

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.67.03

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-1-132-149

Агроэкологическая оценка хозяйственно-бытовых сточных вод в целях их применения для орошения

Светлана Александровна Манжина¹, Михаил Вячеславович Власов²

^{1, 2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹manz.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-0843>

²m_vlasov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9103-1958>

Аннотация. Цель: определение пригодности хозяйственно-бытовых сточных вод г. Новочеркаска в целях их применения для орошения сельскохозяйственных культур. **Материалы и методы.** Материалами для исследования являлись пробы сточных вод с ООО «Кадамовские очистные сооружения» (КОС) разной степени очистки. Оценка пригодности сточных вод разной степени очистки для орошения проводилась по их экологическим, санитарно-гигиеническим и агрохимическим показателям, включая выявление возможного деградационного потенциала сточных вод при воздействии их на почвы и удобрительных показателей, исходя из потребностей в питательных веществах сельскохозяйственных культур. **Результаты.** Сточные воды КОС проходили раздельную очистку на сооружениях механической очистки, совместную полную биологическую очистку в аэротенках-смесителях, при этом обеззараживание очищенных сточных вод производилось газообразным хлором и доочистка в биологических прудах. Для проведения лабораторного эксперимента из системы очистки были отобраны порции исследуемой сточной воды в четырехкратной повторности на репрезентативных технологических стадиях. Пробы были исследованы по химическим и микробиологическим показателям в соответствии с действующими нормативами и методическими рекомендациями. Сделано заключение об их экологических, санитарно-гигиенических, ирригационных и удобрительных характеристиках. **Выводы.** Сточные воды после механической очистки имеют негативные санитарно-гигиенические показатели, что является основным препятствием для их использования в качестве оросительных. Сточные воды после дезинфекции имеют допустимые показатели для использования в целях орошения, однако в данном случае рекомендуется их применение в вариантах с чередованием поливов сточной и природной водой либо после разбавления их в соотношении 2:1 водой благоприятного для орошения состава.

Ключевые слова: хозяйственно-бытовые сточные воды, орошение сельскохозяйственных культур, стокосодержащие воды, экологические показатели, санитарно-гигиенические показатели, ирригационные показатели

Для цитирования: Манжина С. А., Власов М. В. Агроэкологическая оценка хозяйственно-бытовых сточных вод в целях их применения для орошения // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 1. С. 132–149. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-132-149>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Agro-ecological assessment of domestic wastewater for irrigation purposes

Svetlana A. Manzhina¹, Mikhail V. Vlasov²

^{1, 2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹manz.svetlana@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9322-0843>

²m_vlasov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9103-1958>

Abstract. Purpose: to determine the suitability of domestic wastewater from the town of Novocherkassk for their use in crop irrigation. **Materials and methods.** The materials for the study were samples of wastewater from Kadamovskie wastewater treatment plant (KWWTP) of various degrees of purification. The assessment of suitability of wastewater of various degrees of purification for irrigation was carried out according to their environmental, sanitary-and-hygienic and agrochemical indicators, including the identification of possible degradation potential of wastewater when exposed to soils and fertilizer indicators, based on the agricultural crop needs for nutrients. **Results.** Wastewater from the KWWTP was treated separately at mechanical treatment facilities, joint full-scale biologically treated in aeration tanks-mixers, while the treated wastewater was disinfected with gaseous chlorine and additionally treated in biological ponds. To conduct a laboratory experiment, portions of the studied wastewater were selected from the purification system in fourfold replications at representative technological stages. The samples were examined by chemical and microbiological parameters in accordance with the current regulations and methodological recommendations. A conclusion on their ecological, sanitary-hygienic, irrigation and fertilizing characteristics is made. **Conclusions.** Wastewater after mechanical treatment has negative sanitary and hygienic indicators, which is the main obstacle to their use as irrigation. Wastewater after disinfection has acceptable indicators for use for irrigation, however, in this case, it is recommended to use it in variants with alternating irrigation with wastewater and natural water or after diluting it with water of favorable for irrigation composition in a ratio of 2:1.

Keywords: domestic wastewater, crop irrigation, runoff water, environmental specifications, sanitary sanitary-and-hygienic indicators, irrigation indicators

For citation: Manzhina S. A., Vlasov M. V. Agro-ecological assessment of domestic wastewater for irrigation purposes. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(1): 132–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-1-132-149>.

