

Общая продолжительность полива за вегетационный период, час, равна [6]:

$$T = t \cdot n, \quad (11)$$

$$T_z = t_n \cdot z. \quad (12)$$

Требуемая мощность насосной станции будет равна [7]:

$$N = \frac{y \cdot Q \cdot H}{0,102 \cdot \eta_n \cdot \eta_d \cdot F}, \quad (13)$$

где  $N$  – требуемая мощность (удельная) для полива 1 га орошаемой площади, кВт ч/га;  $y$  – плотность воды, = 1 т/м<sup>3</sup>;

$Q$  – расход насосной станции, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – требуемый свободный напор на гидранте, м;

$\eta_n$  – коэффициент полезного действия насоса = 0,77–0,88;

$\eta_d$  – коэффициент полезного действия двигателя = 0,80.

Затраты энергии для полива 1 га орошаемой площади в течение вегетационного периода определяются как

$$\mathcal{E} = N \cdot T, \quad (14)$$

$$\mathcal{E}_z = N \cdot T_z, \quad (15)$$

где  $\mathcal{E}$  и  $\mathcal{E}_z$  – затраты энергии (удельные) для полива 1 га орошаемой площади в течение вегетационного периода, соответственно как не загрязненной, так и загрязненной тяжелыми металлами, кВт ч/га [7].

Следует отметить, что снижение водопотребления приводит и к увеличению межполивных минимальных интервалов, что повышает сезонную производительность дождевальных машин [7]:

$$F_{\text{сез}} = \frac{86,4 \cdot Q \cdot T_{\text{min}}}{m \cdot \beta} K_{\text{сут}} K_M K_B, \quad (16)$$

где  $F_{\text{сез}}$  – сезонная производительность (сезонная нагрузка для года расчетной обеспеченности орошения), га;

$Q$  – расход воды дождевальной установки, л/с;

$T_{\text{min}}$  – межполивной минимальный интервал при расчетной норме полива в наиболее напряженный (критический) период развития сельскохозяйственных культур для года расчетной обеспеченности, сут.;

$K_{\text{сут}}$  – коэффициент использования рабочего времени суток;

$K_M$  – коэффициент, учитывающий простой дождевальных машин по метеоусловиям;

$K_B$  – коэффициент, учитывающий потери рабочего времени в связи с перебазировкой машины на позиции.

Увеличение сезонной производительности дает возможность уменьшить количество дождевальных установок [8]:

$$n_d = F_{\text{оп}} / F_{\text{сез}}, \quad (17)$$

где  $F_{\text{оп}}$  – общая площадь орошаемого участка, га.

В свою очередь, уменьшение количества дождевальных установок приводит к снижению металлоемкости оросительной сети. Следует учесть, что снижение энергозатрат также приводит к снижению металлоемкости насосно-силового оборудования. Расчеты, проведенные с учетом вышеизложенного, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчет технико-экономических показателей режима орошения в условиях техногенного загрязнения

Показатель	Ед. изм.	Базовый вариант	Новый вариант		
			уровни загрязнения почвы		
			нормальный	допустимый	критический
1	2	3	4	5	6
<b>Преимущественное загрязнение медью</b>					
площадь орошения	га	1150	180	620	350
нормы орошения	м <sup>3</sup> /га	1620	1620	1360	1240
средневзвешенная норма орошения	м <sup>3</sup> /га	–		1342	
экономия оросительной воды	м <sup>3</sup> /га	–		278	
	%	–		20,7	
поливная норма	м <sup>3</sup> /га	250		250	
количество поливов	шт.	6		5	
удельные затраты энергии на проведение поливов	кВт ч/га	11,9		9,9	
экономия удельной энергии	кВт ч/га	–		2,0	
	%	–		20,5	

1	2	3	4	5	6
сезонная нагрузка на дожд. технику	га	116,2		145,3	
к–во дожд. машин	шт.	10		8	
<b>Преимущественное загрязнение цинком</b>					
площадь орошения	га	1150	210	705	235
нормы орошения	м <sup>3</sup> /га	1620	1620	1310	1230
средневзвешенная норма орошения	м <sup>3</sup> /га	–		1306	
экономия оросительной воды	м <sup>3</sup> /га	–		314	
	%	–		24,0	
поливная норма	м <sup>3</sup> /га	250		250	
Количество поливов	шт.	6		5	
удельные затраты энергии на проведение поливов	квт ч/га	11,9		9,6	
экономия удельной энергии	квт ч/га	–		2,29	
	%	–		23,9	
сезонная нагрузка на дожд. технику	га	116,2		159,8	
к–во дожд. машин	шт.	10		7	
<b>Преимущественное загрязнение свинцом</b>					
площадь орошения	га	1150	–	618	532
нормы орошения	м <sup>3</sup> /га	1620	–	1460	1400
средневзвешенная норма орошения	м <sup>3</sup> /га	–		1432	
экономия оросительной воды	м <sup>3</sup> /га	–		188	
	%	–		13,1	
поливная норма	м <sup>3</sup> /га	250		250	
кол–во поливов	шт	6		5	
удельные затраты энергии на проведение поливов	квт ч/га	11,9		10,5	
экономия удельной энергии	квт ч/га	–		1,4	
	%	–		12,9	
сезонная нагрузка на дожд. технику	га	116,2		145,3	
к–во дожд. машин	шт.	10		8	

П р и м е ч а н и е. Расчеты выполнены для среднезасушливого года (25 % по дефициту водного баланса) северной гидрологоклиматической зоны. Почвы – дерново-подзолистые суглинистые.

