

УДК 550.4.02:627.157
DOI: 10.7868/S25000640240409

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В КАЧЕСТВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО УДОБРЕНИЯ

© 2024 г. О.В. Степаньян¹, Е.И. Рыбалкина², О.А. Хорошев¹, К.Ш. Казеев²,
Г.В. Нестерук¹, А.В. Клещенков¹, В.В. Польшин¹, В.С. Герасюк¹

Аннотация. Исследована перспективность использования донного ила одного из крупнейших по площади водного зеркала и по объему наполнения искусственных водоемов степной зоны юга России для восстановления плодородия почв засушливых восточных и северо-восточных районов Ростовской области. Согласно проведенным в августе 2023 г. исследованиям в донных отложениях Цимлянского водохранилища содержание органического углерода варьировало от 0,54 до 3,07 % при нейтральной и слабощелочной реакции среды. В целом выявлено отсутствие химического загрязнения, кроме зафиксированного в границах одной станции превышения предельно допустимых концентраций цинка и незначительного превышения предельно допустимых концентраций марганца. Однако все пробы соответствуют техническим требованиям для применения ила в качестве удобрения, за исключением единичного превышения содержания марганца и единичных случаев недостаточных уровней содержания фосфора и органического вещества. В состав изученных образцов наибольший вклад вносят полиароматические углеводороды (ПАУ) фенантрен (42 %), флуорен (23 %), бифенил (19 %). Содержание остальных ПАУ изменчиво, но не достигает подобных высоких значений. Преобладающим токсичным веществом является бензапирен, по содержанию которого все изученные пробы соответствуют санитарно-гигиеническим нормам. Донные отложения Цимлянского водохранилища отвечают техническим требованиям для использования их в качестве органических удобрений. Результаты проведенного исследования подтвердили возможность применения донных отложений Цимлянского водохранилища для повышения плодородия почв, особенно малопродуктивных и деградированных.

Ключевые слова: донные отложения, органическое удобрение, восстановление плодородия почв, Цимлянское водохранилище, безопасность донного ила.

USE OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE TSIMLYANSK RESERVOIR AS ORGANIC FERTILIZER

O.V. Stepanyan¹, E.I. Rybalkina², O.A. Khoroshev¹, K.Sh. Kazeev²,
G.V. Nesteruk¹, A.V. Kleshchenkov¹, V.V. Polshin¹, V.S. Gerasyuk¹

Abstract. The potential of using bottom silt from one of the biggest water table and the most stocked artificial reservoirs in the steppe zone of southern Russia for purposes of Rostov Region eastern and northeastern arid cite soil fertility restoring has been studied. According to studies conducted in August 2023, the organic carbon content in the bottom sediments of the Tsimlyansk Reservoir varied from 0,54 to 3,07% with a neutral and slightly alkaline reaction of the environment. In general, there was no chemical contamination, except for

¹ Федеральное исследовательское учреждение Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: step@ssc-ras.ru

² Академия биологии и биотехнологии имени Д.И. Иванова Южного федерального университета (Academy of Biology and Biotechnology of Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1

the exceeded maximum permissible concentration of zinc recorded within one station, and a slight excess for manganese. However, all the samples correspond to the technical requirements for their use as fertilizers, and the exception is a single exceeded manganese content and sporadic cases of low phosphorus and organic matter levels. It was found that in total, low molecular weight PAHs phenanthrene (42%), fluorene (23%), biphenyl (19%) – make the greatest contribution to the individual score in the composition of the studied samples. The content of the remaining PAHs is variable, but does not reach such high values. The predominant toxic substance is benzapyrene, the content of which in all the studied samples comply with sanitary and hygienic standards. The bottom sediments of the Tsimlyansk Reservoir meet the technical requirements for their use as organic fertilizers. The results of the study confirmed the possibility of using bottom sediments of the Tsimlyansk Reservoir to increase soil fertility, especially unproductive and degraded ones.

Keywords: bottom sediments, organic fertilizer, restoration of soil fertility, Tsimlyansk Reservoir, safety of bottom silt.

ВВЕДЕНИЕ

Цимлянское водохранилище является одним из крупнейших искусственных водоемов на юге России, в котором с начала 1960-х гг. стали отмечаться негативные процессы, связанные с размывом и абразией берегов [1]. Попадание в результате поверхностного смыва в акваторию водохранилища значительного объема почвенного органического и минерального вещества привело к обмелению акватории, заилению судоходного канала, «цветению» воды, заморам в летний и зимний периоды [2; 3].

Изменение климатических показателей в сторону аридизации и нерациональное землепользование влияют на процесс уменьшения продуктивности почв Ростовской области. Согласно исследованиям О.С. Безугловой и др. [4] агроистощение, а также высокая эрозионная опасность рельефа региона позволяют оценить его как территорию с риском потенциального опустынивания. Отмечается также, что наименее благоприятные условия для земледелия сложились в восточной зоне области, где фиксируется дефицит увлажнения территории, а агроэкосистемы относятся к классу крайне неустойчивых [5]. Одним из путей решения проблемы деградации почв является применение почвенных мелиорантов, в том числе органических удобрений [6; 7], в качестве которых возможно использование илов и сапропелей [7]. Донные отложения представляют ценное удобрение для овощных, зерновых, плодово-ягодных, цветочных, кормовых культур и по своим удобрительным свойствам не уступают навозу [8].