Введение. В настоящее время дефицит водных ресурсов вызывает все большую озабоченность у мирового сообщества. Для сохранения стабильного производства в сельском хозяйстве, которое является залогом продовольственной безопасности проживающих на планете людей, разрабатываются новые улучшенные технологии производства и способы управления водными ресурсами, позволяющие повысить эффективность их использования. Одной из таких технологий является использование в целях орошения сельскохозяйственных культур сточных вод различной степени очистки, в первую очередь хозяйственно-бытовых, животноводческих, а также стоков от предприятий пищевой промышленности. Практика использования сточных вод в этом направлении имеет многолетний опыт

исследования как у нас в стране, так и за рубежом. При этом отмечается их удобрительный потенциал для растений [1, 2] в зависимости от концентрации в них таких веществ, как азот, фосфор и калий. Помимо удобрительного потенциала, отмечается возможность их негативного воздействия на солевой состав почв [3–7], что является лимитирующим фактором их использования на различных типах почв [7–9].

Решающим условием использования сточных вод различной степени очистки являются их химические и микробиологические показатели, так как вторичное использование стоков разрешается при условии обеспечения полной экологической безопасности и исключения риска для местного населения по санитарно-гигиеническим условиям [10–12]. Исследование имеющихся в настоящее время данных многолетней отечественной и зарубежной практики применения сточных вод в целях орошения показало возможность их эффективного использования в этом направлении. Однако следует отметить, что в каждом конкретном случае требуется обязательная оценка как положительных эффектов, так и возможных рисков от их ирригационного применения.

В соответствии с изложенным, цель исследования заключалась в определении пригодности коммунально-бытовых сточных вод г. Новочеркаска для использования в целях орошения сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы. В качестве материалов для исследования были отобраны пробы сточных вод с разных стадий очистки ООО «Кадамовские очистные сооружения» (КОС).

Система сбора, очистки и отведения сточных вод г. Новочеркаска состоит из комплекса самотечных и напорных канализационных трубопроводов с размещенными на них канализационными насосными станциями. Комплекс очистных сооружений канализации города включает: ООО «КОС», ОСК «НЭВЗ», фекальные очистные сооружения (ФОС) на территории НчГРЭС [13].

КОС осуществляют прием и очистку сточных вод от следующих районов и микрорайонов г. Новочеркасска: Первомайский район, микрорайоны Черемушки, Новый поселок («Новый городок»), Восточный, Новоселовка и Промышленный. Производительность КОС: проектная – 55 тыс. м³/сут, фактическая – 30 тыс. м³/сут¹.

КОС расположены в районе балки Сухая Кадамовка восточнее города, в направлении пос. Донской на удалении от мест проживания населения. Площадка КОС со всех сторон граничит с сельхозугодьями и лесозащитными насаждениями. Сточные воды, представленные хозяйственно-бытовыми и промышленными стоками, проходят отдельную для каждого вида вод очистку на сооружениях механической очистки, далее смешиваются и проходят полную биологическую очистку в аэротенках-смесителях, обеззараживание газообразным хлором и доочистку в биологических прудах.

Для проведения лабораторного эксперимента были отобраны порции исследуемой сточной воды. Отбор сточных вод осуществлялся в 2022 г. в четырехкратной повторности из системы очистки на репрезентативных технологических стадиях: после грубой механической очистки до первичного отстойника (из состава хозяйственно-бытовых сточных вод) и после прохождения всех видов отстойников, аэрации и дезинфекции стоков хлором (смесь очищенных коммунально-бытовых и промышленных сточных вод). Лабораторные исследования выполнялись в аккредитованной эколого-аналитической лаборатории ФГБНУ «РосНИИПМ» по общепринятым методикам.

Оценка сточных вод по экологическим показателям заключалась в сравнении концентраций растворенных в них веществ с их предельно допустимыми концентрациями (ПДК) для водных объектов рыбохозяйственного и хозяйственно-питьевого назначения. Помимо этого, оценивалась

¹Очистные сооружения Новочеркасска [Электронный ресурс]. URL: <https://dc-region.ru/ochistnyye-sooruzheniya-novocherkasska> (дата обращения: 10.09.2022).

минерализация сточных вод, которая играет важную роль в принятии решения об их применении в целях гидромелиорации. Как правило, оценка минерализации проводится с учетом ионов солей, которые можно разделить на две группы: первая группа – катионы щелочных и щелочноземельных металлов (кальция (Ca^{2+}), натрия (Na^{+}), магния (Mg^{2+})) и анионы кислотных остатков (гидрокарбонат (HCO_3^{-}), сульфат (SO_4^{2-}), хлорид (Cl^{-}), карбонат (CO_3^{2-})), играющие основополагающую роль в формировании минерализации природных вод; вторая группа – катионы аммония (NH_4^{+}), тяжелых металлов (сумма), железо общее (сумма Fe^{2+} и Fe^{3+}) и анионы биогенных соединений (нитрат (NO_3^{-}), ортофосфат (PO_4^{3-}), нитрит (NO_2^{-})), оказывающие влияние на минерализацию при их присутствии в водах в значительных количествах.

