

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕЛИОРАТИВНО- ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Научная статья

УДК 628.31:631.874

Возможность повышения содержания органического вещества в осадках сточных вод за счет сидератов

Светлана Александровна Манжина¹, Лев Игоревич Русин²

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

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

²leva19111@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0007-8802-4726>

Аннотация. Цель: определить возможности применения сидеральных культур для повышения содержания органического вещества в осадках сточных вод. **Материалы и методы.** В рамках исследований были проведены вегетационные опыты с посевом семян тест-растений в образцы почв Аксайского района Ростовской области и в осадки сточных вод трехлетнего срока пребывания на иловых картах канализационных очистных сооружений «Кадамовские» города Новочеркасска. **Результаты.** Оценивался фитотоксический эффект по всхожести семян и биомассе растений. Полученные данные указывают на значительное угнетающее воздействие осадков сточных вод на всхожесть семян редиса и горчицы белой (уменьшилась более чем вдвое), всхожесть семян кресс-салата уменьшилась на 31 %, а овса и вики – всего на 11 %. Исходя из данных о средней массе одного растения в случае их выращивания в осадках для всех тест-растений за период наблюдений отмечен эффект стимулирования. Наибольший прирост биомассы одного растения в сравнении с данными на контроле отмечен у кресс-салата, наименьший – у белой горчицы. Анализ данных о составе осадков после выращивания тест-растений показал расходование органического вещества и питательных веществ во всех вариантах за исключением смеси сидератов, где на фоне расходования питательных веществ содержание органического вещества выросло практически в полтора раза – с 11,48 до 16,8 %. **Выводы.** Получены статистически достоверные данные об увеличении количества гумуса в осадках сточных вод после выращивания смеси сидератов: его содержание увеличилось на 49 % при оставлении в осадках только корневой системы растений. При этом содержание фосфора уменьшилось на 20 %, что лежит в пределах погрешности лабораторных измерений. Содержание азота после выращивания смеси сидератов уменьшилось незначительно – на 8 %. Полученные данные указывают на возможность обогащения осадков сточных вод по органическому веществу посевом сидеральных трав, что можно осуществлять непосредственно на иловых картах.

Ключевые слова: осадок сточных вод, тест-растения, органическое вещество, смесь сидератов, фитотоксический эффект, иловые поля

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы мелиоративно-водохозяйственного комплекса и пути их решения» (г. Новочеркасск, 11 октября 2024 г.).

Для цитирования: Манжина С. А., Русин Л. И. Возможность повышения содержания органического вещества в осадках сточных вод за счет сидератов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 94, № 3. С. 33–50.

MODERN PROBLEMS OF THE RECLAMATION AND WATER MANAGEMENT COMPLEX AND WAYS TO SOLUTION THEM

Original article

Possibility of increasing the organic matter content in sewage sludge by using siderates

Svetlana A. Manzhina¹, Lev I. Rusin²

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

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

²leva19111@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0007-8802-4726>

Abstract. Purpose: to determine the possibilities of applying green manure crops to increase the organic matter content in sewage water sludge. **Materials and methods.** The research included vegetation experiments with sowing test plant seeds in soil samples from Aksay district Rostov region and in three-year-old sewage sludge from the Kadamovskie sewage treatment plants in Novocherkassk. **Results.** The phytotoxic effect was assessed based on seed germination and plant biomass. The data obtained indicate a significant inhibitory effect of sewage water sludge on the germination of radish and white mustard seeds (it decreased more than twice), while the germination of garden cress seeds decreased by 31 % and that of oats and vetch by only 11 %. Based on the data on the average mass of one plant in the case of their cultivation in sludge, a stimulating effect was noted for all test plants during the observation period. The greatest increase in the biomass of one plant in comparison with the control data was noted for garden cress, the least – for white mustard. Analysis of the sediment composition data after growing the test plants showed the consumption of organic matter and nutrients in all variants except for the green manure mixture, where, against the background of the consumption of nutrients, the organic matter content increased almost one and a half times – from 11.48 to 16.8 %. **Conclusions.** Statistically reliable data were obtained on the increase in humus in sewage sludge after growing the green manure mixture: its content increased by 49 % while leaving only the root system of plants in the sludge. At the same time, the phosphorus content decreased by 20 %, which is within the margin of error of laboratory measurements. The nitrogen content after growing the green manure mixture decreased slightly – by 8 %. The obtained data indicate the possibility of enriching sewage water sludge in organic matter by sowing siderate grasses, which can be carried out directly on sludge maps.

Keywords: sewage water sludge, test plants, organic matter, green manure mixture, phytotoxic effect, sludge fields

Evaluation of the research results: the main provisions of the article were reported at the All-Russian scientific and practical conference “Modern Problems of Land Reclamation and Water Industrial Complex and Ways to Solve Them” (Novocherkassk, October 11, 2024).

For citation: Manzhina S. A., Rusin L. I. Possibility of increasing the organic matter content in sewage sludge by using siderates. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2024;94(3):33–50. (In Russ.).

Введение. Осадки сточных вод (ОСВ) являются крупнотоннажным отходом муниципальных очистных сооружений. Условия их образования варьируются в зависимости от степени оснащения очистных станций оборудованием и от принятой системы подготовки перед размещением на

площадках для хранения – на иловых картах или на полигонах. Однако их длительное хранение сопровождается рядом социально-экологических проблем, в том числе неприятным запахом и отчуждением земель. Так, суммарная площадь иловых полей в некоторых городах достигает 100 га и более (рисунок 1).