Расчеты табл. 3 показывают, что применение разработанной методики расчета норм орошения позволяет более рационально расходовать водные и энергетические ресурсы. Так, расход воды на формирование оптимального водного режима снижается на 13,1–24,0%, экономия энергии на проведение поливов –

12,9–23,9 %. Уменьшается количество требуемой дождевальной техники.

Однако к этому следует добавить, что экономическая эффективность режимов орошения на допустимом и критическом уровнях экосистемы должна определяться с учетом затрат на реабилитацию земель. Зачастую она



может быть оправдана лишь социальным и экологическим эффектами, измерить которые в денежном выражении достаточно сложно, но проведение их необходимо.

Бесспорно, проведенные расчеты эколого-экономического эффекта не являются исчерпывающими, так как требуется специальное изучение многих аспектов этой проблемы. Ясно одно, что устойчивость взаимосвязи состояния экосистемы и уровня экономики зависит от состояния окружающей среды, которое ухудшается в результате техногенного воздействия.

В заключение следует отметить, что при рассмотрении эколого-экономических систем со сложными обратными связями вскрываются области устойчивости параметров и состояния системы. Например, интенсификация производства при неизменной технологии повышает уровень загрязнения окружающей

среды, а окружающая среда посредством изменения качества трудовых, сырьевых и других ресурсов влияет на темпы и экономику развития производства. Подобных эколого-экономических обратных взаимосвязей в системе рационального использования, воспроизводства ресурсов и охраны среды большое множество. Сложность расчета величины эколого-экономических взаимосвязей сопряжена в основном с изменением и определением времени протекания процессов на всех этапах обратных связей системы. Поэтому для упрощения исследований иногда целесообразен системный анализ отдельных экономических и экологических показателей. Это позволит выполнить ориентировочное научное прогнозирование развития экологической системы и создать оптимальный программно-целевой план размещения производительных сил.

### Выводы

1. Загрязнение почвы соединениями тяжелых металлов приводит к потерям урожая многолетних трав. При загрязнении медью недобор урожая колеблется в пределах от 0,9 до 60,7 %, а для цинка он составляет 0,1–71,5 %. Такая ситуация имеет место при допустимом и критическом уровнях загрязнения почвы. На нормальном уровне функционирования экосистемы внесение меди и цинка способствует повышению урожайности. Это связано с тем, что медь, как и цинк, являются биофильными элементами и устранение их дефицита улучшает физиологические процессы, что проявляется в количественных и качественных характеристиках урожая. На почвах, загрязненных свинцом и кадмием при фоновом уровне содержания этих элементов, урожай снижается незначительно. При допустимом

и критическом уровнях функционирования агроландшафта недобор урожая многолетних трав колеблется для кадмия 1,3–25,2 %, для свинца 2,5–94,9 %.

Орошение стоками свиноводческого комплекса снижало негативное действие загрязнения ТМ на урожай многолетних трав. Это проявлялось прежде всего в большей урожайности по сравнению с орошением природной водой.

2. Применение разработанной методики расчета норм орошения, учитывающей экологическое состояние почв, позволяет более рационально расходовать водные и энергетические ресурсы. Расход воды на формирование оптимального водного режима снижается на 13,1–24,0 %, а экономия энергии при проведении поливов составляет 12,9–23,9 %.

### Библиографический список

1. Рекомендации по технологии утилизации свиносток в сложных гидрогеологических условиях, сохраняющей почвенное плодородие и предотвращающей загрязнение водных объектов. – Рязань, 2000. – 58 с.

2. Пособие по эколого-экономической оценке размещения объектов хозяйственной и иной деятельности в Республике Беларусь / А. М. Клыбик [и др.] ; под общ. ред. И. В. Войтова. – Минск : М-во природ. ресурсов и охраны окруж. среды Респ. Беларусь, 1999. – 346 с.

3. Децук, В. С. Оценка ущерба от загрязнения окружающей природной среды : учеб.-метод. пособие / В. С. Децук. – Гомель : БелГУТ, 2015. – 50 с.
4. Mazhaysky, Y. A. Technological solutions for ecological safety of meliorative systems in case of technical pollution / Y. A. Mazhaysky, V. I. Zhelyazko // Abstracts of ICID international conference «Food production and water: social economic issues of irrigation and drainage». – P. 27–28.
5. Лихацевич, А. П. Сельскохозяйственные мелиорации : учеб. для студ. высш. учеб. завед. по спец. «Мелиорация и водное хозяйство» / А. П. Лихацевич, М. Г. Голченко, Г. И. Михайлов; под ред. А. П. Лихацевича. – Минск : ИВЦ Минфина, 2010. – 464 с.
6. Голченко, М. Г. Справочник по орошению дождеванием / М. Г. Голченко и [др.] ; под ред. М. Г. Голченко, А. И. Михальцевича. – Минск : Ураджай, 1993. – 247 с.
7. Желязко, В. И. Дождевание многолетних трав стоками свиноводческих комплексов : дис. ... канд. техн. наук : 06.01.02 / В. И. Желязко. – Горки, 1987. – 138 с.
8. Лукашевич, В. М. Экономическая и энергетическая оценка возделывания японского проса на зеленую массу при дождевании / В. М. Лукашевич // Вестн. БГСХА. – 2015. – № 4. – С. 116–119.

Поступила 3 мая 2021 г.