В соответствии с СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» минерализация воды не должна превышать 1000 мг/дм^3 , в т. ч. по содержанию хлоридов – 350 мг/дм^3 и сульфатов – 500 мг/дм^3 [13]. Обработка результатов оценки минерализации сточных вод разной степени очистки осуществлялась в соответствии с таблицей 1 с учетом местного почвенного поглощающего комплекса (ППК) [7].

В соответствии с ГОСТ Р 17.4.3.07-2001² водородный показатель pH сточных вод должен находиться в пределах 6,0–8,5. С учетом pH почвы показатели pH оросительной воды имеют рекомендуемые пределы:

²ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. Введ. 2001-10-01. М.: Стандартиформ, 2008. 4 с.

- рН почвы < 6,0 – рН оросительной воды 6,5–8,5;
- рН почвы > 8,0 – рН оросительной воды 6,0–7,5.

Таблица 1 – Оценка пригодности очищенных сточных вод для целей орошения согласно почвенно-мелиоративной классификации оросительной воды [7]

В г/дм³

Table 1 – Assessment of the suitability of treated wastewater for irrigation purposes according to the soil-reclamation classification of irrigation water [7]

In g/dm³

Класс качества воды	Минерализация воды, пригодной для орошения почв		
	с тяжелым гранулометрическим составом и с ППК > 30 мг-экв/100 г почвы	со средним гранулометрическим составом и с ППК 30–15 мг-экв/100 г почвы	с легким гранулометрическим составом и с ППК < 30 мг-экв/100 г почвы
I – неопасный	0,2–0,5	0,2–0,6	0,2–0,7
II – мало-опасный	0,5–0,8	0,6–1,0	0,7–1,2
III – умеренно опасный	0,8–1,2	1,0–1,5	1,2–2,0
IV – опасный	> 1,2	> 1,5	> 2,0

Оценка сточных вод по санитарно-гигиеническим показателям включает учет содержания в них патогенных микроорганизмов, напрямую связанного с источником образования сточных вод (таблица 2).

Таблица 2 – Интенсивность загрязнения сточных вод по микробиологическим показателям (ориентировочные данные, приведенные в МУ 2.1.5.800-99) [14]

Table 2 – The intensity of wastewater pollution by microbiological indicators (indicative data given in MU 2.1.5.800-99) [14]

Вид сточных вод	Микробиологический показатель				
	Общие коли-формные бактерии, КОЕ/100 мл	Колифаги, БОЕ/100 мл	Вирусы, БОЕ/100 мл	Сальмонеллы, КОЕ/л	Туберкулезная палочка
Хозяйственно-бытовые сточные воды	10 ⁶ –10 ⁸	10 ³ –10 ⁴	до 10 ³	10 ² –10 ⁶	+
Городские сточные воды (соотношение хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод 60:40)	10 ⁵ –10 ⁷	10 ³ –10 ⁴	до 10 ³	10 ³ –10 ⁴	+

В соответствии с МУ 2.1.5.800-99 термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ) не должны обнаруживаться в сточных водах, направляемых на орошение сельскохозяйственных культур, общие колиформные бактерии (ОКБ) должны содержаться в количествах не более 1000 КОЕ/100 мл [14].

Ирригационная оценка сточных вод производится посредством оценки влияния их на солевой состав почв. В настоящее время для оценки таких показателей используют ряд формул:

- коэффициент ионного обмена И. Н. Антипова-Каратаева и Г. М. Кадера [15];
- ирригационный коэффициент по Х. Стеблеру [7];
- натриево-адсорбционное отношение (SAR) [7];
- классификация М. С. Буданова [4];
- опасность засоления почв [11];
- опасность магниевого осолонцевания почвы [4, 7].

Удобрительный потенциал сточных вод оценивается, исходя из содержания в них основных питательных компонентов растений, к которым в первую очередь относятся азот, фосфор и калий (таблица 3).

Таблица 3 – Характеристика сточных вод по количеству питательных веществ – удобрительной ценности [7]

Table 3 – Wastewater characteristics in terms of nutrient amount – fertilizing value [7]

Группа сточных вод	Содержание в сточной воде элементов питания, мг/л	Удобрительная ценность сточных вод	Рекомендованное использование при орошении
Первая	Азот > 100 Фосфор > 30 Калий > 70	Высокая	Требуется, как правило, разбавление и дополнительное внесение фосфорных удобрений
Вторая	Азот = 50...100 Фосфор = 10...30 Калий = 30...70	Средняя	Требуется внесение NPK, как правило, в размере 50 % нормы, рекомендуемой для данной зоны при обычном орошении
Третья	Азот < 50 Фосфор < 10 Калий < 30	Низкая	Требуется внесение минеральных и органических удобрений нормой, рекомендуемой в зоне при обычном орошении

Результаты и обсуждение. Результаты химического анализа природной и сточных вод разной степени очистки и их обработка по экологическим показателям приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Экологические показатели природных и сточных вод разной степени очистки