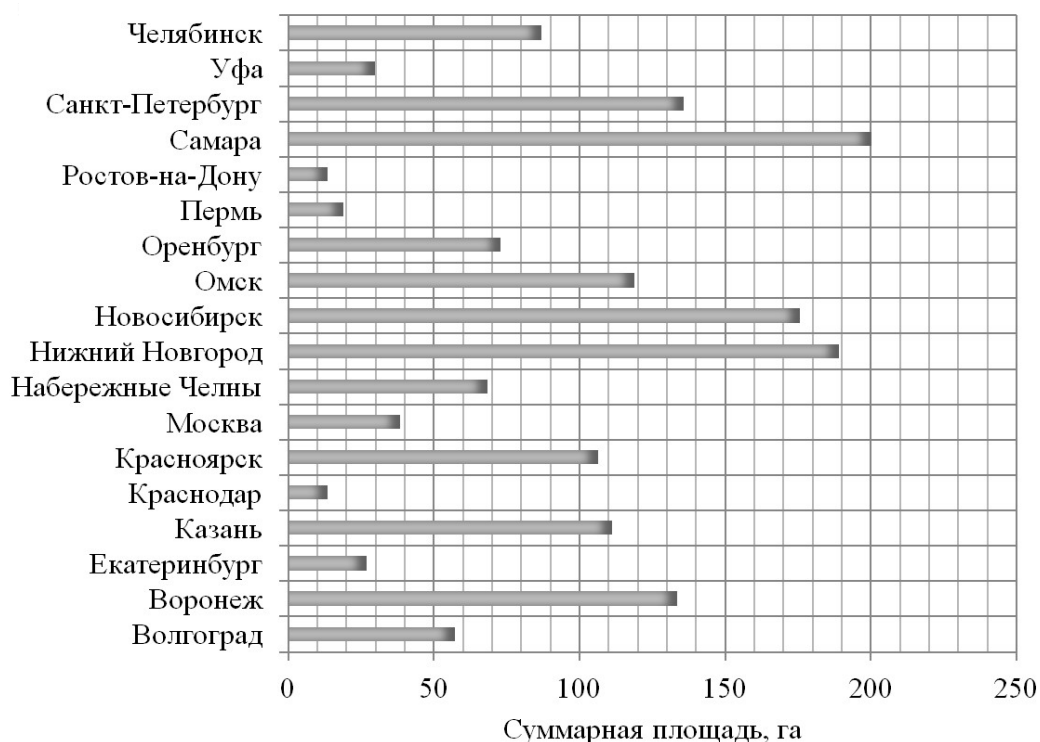


Рисунок 1 – Суммарная площадь иловых полей по некоторым городам Российской Федерации¹
Figure 1 – Total area of sludge fields in some cities of the Russian Federation¹

Заполненные полигоны и иловые поля требуют ликвидации накопленного вреда посредством рекультивации. Для решения экологических проблем, вызванных размещением осадков сточных вод, применяют различные способы их дальнейшей переработки или использования без предварительной подготовки [1–5]. Наиболее простой способ – сжигание образовавшихся на очистных сооружениях осадков, которое в настоящее время практикуется в г. Санкт-Петербурге. Сжигание осадков осуществляется

¹Рекультивация иловых полей в России (terratch.ru) // Геопространственная аналитика [Электронный ресурс]. URL: <https://geonovosti.terratch.ru/social/rekultivatsiya-ilovykh-poley-v-rossii/?ysclid=m0ev9n01cc213515293> (дата обращения: 29.08.2024).

в высокотемпературных камерах, что позволяет значительно уменьшить их объем. Для этих целей эксплуатируется три завода по сжиганию осадков (ЗСО), куда подается 800–1200 м³/сут обезвоженного осадка влажностью 75 % (кека), из которого образуется после сжигания 90–110 м³/сут золы. Последняя также направляется на полигон [5]. Ввод в эксплуатацию ЗСО уменьшил объемы складирования ОСВ и необходимость отчуждения площадей под полигоны [5]. Тем не менее этот способ не имеет большого эффекта в экологическом плане: во-первых, из-за образования отходящих газов и золы с высокой концентрацией тяжелых металлов и иных примесей, обнаруживаемых в осадках, во-вторых, из-за утраты ряда ценных компонентов осадка, и в первую очередь органического вещества. В мировой практике в настоящее время широко апробируется ряд способов использования ОСВ в качестве вторичного ресурса для получения энергии, тепла или удобрений [6–11]. Наиболее простым является использование их в качестве удобрений или грунтов при рекультивации [12].

Вторичное использование осадков в нашей стране практически не осуществляется: в качестве удобрений в России используется не более 5–7 % из общего объема ОСВ [2], примерно четверть сжигается [5], а остальная их часть концентрируется на иловых площадках или подвергается захоронению (рисунок 2).

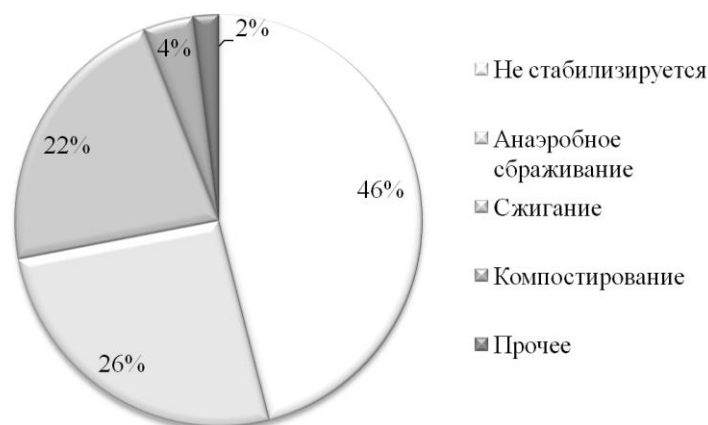


Рисунок 2 – Обращение с осадками сточных вод в Российской Федерации

Figure 2 – Sewage sludge management in the Russian Federation

Согласно вступившему в силу с 1 марта 2023 г. дополнению к п. 1 ст. 51.1 Федерального закона «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ², «очищающие канализационные стоки организации, как и иные юридические лица, вправе самостоятельно устанавливать статус веществ или предметов, образовавшихся в результате реализации их основной деятельности: являются ли они отходом или побочным продуктом». Во втором случае юридические лица освобождаются от обязанности внесения платы за размещение отходов. Однако статус побочного продукта предполагает использование осадков в качестве сырья или продукции на собственном производстве или третьими лицами по истечении трехлетнего срока размещения. Такое положение повышает заинтересованность в повторном использовании осадков. При этом применение осадков в качестве удобрений и грунта для рекультивации регламентируется определенными требованиями к их составу согласно ГОСТ Р 54651-2011³, ГОСТ Р 17.4.3.07-2001⁴ и ГОСТ Р 54534-2011⁵.

Собранные данные [13–20] позволяют сделать выводы о соответствии осадков сточных вод экологическим требованиям, отраженным в государственных стандартах. Выявлены несоответствия действующим стандартам ряда осадков по содержанию органического вещества, тем не менее апробация таких осадков в качестве удобрений дала положительный эф-

²Об охране окружающей среды: Федер. закон Рос. Федерации от 10 янв. 2002 г. № 7-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 20 дек. 2001 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 26 дек. 2001 г. [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/.

³ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия [Электронный ресурс]. Введ. 2013-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁴ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений [Электронный ресурс]. Введ. 2001-10-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁵ГОСТ Р 54534-2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель [Электронный ресурс]. Введ. 2011-11-28. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

фekt, если рассматривать рост и развитие растений [21, 22]. Все приведенное указывает на актуальность и необходимость исследований возможностей повышения агрохимической ценности осадков сточных вод за счет увеличения в них органического вещества. Одним из вариантов повышения содержания органического вещества (гумуса) является посев сидератов, которые в дальнейшем запахиваются с целью обогащения почв [23, 24].

Исходя из этого, целью работы стало исследование возможности применения сидеральных культур для повышения содержания органического вещества в осадках сточных вод.

Материалы и методы. Фитодиагностика позволяет как выявить экологические параметры тестируемых почв и субстратов, так и оценить их плодородие. Поэтому в рамках исследований были проведены вегетационные опыты по следующей схеме:

- контроль – почва с посевом тест-растений;
- осадки сточных вод с посевом тест-растений.

В качестве тест-растений использовали:

- редис (*Raphanus sativus*, двудольное растение, семейство крестоцветных);
- кресс-салат (*Lepidium sativum* L., двудольное растение, семейство крестоцветных);
- смесь сидератов, состоящую из овса (*Avena sativa* L., однодольное растение, семейство злаковых), вики (*Vicia sativa* L., двудольное растение, семейство бобовых) и белой горчицы (*Sinapis alba* L., двудольное растение, семейство крестоцветных).

В качестве образцов почв были отобраны: образец 1 – из квазиприродной экосистемы (роща «Красная весна» г. Новочеркаска), образцы 2 и 3 – с сельскохозяйственных полей Мишкинского (далее – МСП) и Большелогского (далее – БСП) сельских поселений Аксайского района

Ростовской области. Отбор почвенных проб осуществлялся в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017⁶.

Характеристика отобранных образцов почв приведена в таблице 1.

**Таблица 1 – Агрономические показатели образцов почв
Аксайского района Ростовской области**

**Table 1 – Agronomic indicators of soil samples of Aksay
district of Rostov region**

Показатель	Почва		
	образец 1	образец 2	образец 3
Кальций (в. в.), ммоль/100 г (%)	1,9 (0,038)	1,0 (0,020)	0,60 (0,015)
Магний (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,09 (0,001)	0,10 (0,001)	0,25 (0,003)
Калий (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,01 (0,001)	0,01 (0,001)	0,05 (0,002)
Натрий (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,08 (0,002)	0,02 (0,001)	0,23 (0,005)
Ионы бикарбоната (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,32 (0,02)	0,44 (0,034)	0,70 (0,043)
Хлорид-ионы (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,91 (0,032)	0,45 (0,016)	0,30 (0,011)
Сульфат-ионы (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,83 (0,04)	0,31 (0,015)	0,26 (0,012)
Водородный показатель, ед. pH	7,4 ± 0,1	7,78 ± 0,1	7,33 ± 0,1
Плотный остаток (в. в.), %	0,131	0,104	0,100
Фосфор, подвижная форма, мг/кг	36,3 ± 7,3	19,8 ± 3,9	59,2 ± 11,8
Азот нитратов, мг/кг	117,73 ± 29,43	20,0 ± 5,00	6,41 ± 1,60
Калий, мг/кг	461,7 ± 92,4	325,3 ± 65,1	351,6 ± 59,7
Органическое вещество (гумус), %	7,5 ± 0,8	2,7 ± 0,5	3,9 ± 0,6
Физическая глина, %	27,6	30,2	38,5
Примечание – в. в. – водная вытяжка.			

Почвы характеризуются как незасоленные, легко- и среднесуглинистые, незагрязненные.

Осадки сточных вод трехлетнего срока пребывания на иловых картах отобраны с канализационных очистных сооружений «Кадамовские» г. Новочеркаска (Ростовская область). Характеристика осадков приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Химические показатели осадков сточных вод

Table 2 – Chemical indicators of sewage sludge

Определяемый показатель	ОСВ
1	2
Кальций (в. в.), ммоль/100 г (%)	17,50 (0,350)
Магний (в. в.), ммоль/100 г (%)	2,0 (0,024)

⁶ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб [Электронный ресурс]. Введ. 2019-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

1	2
Калий (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,01 (0,001)
Натрий (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,05 (0,001)
Ионы бикарбоната (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,32 (0,020)
Ионы хлорида (в. в.), ммоль/100 г (%)	0,46 (0,016)
Ионы сульфата (в. в.), ммоль/100 г (%)	15,0 (0,720)
Водородный показатель, ед. рН	6,02 ± 0,1
Органическое вещество (гумус), % сухой массы (ГОСТ 26213-2021 п. 1)	11,10 ± 1,1
Органическое вещество, % сухой массы (ГОСТ 27980-88 ⁷ п. 1)	27,10 ± 1,2
Плотный остаток в. в., %	1,358
Фосфор (подвижная форма), мг/кг	166,5 ± 33,3
Азот нитратов, мг/кг	139,36 ± 34,84
Калий, мг/кг	552,7 ± 110,5
Медь (кислоторастворимая форма), мг/кг	3,38 ± 0,54
Свинец (кислоторастворимая форма), мг/кг	0,60 ± 0,14
Кадмий (кислоторастворимая форма), мг/кг	0,92 ± 0,31
Цинк (кислоторастворимая форма), мг/кг	30,4 ± 10,9
Никель (кислоторастворимая форма), мг/кг	1,41 ± 0,33
Медь (подвижная форма), мг/кг	2,53 ± 0,40
Свинец (подвижная форма), мг/кг	0,77 ± 0,18
Кадмий (подвижная форма), мг/кг	0,40 ± 0,14
Цинк (подвижная форма), мг/кг	8,40 ± 3,02
Никель (подвижная форма), мг/кг	0,69 ± 0,16
Примечание – в. в. – водная вытяжка.	

