

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-106-116>

УДК 556.18:626/628:627.5:628.1:631.6



АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ОБОСНОВАНИИ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО ПОДХОДА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГИДРОМЕЛИОРАЦИЙ

Хала Кабтул¹, И.В. Глазунова^{2✉}, Н.П. Карпенко³, С.А. Соколова⁴ М.А. Ширяева⁵

^{1,2,4} ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

³ ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова»; 127434, г. Москва, ул. Большая Академическая, 44, корп. 2, Россия

⁵ Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана Роспотребнадзора; 141014, г. Мытищи, ул. Семашко, 2, Россия

¹ halak93@gmail.com

² ivglazunova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>

³ npkarpenko@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X>

⁴ sokolovasvetlana@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>

⁵ Shiryeva.MA@fncg.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>

Аннотация. Цель исследований заключается в анализе структуры и условий водопользования в пределах водосбора реки Нерль Калязинского района Тверской области для оценки загрязняющей нагрузки на реку и обоснования водоохранных мероприятий на основе интегрированного подхода с учетом влияния гидромелиораций. Собраны и обобщены данные по природным и хозяйственным условиям для части бассейна реки Нерль, выполнен анализ загрязняющей нагрузки на реку в пределах ее водосбора. Оценены современная хозяйственная обстановка на объекте и перспективы ее развития с характеристиками водопотребления и водоотведения. Выполнены водохозяйственные расчеты на современный и перспективный периоды (для лет 75 и 95% обеспеченности по стоку реки). Произведены расчеты коэффициентов предельной загрязненности для различных отраслевых водопользователей, расчеты объемов водопотребления и водоотведения с учетом предельной загрязняющей нагрузки. Выполнен анализ структуры загрязняющей нагрузки отраслевых водопользователей на основе интегрированного подхода. Разработан необходимый комплекс водоохранных мероприятий по улучшению качества поверхностных водных ресурсов с учетом локальных мероприятий на мелиоративных системах. Определены ежегодные затраты на проведение водохозяйственных водоохранных мероприятий с учетом локальных мероприятий на мелиоративных системах и предотвращенный ущерб от загрязнения воды.

Ключевые слова: водные ресурсы, структура водопользования, гидромелиорация, показатель качества воды, локальные водоохранные мероприятия и сооружения, диффузный сток, дренажный сток, сорбенты, затраты, предотвращенный ущерб

Формат цитирования: Кабтул Х., Глазунова И.В., Карпенко Н.П., Соколова С.А., Ширяева М.А. Анализ условий водопользования при обосновании водоохранных мероприятий на основе интегрированного подхода с учетом влияния гидромелиораций // Природообустройство. 2025. № 5. С. 106-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-106-116>

ANALYSIS OF WATER USE CONDITIONS IN THE JUSTIFICATION OF WATER PROTECTION MEASURES ON THE BASIS OF THE INTEGRATED APPROACH TAKING INTO ACCOUNT THE IMPACT OF HYDRO-RECLAMATION

Kh. Kabtoula¹, I.V. Glazunova^{2✉}, N.P. Karpenko³, S.A. Sokolova⁴, M.A. Shiryayeva⁵

^{1,2,4} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

³ Federal State Budgetary Institution “Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov”; 127434, Moscow, Bolshaya Akademicheskaya str., 44, building 2, Russia

⁵ Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman of Rospotrebnadzor; 141014, Mytishchi, Semashko str., 2, Russia

¹ halak93@gmail.com

² ivglazunova@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>

³ npkarpenko@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X>

⁴ sokolovasvetlana@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>

⁵ Shiryayeva.MA@fncg.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>

Abstract. The aim of the research was to analyze the structure and conditions of water use within the Nerl River watershed in the Kalyazin district of the Tver region to assess the impact of pollution on the river and provide justification for water protection measures based on an integrated approach that takes into account the impact of hydro-reclamation. Data on the environmental and economic factors were gathered and compiled for part of the Nerl River basin, and an analysis of the pollution impact on the river within the Nerl River watershed was performed. The current economic situation at the site and its development prospects were assessed, including characteristics of water consumption and wastewater discharge. Water management calculations were carried out for current and future periods (for years with 75% and 95% river flow probability). Calculations of maximum permissible pollution coefficients for various sectoral water users were performed, and volumes of water consumption and wastewater discharge were calculated, taking into account the maximum permissible pollutant load. An analysis of the structure of the pollutant load from sectoral water users was carried out based on an integrated approach. A necessary set of water protection measures to improve the quality of surface water resources was developed, including local measures on melioration systems. Annual costs for the implementation of water management and water protection measures, including local measures on melioration systems, were determined, along with the prevented damages from water pollution.