Table 4 – Environmental indicators of natural and wastewater of different degrees of purification

Вещество	ПДК _{р.х.} ³	ПДК _{х.п.} ⁴	Сточные воды КОС (среднее по 4 результатам измерений за 4 месяца ⁵)		р. Дон ⁶
			после механической очистки	после дезинфекции	
1	2	3	4	5	6
ХПК, мг/дм ³	15–30		209,49	37,50	24,81
БПК _{пол.} , мг О ₂ /дм ³	3,0	3,0	124,91	8,52	–
БПК ₅ , мг О ₂ /дм ³	2,1	3,5–4	93,92	6,41	< 1
Растворенный кислород, мг/дм ³	> 6,0	> 6,0	4,2	8,35	2,61
Сухой остаток, мг/дм ³	–	–	1385,25	1484,5	844
NO ₃ [–] , мг/дм ³	40	45	91,36	0,55	1,85
NO ₂ [–] , мг/дм ³	0,08	3,3	0,22	0,14	< 0,02
NH ₄ ⁺ , мг/дм ³	0,5	1,5–2,0	33,17	0,59	0,14
HCO ₃ [–] , мг/дм ³	–	1000	477,36	225,38	–
SO ₄ ^{2–} , мг/дм ³	100	100	465,44	473,24	267,46
Cl [–] , мг/дм ³	300	350	230,44	261,63	123,83
PO ₄ ^{2–} , мг/дм ³	0,2	3,5	7,06	7,00	0,33
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,05	0,3	0,805	0,12	< 0,05
Cu ²⁺ , мг/дм ³	0,001	1,0	< 0,1	< 0,1	< 0,01
Zn ²⁺ , мг/дм ³	1,0	1,0	0,07	< 0,04	< 0,004

³Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Электронный ресурс]: приказ Минсельхоза России от 13 дек. 2016 г. № 552 (с изм. на 10 марта 2020 г.). Доступ из справ. правовой системы «Гарант».

⁴Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [Электронный ресурс]: СанПиН 1.2.3685-21: утв. Глав. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 28.01.21: введ. в действие с 01.03.21. Доступ из справ. правовой системы «Гарант».

⁵Отбор проб осуществлялся 14.02.2022, 08.04.2022, 06.05.2022, 04.07.2022.

⁶Отбор проб осуществлялся 08.09.2022.

Продолжение таблицы 4

Table 4 continued

1	2	3	4	5	6
Na ⁺ , мг/дм ³	120	200	255,65	189,43	–
Mg ²⁺ , мг/дм ³	40	50	58,02	58,12	–
Ca ²⁺ , мг/дм ³	180	120	147,74	134,86	–
K ⁺ , мг/дм ³	50	–	22,34	16,00	–
Жесткость об- щая, ммоль/дм ³	–	–	12,01	11,55	0,20
Минерализация, г/дм ³	–	1,000	1,766	1,340	< 1
Щелочность, ммоль/дм ³ , или рН, ед. рН	–	–	8,03	3,80	7,8

На основании полученных лабораторных данных о химическом составе проб сточных вод КОС разной степени очистки проанализированы основные показатели их качества на предмет возможности использования для орошения сельскохозяйственных культур. Агрохимические требования, определяющие пригодность сточных вод для орошения, направлены:

- на повышение плодородия почвы, предупреждение кумуляции в ней токсичных веществ, засоления и осолонцевания;
- получение стабильного и высокого урожая выращиваемых культур с качеством, отвечающим санитарно-гигиеническим и ветеринарным требованиям.

Экологические показатели сточных вод КОС разной степени очистки оцениваются в соответствии с принятыми нормативными показателями, а именно ПДК для водных объектов рыбохозяйственного и хозяйственно-питьевого назначения.

Из полученных данных видно, что в сточных водах отмечается превышение ПДК содержания ионов сульфатов, фосфатов, кальция, магния и натрия. Показатели азотсодержащих соединений по количеству азота в сточных водах являются незначительными.

Высокое значение показателя химической потребности воды в кис-

лорде (ХПК) свидетельствует о наличии в сточной воде большого количества трудноокисляемых органических соединений. Возможность химического загрязнения почв при орошении их сточными водами имеющегося состава целесообразно оценивать не только в зависимости от ПДК веществ в водных объектах, но и с учетом начального их содержания в исследуемых почвах [4–6, 10]. При этом ощутимые превышения ПДК в сточных водах отмечаются по биогенам, которые, в свою очередь, являются основными питательными веществами для растений.

При анализе сточных вод КОС разной степени очистки в соответствии с уровнем содержания в них ионов для проб после механической очистки в расчет минерализации включены ионы Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NH_4^+ , NO_3^- , PO_4^{3-} , NO_2^- , для проб после дезинфекции в расчет минерализации включены ионы Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} .