Согласно полученным данным содержание тяжелых металлов в ОСВ в валовой форме отвечает требованиям ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 и ГОСТ Р 54651-2011, их содержание в подвижной форме не превышает показатели для почв согласно СанПиН 1.2.3685-21⁸. В исследуемых осадках обнаружено большое количество водорастворимых ионов кальция и сульфатов, что, по аналогии с почвами, говорит об их засолении. Последний фактор будет оказывать токсическое действие на растения, это не позволяет рассматри-

⁷ГОСТ 27980-88. Удобрения органические. Методы определения органического вещества [Электронный ресурс]. Введ. 1990-01-01. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

⁸Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Электронный ресурс]: Постановление Гл. гос. санитар. врача Рос. Федерации от 28 янв. 2021 г. № 2. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

вать осадок в качестве грунта в «чистом виде». Содержание гумуса в ОСВ не отвечает требованиям ГОСТ Р 17.4.3.07-2001, содержание органического вещества в соответствии с требованиями к органическим удобрениям не отвечает ГОСТ Р 54651-2011, что не позволяет вносить осадок в почву без предварительного насыщения органическим веществом. Содержание физической глины в осадках находится на уровне 10,3 %.

Агрономическая характеристика почв и осадков приведена в таблице 3.

**Таблица 3 – Группировка образцов почв и осадка по ЦИНАО⁹
и по гранулометрическому составу**

Table 3 – Grouping of soil and sludge samples according to the Central Scientific Research Institute of Agrochemical Service of Agriculture and by granulometric composition

Показатель	Почва			ОСВ
	образец 1	образец 2	образец 3	
Гумус, %	IV – повышенное	II – низкое	II – низкое	IV – повышенное
Фосфор (по Мачигину), мг/кг	V – высокое	III – среднее	V – высокое	VI – очень высокое
Азот нитратов, мг/кг	IV – повышенное	III – среднее	I – очень низкое	IV – повышенное
Калий (по Мачигину), мг/кг	IV – повышенное	III – среднее	IV – повышенное	V – высокое
рН водной вытяжки, ед. рН	VI – слабо-щелочная	VI – слабо-щелочная	V – нейтральное	III – средне-кислая
Эколого-генетический статус по гранулометрическому составу (по Н. А. Качинскому)	легкосуглинистая	легкосуглинистая	среднесуглинистая	легко-супесчаная

Подготовленные образцы осадков предварительно просеяны через сито с размером ячеек 5 мм. Полученные образцы весом по 1 кг помещали в вегетационные сосуды, после чего разравнивали, увлажняли и осуществляли посев тест-растений в трехкратной повторности. В период наблюдения статичность температурного режима не поддерживалась, температура

⁹Рекомендации по интегрированному применению минеральных удобрений в системах земледелия с учетом региональных особенностей производства сельскохозяйственной продукции в Российской Федерации / под ред. С. П. Торшина, В. А. Романенкова. М.: ВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова, 2019. 174 с.

окружающей среды колебалась в пределах 20–27 °С. Полив всех сосудов проводился одновременно, по необходимости. Для обеспечения равномерности освещения сосуды переставляли раз в три дня. Оценивали показатели всхожести семян, массу всех растений по каждому образцу и среднюю массу одного растения.

Фитотоксичный эффект осадков по оцениваемым показателям определяли по формуле:

$$\Phi\mathcal{E} = \frac{(T\Phi_K - T\Phi_O) \cdot 100\%}{T\Phi_K}, \quad (1)$$

где $\Phi\mathcal{E}$ – фитотоксичный эффект по параметру, %;

$T\Phi_K$ – тест-функция растений на контроле;

$T\Phi_O$ – тест-функция растений на фитотоксичной среде.

Уровень фитотоксичности оценивается по следующим показателям:

$\Phi\mathcal{E} < 10\%$ – токсичность отсутствует;

$\Phi\mathcal{E} = 10\text{--}30\%$ – слабый уровень токсичности;

$\Phi\mathcal{E} = 30\text{--}50\%$ – средний уровень токсичности;

$\Phi\mathcal{E} > 50\%$ – высокий уровень токсичности.

В качестве контрольных данных взяли среднестатистические показатели по трем образцам почв. Опыты проводились в трехкратной повторности.

Результаты и обсуждение. Первые всходы семян появились через 7 дней после их посева. Окончательное количество взошедших растений было сформировано к десятому дню. Наблюдение за растениями проводили в течение месяца. По окончании наблюдений наземная часть растений была срезана и взвешена на лабораторных весах. Результаты исследований приведены в таблице 4.

Полученные данные указывают на значительное угнетающее действие ОСВ на всхожесть семян редиса и горчицы белой, которая уменьшилась более чем вдвое, всхожесть семян кресс-салата уменьшилась на 31 %,

а овса и вики – всего на 11 %. Сравнивая данные о средней массе одного растения в случае их выращивания в осадках, для всех тест-растений за период наблюдений отметили эффект стимулирования. Наибольший прирост биомассы одного растения, в сравнении с данными на контроле, отмечен у кресс-салата, наименьший – у белой горчицы (рисунок 3).

Таблица 4 – Результаты исследований фитоэффектов тест-растений
Table 4 – Research results of test plant phytoeffects

Показатель	Выращено на почвах*			Выращено на ОСВ		
	редис	кресс-салат	сидерат (овес, вика, белая горчица)	редис	кресс-салат	сидерат (овес, вика, белая горчица)
Всхожесть семян, %	73	65	90; 90; 85	35	45	80; 80; 40
Фитоэффект	—	—	—	52,05	69,23	11,11; 11,11; 52,94
Биомасса на весь урожай, г	4,80	1,22	4,5; 2,9; 2,4	2,94	1,3	4,0; 3,0; 1,2
Прирост биомассы на 1 растение, мг	380,00	127,00	450; 325; 280	420,00	144,44	500; 375; 300
Фитоэффект	—	—	—	–10,53	–13,73	–11,11; –13,33; –7,14
Примечание – * – среднее по трем образцам почв.						