Для восстановления плодородия почв наиболее засушливых – восточных и северо-восточных – районов Ростовской области может быть перспектив-

ным использование донного ила Цимлянского водохранилища, за время функционирования которого на его дно оседало в среднем около 15,8 млн м³ ила в год [9; 10]. Локальное извлечение иловых отложений с дальнейшей их переработкой и использованием для нужд земледелия одновременно решает актуальную задачу расчистки дна водохранилища для поддержания устойчивости его эксплуатации. Как отмечают в своей работе С.П. Стрелков и др. [11], изымаемый со дна пресных водоемов грунт может быть использован для обеспечения муниципальных нужд или в интересах физических и юридических лиц при условии, что он не содержит твердых полезных ископаемых, не относящихся к общераспространенным полезным ископаемым. В то же время в связи со способностью донных отложений аккумулировать загрязняющие вещества и неравномерностью их распределения по дну водоема необходима оценка мощности залегания, физико-химического состава и показателей безопасности илов. В свете этого целью представленного исследования является изучение вопросов целесообразности и лимитирующих факторов использования донных отложений Цимлянского водохранилища в качестве органического удобрения с учетом их свойств и показателей безопасности.

Изучением возможностей использования донных отложений пресных водоемов в сельском хозяйстве занимались многие отечественные и зарубежные исследователи. Результаты экспериментов с применением в качестве органических удобрений илов и сапропелей, изъятых со дна пресных водохранилищ, прудов и рек, представлены в работах [6; 8; 10; 12]. Вопросы о свойствах и объемах образования донных отложений Цимлянского водохранилища, о переработке ила и использовании его в сельском хозяйстве освещались в исследо-

Таблица 1. Норма для органо-глинистого сапропеля по элементному составу для отнесения его к первому или второму классу пригодности в качестве органических удобрений**Table 1.** Standard elemental content for organo-clay sapropel to classify it as the first or second class of suitability as organic fertilizer

Химическое вещество Chemical substance	Норма по содержанию макро- и микроэлементов на сухое вещество Norm of macro- and microelemental content upon dry weight	
	1-го класса пригодности 1 st class of suitability	2-го класса пригодности 2 nd class of suitability
	Микроэлементы и железо (мг/кг), не более Microelements (mg/kg), not more than	
Cd	3	3–9
Zn	300	300–600
Pb	50	50–150
Cu	100	100–300
Hg	1,0	1–6
Mn	500	500–1500
Ni	50	50–200
Cr ³⁺	100	100–260
Co	20	20–60
Mo	20	20–200
Fe ₂ O ₃	200	
	Макроэлементы (%), не менее Macroelements (%), not less than	
P ₂ O ₅		0,3
CaO		0,1
K ₂ O		0,3

ваниях [9; 10; 13]. Оценке возможностей и эффективности применения донных отложений водохранилищ и рек в сельском хозяйстве посвящены работы [14; 15], а изучению химических свойств и особенностей переработки сапропелей из эвтрофизированных мелководных озер – статья [16]. Ранее было исследовано влияние донных отложений на эмиссию CO₂ в песчаных почвах Ростовской области [17]. Установлено, что их внесение в качестве удобрения положительно влияет на биологическую активность почвы. Использование сапропеля даже в высоких дозах не подавляет начальный рост и развитие семян [18].

Содержание загрязняющих веществ является основным критерием при оценке возможности использования донных отложений в качестве почвенных мелиорантов. Пригодность сапропели для применения в сельском хозяйстве определяется в соответствии с требованиями [19]. В зависимости от содержания тяжелых металлов выделяют сапропели первого и второго классов пригодности в качестве органических удобрений (табл. 1).

Как известно, полициклические углеводороды представляют собой органические соединения, характеризующиеся наличием двух или более кон-

денсированных бензольных колец в химической структуре [20]. В природе полиароматические углеводороды (ПАУ) образуются в процессе пиролиза целлюлозы и встречаются в угольных пластах, а также как продукт неполного сгорания при лесных пожарах. Основными источниками поступления техногенных ПАУ в окружающую среду являются предприятия энергетического комплекса, автомобильный транспорт, химическая и нефтеперерабатывающая промышленность. В России предельно допустимые концентрации (ПДК) установлены только для бенз(а)пирена и составляют не более 0,005 мкг/л в воде [21] и 0,02 мг/кг в почвах [22]. Поступление ПАУ в организм может происходить через пищу, наружный воздух и питьевую воду [23]. Содержание ПАУ в растениях зависит от их способности сорбировать эти соединения из воздуха и накапливать в листьях.