Исходя из полученных данных (таблица 2), сточные воды по степени минерализации относятся к слабоминерализованным (1,0–3,0 г/дм³).

Используя аналитические параметры таблицы 1 и учитывая, что большинство почв Ростовской области можно классифицировать как «почвы со средним гранулометрическим составом», а сточные воды после механической очистки имеют IV класс качества, получаем, что их нельзя рекомендовать для орошения без предварительного разбавления. Исходя из статистических показателей минерализации этих вод, их применение для орошения сельскохозяйственных культур возможно только после разбавления не менее чем в соотношении 1:1 водой благоприятного для орошения состава. Сточные воды после дезинфекции, исходя из статистических данных об их минерализации, можно отнести к III классу опасности – умеренно опасным, что позволяет говорить о возможности применения их в целях орошения на благоприятных почвах, либо в вариантах с чередованием поливов сточной и природной водой, либо после разбавления их в соотношении 2:1 водой благоприятного для орошения состава.

Исследование санитарно-гигиенических показателей хозяйственно-бытовых сточных вод разной степени очистки показало, что сточные воды, прошедшие только механическую очистку, содержат недопустимое количество контролируемых микроорганизмов: ОКБ в среднем $2,1 \cdot 10^{10}$ ед./100 мл, ТКБ в среднем $2,1 \cdot 10^{10}$ ед./100 мл. Такие показатели не соответствуют и требованиям НТП-АПК 1.30.03.02-06⁷. Для доведения этих показателей до нормативных необходимо проводить дезинфекцию либо разбавление сточных вод перед поливом. Учитывая высокое содержание бактерий, уменьшение их численности за счет разбавления считаем нецелесообразным. Дополнительная дезинфекция сточных вод, вне имеющейся на КОС технологии биологической очистки, также является нецелесообразной. Приведенные факты указывают на невозможность использования сточных вод после грубой механической очистки в целях орошения сельскохозяйственных культур вследствие высокого содержания в них патогенных микроорганизмов.

Биологическая очистка сточных вод осуществляется в аэротенке, однако биологической очисткой в аэротенке не достигается уменьшение в сточных водах бактерий, включая болезнетворные, до нормативных показателей, поэтому на заключительных этапах очистки осуществляется их дезинфекция хлорированием. Основное достоинство этого метода дезинфекции заключается в том, что хлор обладает пролонгированным действием и обработанная им вода длительное время остается обеззараженной. Сточные воды после дезинфекции имеют микробиологические показатели: ОКБ – 0 ед./100 мл, ТКБ – 0 ед./100 мл, что позволяет их использовать для орошения сельскохозяйственных культур.

Ирригационная оценка сточных вод приведена в таблице 5.

⁷Нормы технологического проектирования оросительных систем с использованием сточных вод: НТП-АПК 1.30.03.02-06: утв. М-вом сел. хоз-ва и продовольствия Рос. Федерации 01.01.07: введ. в действие с 01.01.07. М.: Росинформагротех, 2007. 53 с.

Таблица 5 – Оценка пригодности сточной воды для орошения по ионному составу и минерализации

Table 5 – Assessment of wastewater suitability for irrigation by ionic composition and salinity

Формула	Критерий оценки	Значение	Оценка
1	2	3	4
Коэффициент ионного обмена по И. Н. Антипову-Каратаеву и Г. М. Кадеру			
$K_{\text{ио}} = \frac{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}{[\text{Na}^{+}] + 23,8 \cdot C}$	$K_{\text{ио}} > 1$ – вода пригодна для орошения; $K_{\text{ио}} < 1$ – вода непригодна для орошения	I – 0,53 II – 0,68	непригодна
Натриевое засоление по М. Ф. Буданову			
$K_{\text{Na}} = \frac{[\text{Na}^{+}]}{[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]}$	$K_{\text{Na}} \leq 0,7$ – нет опасности возникновения;	I – 0,9	есть опасность возникновения
	$K_{\text{Na}} > 0,7$ – есть опасность возникновения	II – 0,7	нет опасности возникновения
Засоление (А. М. Можейко, Т. К. Воротник)			
$K_{\text{зас}} = \frac{([\text{Na}^{+}] + [\text{K}^{+}]) \cdot 100\%}{[\text{Na}^{+}] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{K}^{+}]}$	$K_{\text{зас}} > 75\%$ – вода опасна для орошения; $K_{\text{зас}} = 66...75\%$ – вода малопригодна для орошения, необходимо разбавление; $K_{\text{зас}} < 66\%$ – вода пригодна для орошения	I – 65,67 II – 59,88	вода пригодна для орошения
Магниевое осолонцевание			
$K_{\text{Mg}} = \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{[\text{Ca}^{2+}]}$	$K_{\text{Mg}} < 1$ – нет опасности возникновения; $K_{\text{Mg}} > 1$ – есть опасность возникновения	I – 0,65 II – 0,72	нет опасности магниевого осолонцевания
Ирригационный коэффициент по Х. Стеблеру			
$K_{\text{и}} = \frac{288}{[\text{Na}^{+}] + 4 \cdot [\text{Cl}^{-}]}$ при $[\text{Cl}^{-}] + [\text{SO}_4^{2-}] > [\text{Na}^{+}] > [\text{Cl}^{-}]$	$K_{\text{и}} > 18$ – хорошее; $K_{\text{и}} = 18...6$ – удовлетворительное; $K_{\text{и}} = 5,9...1,2$ – неудовлетворительное;	I – 7,767	удовлетворительное
$K_{\text{и}} = \frac{288}{5 \cdot [\text{Cl}^{-}]}$ при $[\text{Na}^{+}] < [\text{Cl}^{-}]$	$K_{\text{и}} < 1,2$ – плохое, т. е. вода является непригодной для орошения	II – 7,816	