Keywords: water resources, water use structure, hydro-reclamation, water quality indicator, local water protection measures and structures, diffuse runoff, drainage runoff, sorbents, costs, prevented damage

For citation: Kabtoula Kh., Glazunova I.V., Karpenko N.P., Sokolova S.A., Shiryayeva M.A. Analysis of water use conditions in the justification of water protection measures on the basis of the integrated approach taking into account the impact of hydro-reclamation // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 5. P. 106-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-106-116>

Введение. В настоящее время проблема сохранения и повышения качества воды для хозяйственно-питьевых, технических и гидромелиоративных целей является одной из приоритетных проблем. Известно более 2,5 тыс. загрязнителей природных вод, которые влияют на экологическое состояние окружающей среды: здоровье населения, животного и растительного мира и т.д. Следует отметить, что возрастающее антропогенное воздействие на окружающую среду создает избыток и опасность проникновения различных загрязнителей, органических и минеральных веществ, поступающих в поверхностные воды, — например, со смывом удобрений с полей. В итоге

это создает экологически напряженную ситуацию на водосборных территориях. В настоящее время во многих районах мира и на территории России ощущается существенная нехватка воды, пригодной для хозяйственно-питьевых целей и промышленного производства. Поэтому вопросы оценки качества водных ресурсов в пределах водосборов рек и разработка комплекса природоохранных мероприятий по их улучшению являются актуальной проблемой. Объектом исследований является водосборный бассейн реки Нерль, основная часть которого находится в Калезинском районе Тверской области. Климат исследуемой территории — умеренно-континентальный,

характеризующийся среднесуточным годовым количеством осадков $O = 593$ мм, суммарным испарением с поверхности суши $E_c = 363$ мм. Среднегодовая температура воздуха составляет: $t = +3,3^\circ\text{C}$, гидротермический коэффициент – 1,63, что соответствует избыточному увлажнению по агроклиматическому районированию [1-3].

Цель исследований: анализ структуры и условий водопользования в пределах водосбора реки Нерль Калязинского района Тверской области для оценки загрязняющей нагрузки на реку и обоснования водоохранных мероприятий на основе интегрированного подхода с учетом влияния гидромелиораций.

Материалы и методы исследований. Водоснабжение населения и промышленных предприятий осуществляется из подземных водозаборов, которые в гидравлическом отношении не имеют связи с рекой. Подача воды для нужд животноводства и орошения земель осуществляется за счет поверхностных вод из реки Нерль. Тем не менее все сточные воды сбрасываются в реку¹. Так, в 2016 г. прокуратура Калязинского района провела проверку исполнения природоохранного законодательства при эксплуатации очистных сооружений Калязинского муниципального унитарного предприятия «Коммунсервис». По результатам проверки было установлено, что качество сточной воды после очистки на выходе из очистных сооружений не соответствует требованиям СанПиН 2.1.5.980-00 «Гигиенические требования по охране поверхностных вод». Также сообщалось, что 33% исследуемых проб воды из открытых водоемов в Калязине не отвечали требованиям СанПиН 2.1.5.980-00 по санитарно-химическим показателям (БПК₅, ион аммония, общее микробное число).

На водосборной территории реки Нерль находятся осушительные системы общей площадью 1406 га, дренажный сток с осушаемых земель содержит остатки удобрений и пестициды [1, 4]. Для оценки качества поверхностных и дренажных вод необходимо решить ряд важных задач:

- выполнить анализ водохозяйственного комплекса (ВХК) в пределах водосбора на современный период и на перспективу для оценки потенциальных рисков, связанных с водопользованием;
- разработать комплекс водоохранных мероприятий с необходимыми экологическими и экономическими оценками.