Согласно рекомендациям [19] сапропели первого класса пригодности применяются под все виды сельхозкультур в дозах, рекомендованных с учетом вида культуры, плодородия каждого отдельного поля. Сапропели второго класса применяются в качестве удобрения под сельхозкультуры, в цветоводстве, в лесном, городском хозяйствах в

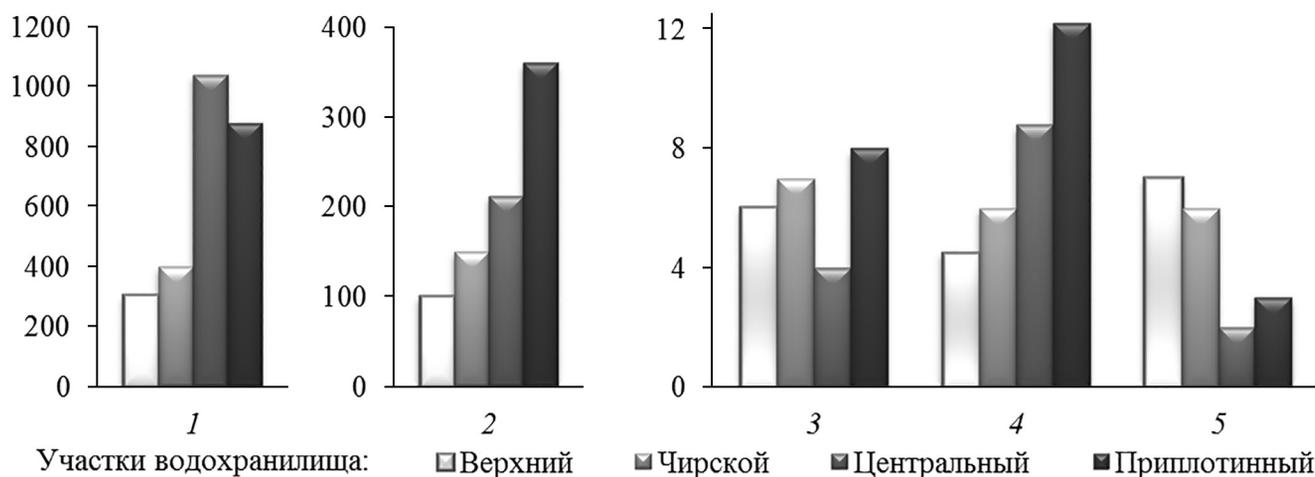


Рис. 1. Характеристики заиления Цимлянского водохранилища (составлено по работе [27]): 1 – площадь участков, км², 2 – объем донных отложений, млн м³, 3 – средняя скорость заиления, 10⁻³ м³ ила/м² × год, 4 – средняя глубина участка, м, 5 – степень заполнения участка донными отложениями, %.

Fig. 1. Characteristics of the Tsimlyansk Reservoir siltation (according to [27]): 1 – plot areas, km², 2 – amount of bottom sediments, mil. m³, 3 – average siltation velocity, 10⁻³ m³ silt/m² per year, 4 – average plot depth, m, 5 – degree of plot bottom sediment siltation, %.

дозах, не превышающих 20 т/га в пересчете на сухое вещество. По физико-химическим показателям и безопасности сапропели должны соответствовать нормам ГОСТ 12.1.007-76 [24], в частности относиться к малоопасным веществам 4-го класса опасности, а по токсикологическим и радиологическим характеристикам должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 53218-2008 и ГОСТ Р 53398-2009 [25; 26]. Кроме того, согласно [19] сапропели по степени биологического загрязнения должны соответствовать категории «чистая почва», а индекс санитарно-показательных микроорганизмов должен составлять не более 1–9 кл./г.

Донные отложения Цимлянского водохранилища формируются из продуктов абразии и речных наносов [27]. Приведенные на рисунке 1 характеристики заиления участков данного водоема свидетельствуют о различиях как в скоростях заиления, так и в степени заполнения отдельных участков. Также отмечается, что для поддержания устойчивости эксплуатации водоема необходимо осуществлять локальную очистку его дна, которую, в первую очередь, необходимо проводить на приплотинном участке, где наблюдается заиление части полезного объема Цимлянского водохранилища [27].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для изучения химического состава донных отложений в августе 2023 г. в Цимлянском водохра-