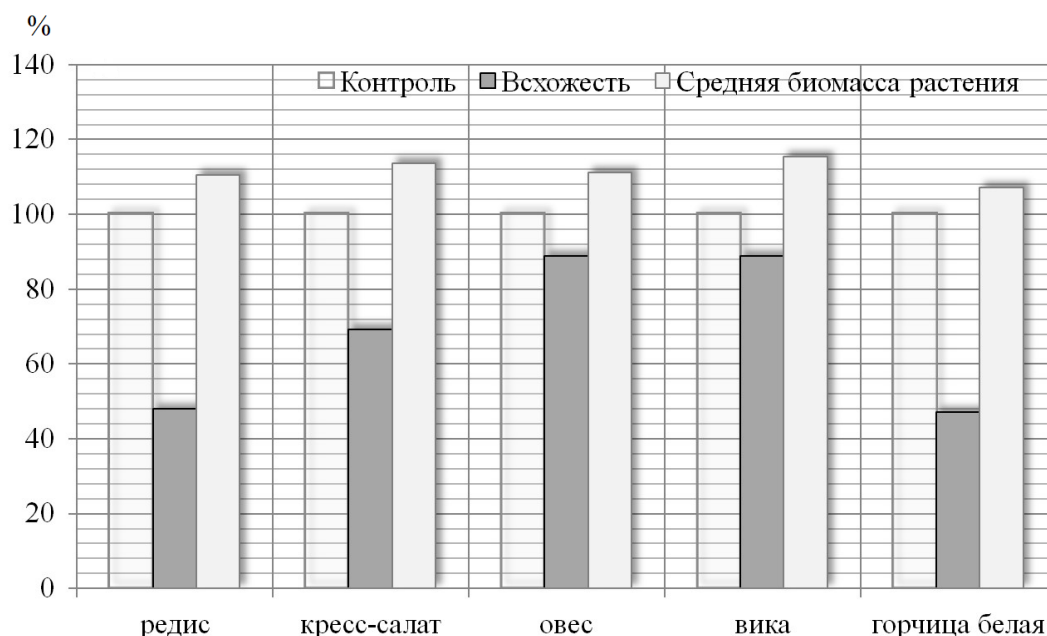


Рисунок 3 – Оценка изменения параметров тестовых растений на осадках сточных вод

Figure 3 – Evaluation of parameter changes in test plants on sewage water sludge

По окончании вегетационного опыта был проанализирован состав осадков (таблица 5).

Таблица 5 – Качественный состав осадков сточных вод после выращивания культур

Table 5 – Qualitative composition of sewage water sludge after growing crops

Показатель	Осадок сточных вод после выращивания		
	редиса	кресс-салата	сидератов (овес, вика, белая горчица)
Кальций (в. в.), г/100 г	0,493	0,550	0,157
Магний (в. в.), г/100 г	0,015	0,016	0,010
Калий (в. в.), г/100 г	0,017	0,015	0,006
Натрий (в. в.), г/100 г	0,002	0,001	0,001
Гидрокарбонаты (в. в.), г/100 г	0,039	0,051	0,037
Хлориды (в. в.), г/100 г	0,009	0,013	0,013
Сульфаты (в. в.), г/100 г	1,226	1,347	1,379
рН, ед. рН	6,35	6,41	7,36
Плотный остаток (в. в.), %	1,736	2,090	0,642
Фосфор (подвижная форма), мг/кг	128,7	158,6	132,2
Азот нитратов, мг/кг	133,0	131,0	128,0
Калий, мг/кг	435,6	410,4	374,4
Органическое вещество (гумус), %	10,2	7,7	16,8
Медь (кислоторастворимая форма), мг/кг	38,20	25,25	7,75
Свинец (кислоторастворимая форма), мг/кг	7,60	7,63	7,65
Кадмий (кислоторастворимая форма), мг/кг	0,29	0,34	0,17
Цинк (кислоторастворимая форма), мг/кг	33,75	31,70	33,70
Никель (кислоторастворимая форма), мг/кг	10,00	8,22	7,72
Медь (подвижная форма), мг/кг	2,04	2,56	0,54
Свинец (подвижная форма), мг/кг	0,54	0,72	0,86
Кадмий (подвижная форма), мг/кг	0,10	0,10	0,09
Цинк (подвижная форма), мг/кг	9,44	13,54	10,36
Никель (подвижная форма), мг/кг	0,86	0,72	0,50
Примечание – в. в. – водная вытяжка.			

Анализ полученных данных показал расходование органического вещества и питательных веществ во всех вариантах выращивания тест-растений за исключением смеси сидератов, благодаря которой на фоне расходования питательных веществ содержание органического вещества выросло практически в полтора раза с 11,48 до 16,8 % (рисунок 4).

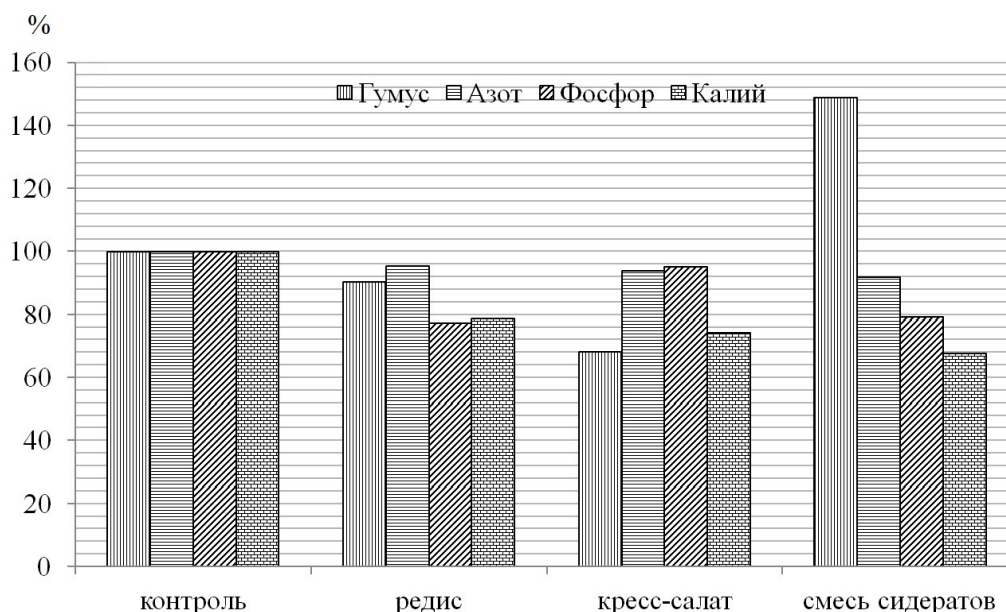


Рисунок 4 – Изменение количества основных питательных элементов и гумуса в осадках сточных вод после выращивания растений

Figure 4 – Changes in major nutrients and humus in sewage water sludge after plant cultivation

Повышение количества органического вещества в ОСВ при выращивании сидератов подтверждено серией из пяти вегетационных опытов, проведенных в 2022–2024 гг. с трехкратной повторностью.