Продолжение таблицы 5

Table 5 continued

1	2	3	4
Натриевое адсорбционное отношение (SAR)			
$SAR = \frac{1,41 \cdot [Na^+]}{\sqrt{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}}$	При минерализации 1–2 г/л: SAR = 6...8 – низкая опасность; SAR = 12...15 – средняя опасность; SAR = 18...22 – высокая опасность; SAR > 22 – очень высокая опасность	I – 4,483 II – 3,412	низкая опасность
Опасность вторичного осолонцевания по SAR (от USDA)			
$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$	SAR < 10 – неопасна; SAR = 10...18 – средняя опасность; SAR = 18...26 – высокая опасность; SAR > 26 – очень высокая	I – 4,496 II – 3,422	неопасна
Опасность засоления почв			
$K_{o.z.} = \frac{0,03 \cdot C}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}$	K _{o.z.} < 4 – вода пригодна для орошения любых почв; K _{o.z.} = 4...5 – вода пригодна для орошения супесчаных почв; K _{o.z.} = 5...6 – вода пригодна для орошения песчаных почв	I – 4	вода пригодна для орошения супесчаных почв
		II – 3,47	вода пригодна для орошения любых почв
Опасность магниевое осолонцевания почвы (И. Сабольч, К. Дараб)			
$K_{Mg} = \frac{[Mg^{2+}] \cdot 100}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}$	K _{Mg} ≥ 50 – вредное воздействие магния на почву	I – 39,56 II – 41,80	не оказывает вредного воздействия
Примечание – I – после механической очистки; II – после биологической очистки; [Ca ²⁺], [Mg ²⁺], [Na ⁺], [Cl ⁻] – концентрации катионов и анионов, мг-экв/дм ³ ; C – минерализация воды, мг/дм ³ .			

Оценка удобрительного потенциала сточных вод (в соответствии с данными таблицы 3) показала, что в исследуемых сточных водах показатели азотсодержащих соединений имеют следующие характеристики: 1) после механической очистки соответствуют второй группе; 2) после биологической очистки соответствуют третьей группе. Наиболее благоприятными для орошения являются сточные воды после биологической очистки, вместе с тем они являются недостаточно насыщенными по содержанию азота, что не позволяет их расценивать как источник данного питательного компонента.

Оба вида сточных вод по содержанию фосфора и калия относятся к третьей группе, т. е. наблюдается их низкое содержание, что требует внесения минеральных и органических удобрений нормой, рекомендуемой в рассматриваемой зоне при обычном орошении. Таким образом, исследованные сточные воды не представляют удобрительной ценности.

Выводы

1 Сточные воды КОС после механической очистки имеют IV класс качества по минерализации, высокую степень загрязненности по микроорганизмам (ОКБ, ТКБ), в т. ч. патогенным, к тому же отмечается возможность натриевого засоления при использовании их для полива. По количеству основных питательных элементов (азоту, фосфору, калию) эти сточные воды не представляют удобрительной ценности. Учитывая приведенные характеристики, использование их для орошения считаем недопустимым.

2 Сточные воды после дезинфекции по их минерализации можно отнести к III классу опасности – умеренно опасным, что позволяет говорить о возможности применения их в целях орошения на благоприятных почвах, либо в вариантах с чередованием поливов сточной и природной водой, либо после разбавления их в соотношении 2:1 водой благоприятного для орошения состава. По санитарно-биологическим, экологическим и ирригационным характеристикам они являются благоприятными в использо-

вании для орошения сельскохозяйственных культур. По содержанию фосфора и калия относятся к третьей группе, т. е. наблюдается их низкое содержание, что требует внесения минеральных и органических удобрений нормой, рекомендуемой в зоне при обычном орошении.