¹ СанПиН 2.1.4.1110-02. Зоны санитарной охраны (ЗСО) источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения.

На современном этапе в состав ВХК рассмотренного объекта входят коммунально-бытовое хозяйство, промышленное производство, гидромелиорация, животноводство. В бассейне реки Нерль проживают 42,0 тыс. чел., из которых 13,8 тыс. – это городское население, 28,2 тыс. – сельское. По данным водоканала Калязинского района и в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 5 сентября 2013 г. № 782 «О схемах водоснабжения и водоотведения» на современный период структура водохозяйственного баланса строится следующим образом: объем водопотребления населения – $W_n = 352,77$ тыс. м³; объем водоотведения – $W_{вв,n} = 333,89$ тыс. м³.

На исследуемой территории отмечается существенное развитие промышленности, где ведущими предприятиями являются: ООО «Механический завод «Калязинский»»; ООО «Битца»; ООО «Аванти»; ООО «Европластик»; ООО ПО «Русский хлеб»; ООО «Экспериментальный пищевой комбинат» ЗАО «Калязинский завод молочных продуктов».

Дренажные системы требуют реконструкции на 15% площади осушенных земель.

Результаты и их обсуждение. Исходя из анализа структуры водопользования были оценены и рассчитаны показатели загрязненности сточных вод по коэффициентам предельной загрязненности. Так, показатель качества сточных вод по объемам предельной загрязненности рассчитывается по зависимости [4, 6-7]:

$$W_{пзи} = K_{пзи} \cdot W_{вви}, \text{ млн м}^3, \quad (1)$$

где $K_{пзи}$ – коэффициент предельной загрязненности i -го водопотребителя, который определяется как $K_{пзи} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{вви}}{\text{ПДК}_i} - 1$ по каждой группе лимитирующего показателя вредности (ЛПВ); $C_{вви}$ – концентрация загрязняющего вещества в сточных водах; $W_{вви}$ – объем водоотведения (возвратные, сточные воды).

Расчетные показатели предельной загрязненности сточных вод коммунально-бытового хозяйства для различных загрязняющих веществ приведены в таблице 1.

Расчеты коэффициентов предельной загрязненности для промышленных предприятий представлены в таблице 2.

Влияние мелиорированных сельскохозяйственных земель определено с учетом структуры севооборота и процентного соотношения мелиорированных земель (рис. 1, 2). На объекте исследований преобладает зерноотравопропашной севооборот. При этом орошаемые земли составляют 2%, осушаемые земли – 5%, поэтому в дальнейших водохозяйственных расчетах учитывается

дренажный и диффузный сток с осушаемых земель.

Показатели качества возвратных вод для осушаемых земель определены для севооборота с преобладанием зерновых культур. Загрязняющая нагрузка на реку со стороны возвратных вод с осушаемых земель (дренажный сток) определена с учетом остатков азота ($K_{пз} = 2,6$) и фосфора ($K_{пз} = 4,6$) в поверхностном стоке, его сборе и отводе собирателями на массиве осушения, а также расчетом опасности попадания остатков пестицидов и биогенов в дренажный и диффузный сток по известным методикам [3, 4].

Анализ загрязняющей нагрузки на реку со стороны отраслевых водопользователей в структуре общей загрязняющей нагрузки показал, что наибольшую загрязняющую нагрузку по БПК оказывают предприятия легкой и пищевой промышленности, а также коммунально-бытовое хозяйство населенных пунктов. Легкая промышленность также является лидером по загрязнению реки фосфором; основное загрязнение остатками нефтепродуктов происходит со стороны предприятий легкой промышленности [4, 8].