Выводы. При посеве семян тест-растений непосредственно в ОСВ после месячного наблюдения за их ростом и развитием отмечено ингибирующее действие на всхожесть семян, но стимулирующее на прирост биомассы в пересчете на одно растение. Наибольший прирост биомассы на одно растение отмечен у кресс-салата, наименьший – у белой горчицы.

Анализ химического состава почв после выращивания растений показал увеличение содержания органического вещества (гумуса) в осадках сточных вод после выращивания смеси сидератов: содержание гумуса увеличилось на 49 % при оставлении в осадках только корневой системы растений. При этом содержание фосфора уменьшилось на 20 %, что лежит в пределах погрешности лабораторных измерений. Содержание азота после выращивания смеси сидератов уменьшилось незначительно – на 8 %.

Полученные данные указывают на возможность обогащения осадков

сточных вод органическим веществом посредством посева сидеральных трав, что можно осуществлять непосредственно на иловых картах. Данное мероприятие помимо увеличения содержания органического вещества в осадках сточных вод позволит уменьшить распространение сорной растительности на иловых картах за счет подавления их роста и предотвращения вызревания семян, что даст дополнительный эффект в улучшении качества осадков по агрономическим показателям.

Список источников

1. Валиев В. С., Иванов Д. В., Шагидуллин Р. Р. Способы утилизации осадков городских сточных вод (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 4(24). С. 52–63. DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034.
2. Агрохимические, санитарно-эпидемиологические и токсикологические исследования ОСВ и компостов очистных сооружений г. Москвы, устойчивость функционирования в агроэкосистемах / Е. П. Пахненко, Е. А. Гунина, Г. Е. Мерзлая, Н. В. Костина // Почвы в биосфере: сб. материалов Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 50-летию Ин-та почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, 10–14 сент. 2018 г. Т. 1, ч. 1. Томск: Нац. исслед. Томск. гос. ун-т. С. 359–363.
3. Тихонова И. О. Утилизация иловых осадков в экономике замкнутого цикла: опыт Германии // Экология производства. 2020. № 6. С. 74–77.
4. Мерзлая Г. Е., Афанасьев Р. А. Агрохимические аспекты использования осадков сточных вод для рекультивации земель различного назначения // Агрохимия. 2020. № 8. С. 70–77. DOI: 10.31857/S0002188120080050.
5. Опыт развития объектов водоотведения ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»: опыт перехода к наилучшим доступным технологиям / С. Н. Волков, О. Н. Рублевская, И. О. Тихонова, Т. В. Гусева, М. Иикканен // Водное хозяйство России. Научно-практический журнал. 2020. № 6. С. 104–120. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-6.
6. Yang G., Zhang G. M., Wang H. C. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China // Water Res. 2015. № 78. P. 60–73.
7. Дягелев М. Ю. Австрийский опыт удаления соединений фосфора из осадков сточных вод // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2022. № 3. С. 48–65. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.3.04
8. Recent advances in energy recovery from wastewater sludge / L. Nazari, S. Sarathy, D. Santoro, D. Ho, M. B. Ray, C. (Charles) Xu // Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications. Woodhead Publishing. 2018. P. 67–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101029-7.00011-4>.
9. Hall J. Session 3. Technology and innovative options related to sludge management [Electronic resource] // Proceedings of the Workshop on «Problems around Sludge», 18–19 November 1999, Stresa (Italy). P. 155–212. URL: https://wtp-operators.thewaternetwork.com/_/sludge-recovery-and-treatment/storage/document-LOYGsHaC3kXg_SbVvK5obKg/6ZftstktvGpPIW2yh9cxZg/file/workshoppart4.pdf (date of access: 21.10.2024).
10. Sewage sludge composting: quality assessment for agricultural application / A. H. Nafez, M. Nikaen, S. Kadkhodaie, M. Hatamzadeh, S. S. Moghim // Environmental Monitoring and Assessment. 2015. Vol. 187. P. 1–9. DOI: 10.1007/s10661-015-4940-5.
11. Comprehensive recycling of fresh municipal sewage sludge to fertilize garden plants and achieve low carbon emission: A pilot study / X. Lin, C. Chen, H. Li, L. Hei, L. Zeng, Z. Wei,

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2024. Т. 94, № 3. С. 33–50.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2024. Vol. 94, no. 3. P. 33–50.

Y. Chen, Q.-T. Wu // Front. Environ. Sci. 2022. Vol. 10. 1023356. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1023356.

12. Манжина С. А. Российские и зарубежные практики обращения с осадком сточных вод // Экология и водное хозяйство. 2023. Т. 5, № 1. С. 15–31. DOI: 10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31. EDN: XSGMHE.

13. Межевова А. С., Беляев А. И. Нетрадиционные элементы технологии возделывания сельскохозяйственных культур с использованием удобрений-мелиорантов // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17, № 3. С. 187–196. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-3-187-196.

14. Касатиков В. А. Использование осадков городских сточных вод // Агрохимический вестник. 2013. № 4. С. 44–46.

15. Дрозд Г. Я., Бреус Р. В. Решение проблем утилизации городских отходов водоочистки // Коммунальное хозяйство городов. 2005. № 63. С. 130–136.

16. Арефьев А. Н., Кузин Е. Н., Ильина Г. В. Последствие осадков сточных вод г. Пензы и природного цеолита на урожайность и качество растениеводческой продукции // Нива Поволжья. 2020. № 1(54). С. 61–66. DOI: 10.36461/NP.2020.54.1.010. EDN: CSIFUK.

17. Васбиева М. Т., Зиновьев Д. С. Эффективность применения осадков сточных вод на дерново-подзолистой почве Предуралья // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2013. № 5(36). С. 37–42.

18. Химический состав осадков сточных вод г. Чебоксары и влияние их на накопление тяжелых металлов в почве / О. А. Васильев, Л. Н. Михайлов, Н. А. Кириллов, Н. А. Фадеева // Сб. науч. тр. междунар. науч.-практ. конф., г. Чебоксары, 29–30 марта 2004 г. / ЧГУ им. И. Н. Ульянова. Чебоксары, 2004. С. 518–521.