3 Основными факторами применения исследуемых сточных вод для орошения могут являться дефицит водных ресурсов, природоохранные мероприятия по отношению к приемникам сточных вод и экономическая целесообразность.

Список источников

1. Pescod M. B. Wastewater treatment and use in agriculture – FAO irrigation and drainage paper 47 [Electronic resource]. Rome, 1992. URL: <https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e00.htm#Contents> (date of access: 10.09.2022).
2. Effects of untreated and treated wastewater at the morphological, physiological and biochemical levels on seed germination and development of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), alfalfa (*Medicago sativa* L.) and fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) / I. Rekik, Z. Chaabane, A. Missaoui, A. C. Bouket, L. Luptakova, A. Elleuch, L. Belbahri // *Journal of Hazardous Materials*. 2017, Mar. 15. Vol. 326. P. 165–176. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.12.033.
3. Assessment of the effect of irrigation with treated wastewater on soil properties and on the performance of infiltration models / A. A. Albalasmeh, M. Z. Alghzawi, M. A. Gharai-beh, O. Mohawesh // *Water*. 2022. 14(9). 1520. <https://doi.org/10.3390/w14091520>.
4. Буданов М. Ф. Система и состав контроля за качеством природных и сточных вод при использовании их для орошения. Киев: Урожай, 1970. 48 с.
5. Кузнецов Е. В., Хаджиди А. Е. Сельскохозяйственный мелиоративный комплекс для устойчивого развития агроландшафтов: монография. Краснодар: ЭДВИ, 2014. 200 с.
6. Новиков В. М., Элик Э. И. Использование сточных вод на полях орошения. М.: Россельхозиздат, 1986. 80 с.
7. Маматов С. А., Умаров Х. У., Мацура М. Е. Критерии пригодности сточных вод на орошение сельхозкультур // Актуальные проблемы водного хозяйства и мелиорации орошаемых земель: материалы респ. науч.-практ. конф., 12 дек. 2011 г. Ташкент, 2011. С. 70–76.
8. Турсунова Э. А. Использование бытовых сточных вод для орошения в сельском хозяйстве // *Вестник науки и образования*. 2019. № 10(64), ч. 3. С. 11–13.
9. Экспериментальные исследования оценки качества подготовленных сточных вод для орошения сельскохозяйственных культур / А. О. Матвиенко, Л. А. Митяева, Ю. Е. Домашенко, С. М. Васильев // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2019. № 7(177). С. 33–38.
10. Захаров Р. Ю., Волкова Н. Е. Экологическая оценка возможности использования очищенных сточных вод КОС ПГТ «Советский» для целей орошения // *Системы контроля окружающей среды*. 2019. № 2(36). С. 126–134. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-126-134.
11. Экологическая оценка полива очищенной сточной водой корнеплодов в Крыму / Е. П. Боровой, Е. А. Ходяков, В. И. Кременской, А. М. Джапарова // *Известия*

Нижеволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4(52). С. 49–57. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-7.

12. Волкова Н. Е., Захаров Р. Ю. Использование очищенных сточных вод в Крыму: опыт прошлого, реалии настоящего // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2017. № 3(27). С. 144–159. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=289> (дата обращения: 10.09.2022).

13. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий [Электронный ресурс]: СанПиН 2.1.3684-21: утв. Глав. гос. санитар. врачом РФ 28.01.21. Доступ из справ. правовой системы «Гарант».

14. Методические указания. 2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водоемов. Организация госсанэпиднадзора за обеззараживанием сточных вод [Электронный ресурс]: МУ 2.1.5.800-99: утв. Минздравом России 27.12.99: введ. в действие с 01.06.00. Доступ из справ. правовой системы «Гарант».

15. Антипов-Каратаев И. Н., Кадер Г. М. К методике определения мелиоративной оценки оросительной воды // Почвоведение. 1969. № 5. С. 69–101.

References

1. Pescod M.B., 1992. Wastewater treatment and use in agriculture – FAO irrigation and drainage paper 47. Rome, available: <https://www.fao.org/3/t0551e/t0551e00.htm#Contents> [accessed 10.09.2022].

2. Rekik I., Chaabane Z., Missaoui A., Bouket A.C., Luptakova L., Elleuch A., Belbahri L., 2017. Effects of untreated and treated wastewater at the morphological, physiological and biochemical levels on seed germination and development of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), alfalfa (*Medicago sativa* L.) and fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.). Journal of Hazardous Materials, Mar. 15, vol. 326, pp. 165-176, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.12.033.

3. Albalasmeh A.A., Alghzawi M.Z., Gharaibeh M.A., Mohawesh O., 2022. Assessment of the effect of irrigation with treated wastewater on soil properties and on the performance of infiltration models. Water, 14(9), 1520, <https://doi.org/10.3390/w14091520>.