нилище (станции 1–9), а также на двух станциях, расположенных на р. Аксай и р. Дон, специалистами Южного научного центра Российской академии наук (Ростов-на-Дону, Россия) были отобраны пробы донных отложений с использованием дночерпателя Петерсена и переданы во влажном виде в аналитическую лабораторию Южного федерального университета (Ростов-на-Дону, Россия). Валовое содержание химических веществ определяли в сухих образцах рентгенофлуоресцентным методом на рентгеновском приборе «Спектроскан МАКС-GV» [28]. Извлечение ПАУ из проб донных отложений осуществляли с помощью гексана. Липидную фракцию осадков предварительно удаляли путем трехчасового кипячения пробы с обратным холодильником в 2%-м спиртовом растворе гидроксида калия. Определение количественного содержания ПАУ в экстракте проводили с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии с обращенно-фазной колонкой на агрегатном оборудовании Agilent 1260 [29]. Опыт проводили в соответствии с методическими указаниями [30]. Содержание органического углерода определяли методом по окисляемости бихроматом калия [31].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты химического анализа проб донных отложений Цимлянского водохранилища, Дона и Аксая представлены в таблицах 2–4. Согласно проведенным исследованиям содер-

Таблица 2. Валовые содержания макроэлементов и органического углерода в донных отложениях Цимлянского водохранилища, рек Дон и Аксай, %**Table 2.** Total elemental and organic carbon contents in bottom sediments of Tsimlyansk Reservoir, Don and Aksay rivers, %

Станция Station	C _{орг.} C _{org.}	Химическое вещество Chemical substance								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
1	не определено not defined	31,2	8,5	3,4	26,5	1,6	1,4	1,4	0,45	0,53
2	2,47	44,4	10,4	4,8	15,9	1,7	1,0	1,7	0,55	0,35
3	2,69	43,1	9,0	4,3	14,2	1,5	1,5	1,6	0,57	0,30
4	3,07	43,6	9,5	4,4	14,7	1,6	1,3	1,8	0,59	0,26
5	1,36	68,5	3,4	1,3	8,9	0,5	1,1	0,8	0,25	0,22
6	не определено not defined	86,4	1,2	0,6	1,4	0,3	0,6	0,4	0,10	0,05
7	1,46	56,7	9,7	4,3	9,7	1,3	0,9	1,7	0,60	0,40
8	1,63	49,2	11,9	5,1	11,9	1,9	0,9	1,8	0,68	0,23
9	0,54	57,8	5,9	2,0	11,2	1,0	1,2	1,1	0,43	0,18

Таблица 3. Валовые содержания микроэлементов в донных отложениях Цимлянского водохранилища и р. Дон, мг/кг**Table 3.** Total microelemental contents in bottom sediments of Tsimlyansk Reservoir and the Don River, mg/kg

Станция Station	Элемент Element									
	MnO	Sr	Zn	Cr	V	Ni	Cu	Co	Pb	As
1	2653,1	715,5	51,8	74,6	71,4	36,0	31,4	15,3	–	5,0
2	2090,2	408,1	59,8	94,7	90,1	43,0	34,3	19,7	–	6,6
3	960,5	318,0	110,9	112,1	89,7	44,4	32,1	17,6	0,5	6,9
4	836,5	408,7	57,5	104,7	103,3	54,4	44,9	15,5	5,7	6,8
5	211,5	311,5	409,9	30,4	22,8	29,7	29,5	–	26,3	6,7
6	172,6	41,1	25,0	4,5	0,6	6,0	1,0	–	1,6	2,8
7	1943,8	249,5	48,8	86,0	62,7	32,9	23,3	12,6	–	6,6
8	1695,4	295,5	60,2	98,1	97,1	46,9	36,4	20,2	–	7,8
9	531,4	178,4	35,4	43,6	1,7	20,1	13,7	–	7,4	4,6

жание органического углерода в пробах донных отложений варьирует от 0,54 до 3,07 %, реакция среды нейтральная и слабощелочная. По содержанию железа (не более 200 мг/кг, или 20 %) и кальция (не менее 0,1 % в пересчете на CaO) условию ГОСТ Р 54000-2010 [19] соответствуют все пробы. Подобная картина наблюдается и по калию. Однако в случае с валовым фосфором пробы 6 и 9 не удовлетворяют нормативу, так как содержание в них P₂O₅ (0,05 и 0,18 % соответственно) низкое, как и содержание органического вещества, при облегченном (песчаном) гранулометрическом составе с высокой долей силикатной фракции SiO₂ (табл. 1).

Использование проб 4, 5 и 8 условно возможно, так как они содержат количество P₂O₅, близкое к минимально требуемым уровням (0,22–0,26 %).

Согласно санитарно-гигиеническим нормативам содержания химических веществ в почвах [22] в пробе 5 отмечено четырехкратное превышение ПДК цинка, что может быть связано с высокой антропогенной нагрузкой на экосистему водоема. Однако документ [19] при данном уровне цинка нормирует сапропель как удобрение второго класса пригодности. Предельно допустимая концентрация марганца в почвах составляет 1500 мг/кг. Превышение ПДК в 1,5–1,8 раза

Таблица 4. Концентрации загрязняющих веществ в донных отложениях Цимлянского водохранилища и р. Дон, нг/г
Table 4. Concentrations of pollutants in bottom sediments of the Tsimlyansk Reservoir and the Don River, ng/g