19. Кусакина Н. А., Чемерис М. С. Экологическая эффективность действия осадков сточных вод при возделывании рапса ярового // Мир науки, культуры, образования. 2012. № 2(33). С. 342–343.

20. Куликова А. Х., Захаров Н. Г., Починова Т. В. Применение осадков сточных вод в качестве удобрения в сельском хозяйстве Ульяновской области // Агрохимический вестник. 2010. № 5. С. 32–35.

21. Агроландшафт рекультивированного полигона твердых коммунальных отходов с использованием осадка сточных вод / А. В. Тиньгаев, Ю. В. Чепрунова, Р. П. Воробьева, В. Б. Шепталов // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 2. С. 7–11. DOI: 10.32962/0235-2524-2023-2-7-11. EDN: FKKAU.

22. Чепурнова Е. В., Тиньгаев А. В. Система поддержки принятия решений по использованию органических отходов в качестве удобрений для повышения плодородия малопродуктивных и деградированных почв // Мелиорация земель в решении геоэкологических проблем Евразии [Электронный ресурс]: материалы Междунар. науч.-практ. конф., г. Москва, 14–15 дек. 2024 г. М.: ФНЦ ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова, 2024. С. 444–448. URL: https://www.vniigim.ru/2024/03/27/sbornik_vniigim_2023.

23. Чулков В. А., Чапалда Т. Л. Оценка влияния сидератов на биологические свойства чернозема оподзоленного в звене полевого севооборота // Аграрный вестник Урала. 2021. № 04(207). С. 55–63. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-55-63.

24. Монастырский В. А., Бабичев А. Н. Рост, развитие сидеральных культур и их влияние на агрохимические свойства орошаемых черноземов Ростовской области // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2013. № 2(10). С. 21–31.

References

1. Valiev V.S., Ivanov D.V., Shagidullin R.R., 2020. *Sposoby utilizatsii osadkov gorodskikh stochnykh vod (obzor)* [Methods for urban wastewater sludge disposal (review)].

Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian Journal of Applied Ecology], no. 4(24), pp. 52–63, DOI: 10.24411/2411-7374-2020-10034. (In Russian).

2. Pakhnenko E.P., Gunina E.A., Merzlaya G.E., Kostina N.V., 2018. *Agrokhimicheskie, sanitarno-epidemiologicheskie i toksikologicheskie issledovaniya OSV i kompostov ochistnykh sooruzheniy g. Moskvy, ustoychivost' funktsionirovaniya v agroekosistemakh* [Agrochemical, sanitary-epidemiological and toxicological studies of wastewater sludge and composts from Moscow treatment facilities, sustainability of functioning in agroecosystems]. *Pochvy v biosfere: sb. materialov Vseros. nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashch. 50-letiyu Instituta pochvovedeniya i agrokhimii SO RAN* [Soils in the Biosphere: Proc. of the All-Russian Scientific Conference with International Participation, Dedicated to the 50th Anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS], vol. 1, pt. 1, Tomsk, National Research Tomsk State University, pp. 359–363. (In Russian).

3. Tikhonova I.O., 2020. *Utilizatsiya ilovykh osadkov v ekonomike zamknutogo tsikla: opyt Germanii* [Sludge utilization in a closed-loop economy: The German experience]. *Ekologiya proizvodstva* [Production Ecology], no. 6, pp. 74–77. (In Russian).

4. Merzlaya G.E., Afanasyev R.A., 2020. *Agrokhimicheskie aspekty ispol'zovaniya osadkov stochnykh vod dlya rekul'tivatsii zemel' razlichnogo naznacheniya* [Agrochemical aspects of sewage sludge use for land reclamation for various purposes]. *Agrokhiimiya* [Agrochemistry], no. 8, pp. 70–77, DOI: 10.31857/S0002188120080050. (In Russian).

5. Volkov S.N., Rublevskaya O.N., Tikhonova I.O., Guseva T.V., Iikkanen M., 2020. *Opyt razvitiya ob"ektov vodootvedeniya GUP «Vodokanal Sankt-Peterburga»: opyt perekhoda k nailuchshim dostupnym tekhnologiyam* [«St. Petersburg Vodokanal» experience in developing water disposal facilities as the steps towards transition to the best available techniques]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii. Nauchno-prakticheskiy zhurnal* [Water Sector of Russia. Scientific and Practical Journal], no. 6, pp. 104–120, DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-6. (In Russian).

6. Yang G., Zhang G.M., Wang H.C., 2015. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. *Water Res.*, no. 78, pp. 60–73.

7. Dyagelev M.Yu., 2022. *Avstriyskiy opyt udaleniya soedineniy fosfora iz osadkov stochnykh vod* [Austrian experience of removing phosphorus compounds from digested sewage sludge]. *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika* [Bulletin of PNIPU. Applied Ecology. Urban Studies], no. 3, pp. 48–65, DOI: 10.15593/2409-5125/2022.3.04 (In Russian).

8. Nazari L., Sarathy S., Santoro D., Ho D., Ray M.B., Xu C. (Charles), 2018. Recent advances in energy recovery from wastewater sludge. Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications. Woodhead Publishing, pp. 67–100, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101029-7.00011-4>.

9. Hall J., 1999. Session 3. Technology and innovative options related to sludge management. Proceedings of the Workshop on «Problems around Sludge». 18–19 Nov., Stresa, Italy, pp. 155–212, available: https://wtp-operators.thewaternetwork.com/_/sludge-recovery-and-treatment/storage/document-LOYGsHaC3kXg_SbVk5obKg/6ZftstktvGPpIW2yh9cxZg/file/workshoppart4.pdf [accessed 21.10.2024].

10. Nafez A.H., Nikaeen M., Kadkhodaie S., Hatamzadeh M., Moghim S.S., 2015. Sewage sludge composting: quality assessment for agricultural application. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 187, pp. 1–9, DOI: 10.1007/s10661-015-4940-5.

11. Lin X., Chen C., Li H., Hei L., Zeng L., Wei Z., Chen Y., Wu Q.-T., 2022. Comprehensive recycling of fresh municipal sewage sludge to fertilize garden plants and achieve low carbon emission: A pilot study. *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, 1023356, DOI: 10.3389/fenvs.2022.1023356.