Таблица 1. Коэффициенты предельной загрязненности сточных вод коммунально-бытового хозяйства

Table 1. Coefficients of maximum pollution of municipal wastewater

Загрязняющие вещества Pollutants	$C_{ввп}, \text{ мг/л}$ $C_{ввп}, \text{ mg/l}$	$ПДК_p, \text{ мг/л}$ $МРС, \text{ mg/l}$	$K_{пз}$
БПК ₅ / BOD ₅	69	3	22
Железо / Ferrum	1,0	0,05	19
Медь / Copper	0,02	0,005	3
Цинк / Zinc	0,08	0,01	7
Азот / Nitrogen	20	1	19
Алюминий / Aluminium	0,5	0,5	0
Сульфаты / Sulfates	100	100	0
Хлориды / Chlorides	50	300	0
$K_{пз}$	—	—	22
$K'_{пз}$ *	—	—	6,6
$W_{пз}, \text{ млн м}^3$	—	—	2,18

* С учетом эффективности существующих в настоящее время локальных очистных сооружений

* taking into account the efficiency of existing local treatment facilities

Таблица 2. Коэффициенты предельной загрязненности для промышленных предприятий
Table 2. Maximum pollution influence coefficients for industrial enterprises

Загрязняющие вещества Pollutants	$ПДК_i, \text{ мг/л}$ $МРС_i, \text{ mg/l}$	Легкая промышленность Light manufacturing		Тяжелое машиностроение Basic engineering industry		Пищевая промышленность Food industry	
		$C_{ввп}, \text{ мг/л}$	$K_{пз}$	$C_{ввп}, \text{ мг/л}$	$K_{пз}$	$C_{ввп}, \text{ мг/л}$	$K_{пз}$
БПК ₅ / BOD ₅	3	113,13	36,7	7,95	1,65	104,91	34
Сульфаты / Sulfates	100	209,79	1,10	24,89	0	13,39	0
Хлориды / Chlorides	300	307,08	0,02	46,70	0	66,96	0
Азот / Nitrogen	1,00	4,75	3,75	0,37	0	0,31	0
Фосфор / Phosphorus	0,03	0,81	26,0	0,48	15	0,36	11
Фенолы / Phenols	0,01	0,1006	9,06	0,00	0	0,0156	0,6
Нефтепродукты / Oil products	0,05	0,25	4,00	0,13	1,60	0	0
$K_{пз}$	—	—	36,7	—	15	—	34
$K'_{пз}$ *	—	—	7,34	—	3	—	6,8
$W_{пз}, \text{ млн м}^3$	—	—	3,3	—	1,68	—	2,79

* С учетом эффективности существующих в настоящее время локальных очистных сооружений.

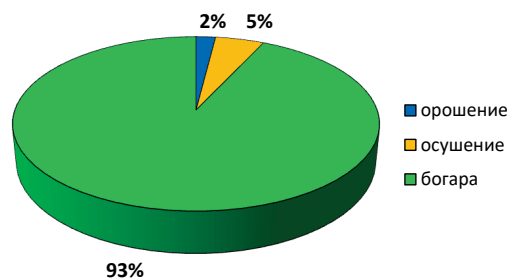


Рис. 1. Структура процентного соотношения мелиорированных земель

Fig. 1. Structure of the percentage of reclaimed land

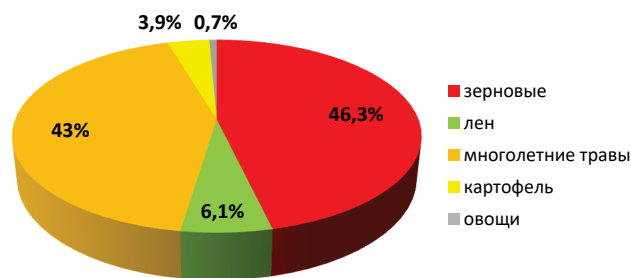


Рис. 2. Структура использования пахотных земель

Fig. 2. Structure of arable land use

На рисунке 3 приведена диаграмма долевого участия различных отраслевых водопользователей в структуре комплексной загрязняющей нагрузки по $K_{пз}$.

Объемы водопотребления и водоотведения с учетом объемов предельной загрязненности на современный период и перспективу до 2035 года представлены в таблице 3. Из данных таблицы следует, что орошение на фоне дренажа тоже создает значительную загрязняющую нагрузку на реку.

В прогнозах были приняты следующие показатели развития: рост численности населения на 0,65% в год (как в периоды стабильного экономического развития); рост в других хозяйственных отраслях на 10...15%.