Станция Station	Фенантрен Phenanthrene	Бифенил Biphenyl	Флуорен Fluorene	Пирен Pyrene	Бенз(г,х,и)перилен Benz(g,h,i)perylene	Бенз(б)флуорантен Benz(b)fluoranthene	Флуорантен Fluoranthene	Нафталин Naphthalene	Бенз(а)пирен* Benzo(a)pyrene*	Бенз(к)флуорантен Benz(k)fluoranthene	Антрацен Anthracene	Бенз(а)антрацен Benzo(a)anthracene	Дибенз(а,х)антрацен Dibenzo(a,h)anthracene	Сумма ПАУ Sum of PAH
2	470	323	278	47	27	58	19	10	15 (0,7)	9	10	5	3	1272,7
3	505	124	280	53	38	38	29	1	21 (1,0)	12	11	7	2	1120,0
4	486	274	272	47	35	29	27	4	13 (0,6)	10	10	6	2	1215,4
5	506	63	274	37	25	5	7	1	10 (0,5)	10	10	3	2	953,4
6	503	234	280	30	21	2	10	16	2 (0,1)	7	10	2	3	1119,1
7	516	445	315	55	26	36	16	74	11 (0,6)	11	10	5	2	1522,9
8	466	135	257	36	24	7	12	2	9 (0,4)	10	8	4	2	973,2

Примечание. * – ПДК бенз(а)пирена в почве – 20 нг/г, в скобках – концентрация в долях ПДК.
Note. * – MPC of Benzo(a)pyrene in soils – 20 ng/g, in brackets – concentration in MPC shares.

зафиксировано в пробах 1, 2 и 7, что, предположительно, связано с гранулометрическим составом грунтов; из них проба 1 выходит за пределы требований ГОСТ Р 54000-2010 [19], а пробы 2 и 7 относятся ко второму классу пригодности. Также во всех пробах наблюдается превышение ПДКАс, однако в документе [19] нет требований по допустимым концентрациям данного элемента в донных отложениях с точки зрения их пригодности в качестве органических удобрений. В остальных случаях содержание тяжелых металлов не превышает ПДК.

Проба 1 отличается содержанием Mn выше требуемого уровня (табл. 1), по остальным нормируемым микроэлементам (Cr, Ni, Cu, Co, Pb) все пробы соответствуют нормативу [19].

Было выявлено, что в состав изученных образцов наибольший вклад вносят низкомолекулярные ПАУ – фенантрен (42 %), флуорен (23 %), бифенил (19 %). Содержание остальных ПАУ изменчиво, но не достигает подобных высоких значений. Преобладающим токсичным веществом является бенз(а)пирен, по содержанию которого все изученные пробы соответствуют санитарно-гигиеническим нормам. Таким образом, большинство представленных образцов донных отложений можно использовать в качестве органического удобрения, так как они соответствуют санитарно-гигиеническим нормам. Однако некоторые пробы отличаются от норм по содержанию элементов (образцы 6 и 9 обеднены фосфором и

органическим веществом, а проба 1 содержит повышенное количество Mn), что вызывает вопрос о целесообразности их использования в качестве мелиоранта. Поэтому из представленных проб в качестве удобрения можно использовать практически все, однако приоритетными являются образцы с наибольшим количеством органического вещества и фосфора.