12. Manzhina S.A., 2023. *Rossiyskie i zarubezhnye praktiki obrashcheniya s osadkom stochnykh vod* [Russian and foreign practices of sewage sludge management]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo* [Ecology and Water Management], vol. 5, no. 1, pp. 15–31, DOI: 10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31, EDN: XSGMHE. (In Russian).

13. Mezheva A.S., Belyaev A.I., 2022. *Netraditsionnye elementy tekhnologii vozdel'nyaya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur s ispol'zovaniem udobreniy-meliorantov* [Non-traditional elements of crop cultivation technology using ameliorant fertilizers]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye* [South of Russia: Ecology, Development], vol. 17, no. 3, pp. 187-196, DOI: 10.18470/1992-1098-2022-3-187-196. (In Russian).

14. Kasatkov V.A., 2013. *Ispol'zovanie osadkov gorodskikh stochnykh vod* [Use of urban sewage sludge]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 4, pp. 44-46. (In Russian).

15. Drozd G.Ya., Breus R.V., 2005. *Reshenie problem utilizatsii gorodskikh otkhodov vodoочистки* [Solving the problems of recycling urban wastewater treatment]. *Kommunal'noe khozyaystvo gorodov* [Communal Services of Cities], no. 63, pp. 130-136. (In Russian).

16. Arefyev A.N., Kuzin E.N., Ilyina G.V., 2020. *Posledestvie osadkov stochnykh vod g. Penzy i prirodnogo tseolita na urozhaynost' i kachestvo rastenievodcheskoy produktsii* [Consequence of sediments of sewage water of the city of Penza and natural zeolites on yield and quality of plant products]. *Niva Povolzh'ya* [Volga Region Farmland], no. 1(54), pp. 61-66, DOI: 10.36461/NP.2020.54.1.010, EDN: CSIFUK. (In Russian).

17. Vasbieva M.T., Zinoviev D.S., 2013. *Effektivnost' primeneniya osadkov stochnykh vod na dernovo-podzolistoy pochve Predural'ya* [Efficiency of using sewage sludge on sod-podzolic soil of the Cis-Urals]. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* [Agricultural Science of the Euro-North-East], no. 5(36), pp. 37-42. (In Russian).

18. Vasiliev O.A., Mikhailov L.N., Kirillov N.A., Fadeeva N.A., 2004. *Khimicheskiy sostav osadkov stochnykh vod g. Cheboksary i vliyaniye ikh na nakopleniye tyazhelykh metallov v pochve* [Chemical composition of sewage sludge in the city of Cheboksary and their influence on the accumulation of heavy metals in soil]. *Sb. nauch. trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Coll. of Sci. Works of the International Scientific-Practical Conference]. Cheboksary State University named after I. N. Ulyanova, Cheboksary, pp. 518-521. (In Russian).

19. Kusakina N.A., Chemeris M.S., 2012. *Ekologicheskaya effektivnost' deystviya osadkov stochnykh vod pri vozdel'nyanii rapsa yarovogo* [Ecological efficiency of sewage sludge during the cultivation of spring rape]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya* [World of Science, Culture, Education], no. 2(33), pp. 342-343. (In Russian).

20. Kulikova A.Kh., Zakharov N.G., Pochinova T.V., 2010. *Primeneniye osadkov stochnykh vod v kachestve udobreniya v sel'skom khozyaystve Ul'yanovskoy oblasti* [Application of sewage sludge as a fertilizer for agriculture in Ulyanovsk region]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 5, pp. 32-35. (In Russian).

21. Tingaev A.V., Cheprunova Yu.V., Vorobyova R.P., Sheptalov V.B., 2023. *Agrolandshaft rekul'tivirovannogo poligona tverdykh kommunal'nykh otkhodov s ispol'zovaniem osadka stochnykh vod* [Agrolandscape of recultivated landfill of municipal solid waste using sewage sludge]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land Reclamation and Water Management], no. 2, pp. 7-11, DOI: 10.32962/0235-2524-2023-2-7-11, EDN: FKKAKU. (In Russian).

22. Chepurnova E.V., Tingaev A.V., 2024. *Sistema podderzhki prinyatiya resheniy po ispol'zovaniyu organicheskikh otkhodov v kachestve udobreniy dlya povysheniya plodorodiya maloproduktivnykh i degradirovannykh pochv* [Decision support system for the use of organic waste as fertilizers to increase the fertility of low-productivity and degraded soils]. *Melioratsiya zemel' v reshenii geoekologicheskikh problem Yevrazii: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konf.* [Land Reclamation in Solving Geoecological Problems of Eurasia: Proc. of the International Scientific-Practical Conference]. Moscow, FNC VNIIGiM named after A. N. Kostyakov, pp. 444-448, available: https://www.vniigim.ru/2024/03/27/sbornik_vniigim_2023. (In Russian).

23. Chulkov V.A., Chapalda T.L., 2021. *Otsenka vliyaniya sideratov na biologicheskie svoystva chernozema opodzolennogo v zvene polevogo sevooborota* [Assessment of the influ-

ence of siderates on the biological properties of podzolized chernozem in the field crop rotation link]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], no. 04(207), pp. 55-63, DOI: 10.32417/1997-4868-2021-207-04-55-63. (In Russian).

24. Monastyrsky V.A., Babichev A.N., 2013. *Rost, razvitie sideal'nykh kul'tur i ikh vliyanie na agrokhimicheskie svoystva oroshaemykh chernozemov Rostovskoy oblasti* [Growth and development of green manure crops and their influence on agrochemical properties of irrigated chernozems in Rostov region]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 2(10), pp. 21-31. (In Russian).

Информация об авторах

С. А. Манжина – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, доцент, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, manz.svetlana@yandex.ru, AuthorID: 861972, ORCID ID: 0000-0001-9322-0843;

Л. И. Русин – аспирант, Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, leva19111@icloud.com, AuthorID: 1204138, ORCID ID: 0009-0007-8802-4726.

Information about the authors

S. A. Manzhina – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, manz.svetlana@yandex.ru, AuthorID: 861972, ORCID ID: 0000-0001-9322-0843;

L. I. Rusin – Postgraduate Student, Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, leva19111@icloud.com, AuthorID: 1204138, ORCID ID: 0009-0007-8802-4726.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

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

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.09.2024; одобрена после рецензирования 17.10.2024; принята к публикации 18.11.2024.

The article was submitted 12.09.2024; approved after reviewing 17.10.2024; accepted for publication 18.11.2024.