4. Budanov M.F., 1970. *Sistema i sostav kontrolya za kachestvom prirodnyh i stochnyh vod pri ispol'zovanii ih dlya orosheniya* [System and Composition of Control over the Quality of Natural and Waste Waters When Using Them for Irrigation]. Kyiv, Harvest Publ., 48 p. (In Russian).

5. Kuznetsov E.V., Khadzhidi A.E., 2014. *Sel'skokhozyaystvennyy meliorativnyy kompleks dlya ustoychivogo razvitiya agrolandshaftov: monografiya* [Agricultural Reclamation Complex for the Sustainable Development of Agricultural Landscapes: monograph]. Krasnodar, EDVI Publ., 200 p. (In Russian).

6. Novikov V.M., Elik E.I., 1986. *Ispol'zovanie stochnykh vod na polyakh orosheniya* [Use of Waste Water for Irrigation Fields]. Moscow, Rosselkhozizdat Publ., 80 p. (In Russian).

7. Mamatov S.A., Umarov Kh.U., Matsura M.E., 2011. *Kriterii prigodnosti stochnykh vod na oroshenie sel'khozkul'tur* [Criteria for the suitability of wastewater for crop irrigation]. *Aktual'nye problemy vodnogo khozyaystva i melioratsii oroshaemykh zemel': materialy respublikanskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual Problems of Water Management and Reclamation of Irrigated Lands: Proc. of the Republican Scientific-Practical Conference]. Tashkent, pp. 70-76. (In Russian).

8. Tursunova E.A., 2019. *Ispol'zovanie bytovykh stochnykh vod dlya orosheniya v sel'skom khozyaystve* [The use of domestic wastewater for agricultural irrigation]. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bull. of Science and Education], no. 10(64), pt. 3, pp. 11-13. (In Russian).

9. Matvienko A.O., Mityaeva L.A., Domashenko Yu.E., Vasiliev S.M., 2019. *Ekspериментal'nye issledovaniya otsenki kachestva podgotovlennykh stochnykh vod dlya orosheniya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [Experimental studies of quality evaluation of treated sewage for crop irrigation]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bull. of Altai State Agrarian University], no. 7(177), pp. 33-38. (In Russian).
10. Zakharov R.Yu., Volkova N.E., 2019. *Ekologicheskaya otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya ochishchennykh stochnykh vod KOS PGT "Sovetskiy" dlya tseley orosheniya* [Environmental assessment of possibility of using purified effluents of sewage treatment plant of the settlement Sovetsky for irrigation purposes]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy* [Environmental Control Systems], no. 2(36), pp. 126-134, DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-126-134. (In Russian).
11. Borovoy E.P., Khodyakov E.A., Kremenskiy V.I., Dzhaparova A.M., 2018. *Ekologicheskaya otsenka poliva ochishchennoy stochnoy vodoy korneplodov v Krymu* [Ecological estimation of irrigation of root by treated wastewater in Crimea]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proc. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 4(52), pp. 49-57, DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-7. (In Russian).
12. Volkova N.E., Zakharov R.Yu., 2017. [Treated sewage waters usage in Crimea: experience of the past, reality of the present]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 3(27), pp. 144-159, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=289> [accessed 10.09.2022]. (In Russian).
13. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k sodержaniyu territoriy gorodskikh i sel'skikh poseleniy, k vodnym ob'ektam, pit'evoy vode i pit'evomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukhу, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshcheniy, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy* [Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of territories of urban and rural settlements, for water facilities, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, living quarters, operation of industrial, public premises, organization and conduct of sanitary and anti-epidemic (preventive) measures]. SanPiN 2.1.3684-21, approved by Russia's Chief Public Health Officer of 28.01.2021. (In Russian).
14. *Vodootvedenie naseleennykh mest, sanitarnaya okhrana vodoemov. Organizatsiya gossanepidnadzora za obezzarazhivaniem stochnykh vod* [Water disposal of populated areas, sanitary protection of reservoirs. Organization of the State Sanitary and Epidemiological Surveillance for the Disinfection of Wastewater]. Guidelines 2.1.5.800-99, approved by Ministry of Health of Russia of 27.12.1999, input in action in 01.06.2000. (In Russian).
15. Antipov-Karataev I.N., Kader G.M., 1969. *K metodike opredeleniya meliorativnoy otsenki orositel'noy vody* [On method of determining the reclamation assessment of irrigation water]. *Pochvovedenie* [Soil Study], no. 5, pp. 69-101. (In Russian).

Информация об авторах

С. А. Манжина – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент;
М. В. Власов – ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук.

Information about the authors

S. A. Manzhina – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
M. V. Vlasov – Leading Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.10.2022; одобрена после рецензирования 14.12.2022; принята к публикации 20.12.2022.

The article was submitted 12.10.2022; approved after reviewing 14.12.2022; accepted for publication 20.12.2022.