В целом как по основным физико-химическим свойствам, так и по уровням содержания веществ, которые считают потенциально опасными, донные отложения Цимлянского водохранилища соответствуют вышеназванным установленным нормативам и могут быть использованы для повышения плодородия почв, особенно малопродуктивных и деградированных. Такие почвы широко распространены на юге России и при сельскохозяйственном использовании нуждаются в мелиорации и применении удобрений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность А.Ю. Московцу за помощь в отборе проб донных отложений, капитану В.И. Ткаченко и команде научно-исследовательского судна «Денеб» за помощь в проведении исследований. Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН (№ 122011900153-9, № 122103100027-3, № 122020100352-6). Полевые исследования проведены с использованием оборудования ЦКП ЮНЦ РАН № 501994.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Савельева О.С., Слюнина Е.Ю. 2019. *Цимлянская плотина: последний аккорд расказачивания на Дону*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 216 с.
2. Гаргопа Ю.М., Панов В.Д., Лурье П.М., Алёшина Е.Г., Алёшина Н.В., Филатова Т.Б. 2011. Современный гидролого-гидрохимический режим Цимлянского водохранилища. В кн.: *Цимлянское водохранилище: состояние водных и прибрежных экосистем, проблемы и пути решения*. Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 14–29.
3. Матишов Г.Г., Степаньян О.В., Харьковский В.М., Старцев А.В., Булышева Н.И., Семин В.В., Соьер В.Г., Кренёва К.В., Глушенко Г.Ю., Свистунова Л.Д. 2016. Особенности водной экосистемы Нижнего Дона в позднесенний период. *Водные ресурсы*. 43(6): 620–632. doi: 10.7868/S0321059616060043
4. Безуглова О.С., Назаренко О.Г., Ильинская И.Н. 2020. Динамика деградации земель в Ростовской области. *Аридные экосистемы*. 26(2(83)): 10–15. doi: 10.24411/1993-3916-2020-10090
5. Безуглова О.С., Ильинская И.Н., Закруткин В.Е., Назаренко О.Г., Литвинов Ю.А., Гаевая Э.А., Меженков А.А., Жумбей А.И. 2022. Динамика деградации земель в Ростовской области. *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 86(1): 41–54. doi: 10.31857/S2587556622010034
6. Гордеева Т.Х., Малюта О.В. 2014. Экологическая оценка не традиционных удобрений по реакциям тест-организмов. *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 19(5): 1264–1266.
7. Чукуров Д.С., Медведева Я.В., Никитин О.В. 2016. Исследование возможности использования донных отложений Альметьевского водохранилища в качестве органического удобрения. *Российский журнал прикладной экологии*. 1(5): 22–27.
8. Евилевич А.З. 1965. *Осадки сточных вод*. Л., Стройиздат: 248 с.
9. Лобченко Е.Е., Минина Л.И., Ничипорова И.П., Первышева О.А. 2016. Динамика качества воды Цимлянского водохранилища (за период с 1979 по 2014 годы). *Водное хозяйство России*. 6: 74–92. doi: 10.35567/1999-4508-2016-6-6
10. Гуляев М.В., Горская О.И. 2014. Применение технологии переработки донного ила Цимлянского водохранилища для решения проблемы его заиления. *Глобальная ядерная безопасность*. 2(11): 36–38.
11. Стрелков С.П., Кондрашин К.Г., Сорокин А.П., Мухин А.А., Петров Р.А. 2023. Модель применения материала донных отложений в сельском хозяйстве. *Астраханский вестник экологического образования*. 3(75): 115–121. doi: 10.36698/2304-5957-2023-3-115-121
12. Ветчинников А.А., Титова В.И., Баранов А.И., Сеньчева Е.В. 2018. Оценка возможности использования донных отложений пруда для рекультивации техногенно нарушенных почв. *Агрохимический вестник*. 2: 50–53.
13. Никаноров А.М., Хоружая Т.А., Мартышева Н.А. 2012. Современные характеристики и тенденции многолетних изменений эколого-токсикологического состояния Цимлянского водохранилища. *Метеорология и гидрология*. 4: 75–85.
14. Kazberuk W., Szulc W., Rutkowska B. 2021. Use bottom sediment to agriculture – effect on plant and heavy metal content in soil. *Agronomy*. 11(6): 1077. doi: 10.3390/agronomy11061077
15. Szara-Bąk M., Baran A., Klimkowicz-Pawlas A. 2023. Recycling of bottom sediment to agriculture: effects on plant growth and soil properties. *Journal of Soils and Sediments*. 23(1): 539–551. doi: 10.1007/s11368-022-03363-0
16. Kiani M., Raave H., Simojoki A., Tammeorg O., Tammeorg P. 2020. Recycling lake sediment to agriculture: effects on plant growth, nutrient availability, and leaching. *Science of the Total Environment*. 753: 141984. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141984
17. Бережная А.В., Рыбалкина Е.И., Юшкевич Я.А., Казеев К.Ш. 2023. Влияние внесения донных отложений на эмиссию углекислого газа серопесками. В кн.: *Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник материалов*. Ростов н/Д – Таганрог, изд-во ЮФУ: 13–14.
18. Рыбалкина Е.И., Казеев К.Ш., Колесников С.И. 2023. Влияние сапропеля на биологическую активность каштановой почвы. *Агрохимический вестник*. 4: 39–47. doi: 10.24412/1029-2551-2023-4-007
19. *ГОСТ Р 54000-2010. Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия*. 2011. М., Стандартинформ: 17 с.
20. Biache C., Mansuy-Huault L., Faure P. 2014. Impact of oxidation and biodegradation on the most commonly used polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) diagnostic ratios: implications for the source identifications. *Journal of Hazardous Materials*. 267: 31–39. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.036
21. *СанПиН 2.1.4.1074-01. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения*. 2002. М., Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России: 62 с.
22. *ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: гигиенические нормативы*. 2006. М., Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора: 15 с.
23. Alegbeleye O.O., Oreolu B.O., Jackson V.A. 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons: A critical review of environmental occurrence and bioremediation. *Environmental Management*. 60(4): 758–783. doi: 10.1007/s00267-017-0896-2
24. *ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности*. 1985. М., Госстандарт СССР: 7 с.
25. *ГОСТ Р 53218-2008. Удобрения органические. Атомно-абсорбционный метод определения содержания тяжелых металлов*. 2009. М., Стандартинформ: 12 с.
26. *ГОСТ Р 53398-2009. Удобрения органические. Методы определения удельной активности техногенных радионуклидов*. 2020. М., Стандартинформ: 14 с.
27. Шаврак Е.И., Генераленко И.А., Сапельников В.М. 2012. Оценка показателей состояния Цимлянского водохранилища. *Глобальная ядерная безопасность. Спецвыпуск (3)*: 60–71.

28. М-049-ПДО/18 (ФР.1.31.2018.32143). *Определение элементов и оксидов элементов в пробах почв и донных отложений*. 2018. СПб., Спектрон: 2 с.
29. ГОСТ Р 8.563-2009. *Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений*. 2010. М., Стандартинформ: 27 с.
30. РД 52.10.556-95. *Руководящий документ. Методические указания. Определение загрязняющих веществ в пробах морских донных отложений и взвеси*. 1996. М., Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды: 49 с.
31. Казеев К.Ш., Колесников С.И., Акименко Ю.В., Даденко Е.В. 2016. *Методы биодиагностики наземных экосистем*. Ростов н/Д, изд-во ЮФУ: 356 с.
10. Gulayev M.V., Gorskaya O.I. 2014. [The application of reprocessing technology of Tzimlaynsk water-reservoir ground sludge for the solution of its sedimentation]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'*. 2(11): 36–38. (In Russian).
11. Strelkov S.P., Kondrashin K.G., Sorokin A.P., Mukhin A.A., Petrov R.A. 2023. [Model of application of bottom sediment material in agriculture]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 3(75): 115–121. (In Russian). doi: 10.36698/2304-5957-2023-3-115-121
12. Vetchinnikov A.A., Titova V.I., Baranov A.I., Senchova E.V. 2018. [Assessment of opportunity of lake bottom sediments application for recultivation of technogenically disturbed soils]. *Agrokhimicheskiy vestnik*. 2: 50–53. (In Russian).
13. Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Martysheva N.A. 2012. [Present-day characteristics and trends of long-term changes in ecological and toxicological conditions of the Tsimlyansk Reservoir]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 4: 75–85. (In Russian).
14. Kazberuk W., Szulc W., Rutkowska B. 2021. Use bottom sediment to agriculture – effect on plant and heavy metal content in soil. *Agronomy*. 11(6): 1077. doi: 10.3390/agronomy11061077
15. Szara-Bak M., Baran A., Klimkowicz-Pawlas A. 2023. Recycling of bottom sediment to agriculture: effects on plant growth and soil properties. *Journal of Soils and Sediments*. 23(1): 539–551. doi: 10.1007/s11368-022-03363-0
16. Kiani M., Raave H., Simojoki A., Tammeorg O., Tammeorg P. 2020. Recycling lake sediment to agriculture: effects on plant growth, nutrient availability, and leaching. *Science of the Total Environment*. 753: 141984. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141984
17. Berezhnaya A.V., Rybalkina E.I., Yushkevich Ya.A., Kazeev K.Sh. 2023. [Influence of bottom sediments adding on carbon dioxide emission from sand soils]. In: *Aktual'nye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya. Sbornik materialov. [Current issues of ecology and nature management. Collection of materials]*. Rostov-on-Don, Taganrog, Southern Federal University: 13–14. (In Russian).
18. Rybalkina E.I., Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I. 2023. [Influence of sapropel on biological activity of chestnut soil]. *Agrochemical Gerald*. 4: 39–47. (In Russian). doi: 10.24412/1029-2551-2023-4-007
19. GOST R 54000-2010. *Udobreniya organicheskie. Sapropeli. Obshchie tekhnicheskie usloviya. [GOST R 54000-2010. Organic fertilizers. Sapropels. Base technical requirements]*. 2011. Moscow, Standartinform: 17 p. (In Russian).
20. Biache C., Mansuy-Huault L., Faure P. 2014. Impact of oxidation and biodegradation on the most commonly used polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) diagnostic ratios: implications for the source identifications. *Journal of Hazardous Materials*. 267: 31–39. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.12.036
21. SanPiN 2.1.4.1074-01. *Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody tsentralizovannykh sistem pit'evogo vodosnabzheniya. Kontrol'kachestva. Gigienicheskie trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti sistem goryachego vodosnabzheniya. [SanPiN 2.1.4.1074-01. Hygienic requirements for central drinking water supply system quality. Quality control. Hygienic requirements for hot water supplying system safety]*. 2002. Moscow, Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Ministry of Health of the Russian Federation: 62 p. (In Russian).

REFERENCES

1. Matishov G.G., Savel'eva O.S., Slyunina E.Yu. 2019. *Tsimlyanskaya plotina: posledniy akkord raskazachivaniya na Donu. [Tsimlyanskaya damb: the last accord of decazafication on Don region]*. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 216 p. (In Russian).
2. Gargopa Yu.M., Panov V.D., Lurie P.M., Alyoshina E.G., Alyoshina N.V., Filatova T.B. 2011. [The modern hydrological and hydrochemical regime of the Tsimlyansk water reservoir]. In: *Tsimlyanskoe vodokhranilishche: sostoyanie vodnykh i pribrezhnykh ekosistem, problemy i puti resheniya. [The Tsimlyansk water reservoir: conditions of water and costal ecosystems, the problems and the ways of their solutions]*. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 14–29. (In Russian).
3. Matishov G.G., Stepan'yan O.V., Har'kovskii V.M., Startsev A.V., Bulysheva N.I., Semin V.V., Soier V.G., Kreneva K.V., Glushchenko G.Yu., Svistunova L.D. 2016. Characteristic of Lower Don aquatic ecosystem in late autumn. *Water Resources*. 43(6): 873–884. doi: 10.1134/S009780781606004X
4. Bezuglova O.S., Nazarenko O.G., Ilyinskaya I.N. 2020. Land degradation dynamics in Rostov oblast. *Arid Ecosystems*. 10(2): 93–97. doi: 10.1134/s207909612002002x
5. Bezuglova O.S., Ilyinskaya I.N., Zakrutkin V.E., Nazarenko O.G., Litvinov Yu.A., Gayevaya E.A., Mezhenkov A.A., Zhumbey A.I. 2022. Dynamics of land degradation in Rostov oblast. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya Geograficheskaya*. 86(1): 41–54. (In Russian). doi: 10.31857/S2587556622010034
6. Gordeeva T.K., Malyuta O.V. 2014. [Ecological assessment of unconventional fertilizer test reactions-organisms]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 19(5): 1264–1266. (In Russian).
7. Chukurov D.S., Medvedeva Y.V., Nikitin O.V. 2016. [Investigation of applicability of Almet'yevsk water reservoir bottom sediments for use as an organic fertilizer]. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*. 1(5): 22–27. (In Russian).
8. Evilevich A.Z. 1965. *Osadki stochnykh vod. [The sediments of wastewaters]*. Leningrad, Stroyizdat: 248 p. (In Russian).
9. Lobchenko E.E., Minina L.I., Nichiporova I.P., Pervysheva O.A. 2016. [Dynamics of water quality of Tsimlyansk Reservoir (during period from 1979 to 2014)]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii*. 6: 74–92. (In Russian). doi: 10.35567/1999-4508-2016-6-6

22. GN 2.1.7.2041-06. *Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve: gigenicheskie normativy*. [GN 2.1.7.2041-06. *Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in soils: hygienic norms*]. 2006. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing: 15 p. (In Russian).
23. Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A. 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons: A critical review of environmental occurrence and bioremediation. *Environmental Management*. 60(4): 758–783. doi: 10.1007/s00267-017-0896-2
24. GOST 12.1.007-76. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Vrednye veshchestva. Klassifikatsiya i obshchie trebovaniya bezopasnosti*. [GOST 12.1.007-76. *System of work safety standards. Harmful materials. Classification and common safety requirements*]. 1985. Moscow, State Committee of the USSR for Standards: 7 p. (In Russian).
25. GOST R 53218-2008. *Udobreniya organicheskie. Atomno-absorbtsionnyy metod opredeleniya sodержaniya tyazhelykh metallov*. [GOST R 53218-2008. *Organic fertilizers. Atomic-adsorption method of heavy metal content finding*]. 2009. Moscow, Standartinform: 12 p. (In Russian).
26. GOST R 53398-2009. *Udobreniya organicheskie. Metody opredeleniya udel'noy aktivnosti tekhnogennykh radionuklidov*. [GOST R 53398-2009. *Organic fertilizers. Methods of technogenic radionuclides relative activity finding*]. 2020. Moscow, Standartinform: 14 p. (In Russian).
27. Shavrak E.I., Generalenko I.A., Sapelnikov V.M. 2012. [Estimation of the Tsimlyansk reservoir condition]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'*. Special issue (3): 60–71. (In Russian).
28. M-049-PDO/18 (FR.1.31.2018.32143). *Opredelenie elementov i oksidov elementov v probakh pochv i donnykh otlozheniy*. [M-049-PDO/18 (FR.1.31.2018.32143). *Elements and oxides finding in soil and bottom sediments samples*]. 2018. St Petersburg, Spektron: 2 p. (In Russian).
29. GOST R 8.563-2009. *Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Metodiki (metody) izmereniy*. [GOST R 8.563-2009. *State system of measure unification supplying. Techniques (methods) of measurements*]. 2010. Moscow, Standartinform: 27 p. (In Russian).
30. RD 52.10.556-95. *Rukovodyashchiy dokument. Metodicheskie ukazaniya. Opredelenie zagryaznyayushchikh veshchestv v probakh morskikh donnykh otlozheniy i vzvesi*. [RD 52.10.556-95. *Governing document. Technical instructions. Pollutant finding in samples of marine sediments and suspended matter*]. 1996. Moscow, Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring: 49 p. (In Russian).
31. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. 2016. *Metody biodiagnostiki nazemnykh ekosistem*. [Methods of biodiagnostics of terrestrial ecosystems]. Rostov-on-Don, Southern Federal University: 356 p. (In Russian).

Поступила 01.08.2024