Для интегрированной оценки особенностей водопользования были составлены водохозяйственные балансы с учетом антропогенного

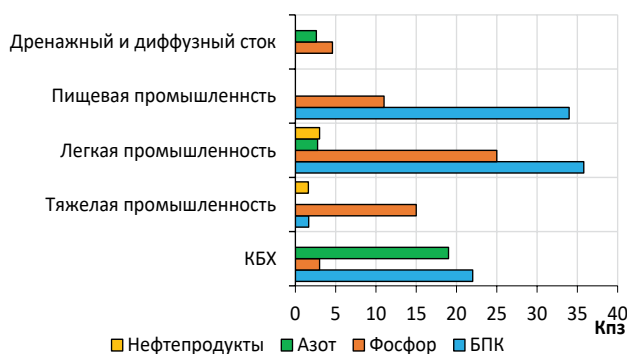


Рис. 3. Диаграмма структуры комплексной загрязняющей нагрузки по $K_{пз}$

Fig. 3. Diagram of the structure of the complex polluting load by C_{pi} (critical pollution indicators)

влияния на качество воды в реке. Качество воды в реке на основе интегрированного подхода оценивалось по величине комплексного коэффициента предельной загрязненности по укрупненным показателям статей водохозяйственного баланса. Уравнение водохозяйственного баланса имеет вид:

$$ВХБ = W_p + W_{п.в.} + \sum W_{вви} - \sum W_i - W_{поп.} - \alpha \cdot W_{п.в.} - \sum W_{пзи} \quad (1)$$

где W_p – объем стока реки²; $W_{п.в.}$ – объем водозабора из подземных вод; $\sum W_{вви}$ – объем возвратных вод i -го участника ВХБ; W_i – объем водопотребления i -м участком ВХБ; $W_{поп.}$ – объем расчетных попусков на нижележащий участок реки; α – коэффициент гидравлической связи речных и подземных вод; $\alpha \cdot W_{п.в.}$ – ущерб речному стоку от использования подземных вод; объемы предельной загрязненности³ [4, 5].

Оценки качества речной воды выполнялись в соответствии со стандартной методикой по коэффициенту предельной загрязненности:

$$K_{пз\ p} = \frac{(\sum W_{пзи} + \sum W_{вви})}{W_p + W_{п.в.} + \sum W_{вви} - \sum W_i - \alpha \cdot W_{п.в.}} - 1. \quad (2)$$

Градации качества воды по величине коэффициента предельной загрязненности показана в таблице 4.

При водохозяйственных расчетах подтверждено происходящее загрязнение реки сточными водами участников отраслевого водопользования в прогнозном варианте. Качество воды в реке соответствует уровню «Умеренно загрязненная» для прогнозного сценария развития без принятия мер по снижению загрязняющей нагрузки на реку.

Таблица 3. Объемы водопотребления и водоотведения с учетом объемов предельной загрязненности на современный и перспективный периоды, млн m^3

Table 3. Water consumption and wastewater disposal with regard to maximum pollution levels for the current and future periods, million m^3

Водопользователи Water consumers	Современный период Current period			Перспективный период Prospective period		
	W_i	$W_{вви}$	$W_{пзи}$	W_i	$W_{вви}$	$W_{пзи}$
Коммунально-бытовое хозяйство (КБХ) housing and communal services	0,353	0,33	2,18	0,406	0,380	2,507
Промышленность / Industry	2,24	1,42	52,11	2,576	1,633	59,93
Животноводство / Livestock farming	0,096	0,053	0,367	0,110	0,061	0,42
Орошение / Irrigation	2,55	0,255	8,342	2,933	0,293	9,59
Осушение / Drainage	–	0,314	0,942	–	0,361	1,083
Итого / Total	5,239	2,372	63,94	6,025	2,728	73,53

² СП 529.1325800.2023 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик».

³ СанПиН 1.2.3685-21 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов и аквапарков»

Исходя из местных условий рекомендован комплекс водохозяйственных и водоохраных мероприятий (ВХМ) по каждому отраслевому водопользователю для повышения качества воды в реке Нерль, в том числе указано на необходимость внутрисистемной очистки диффузного и дренажного стока на мелиоративных системах [10, 11]:

1. Повышение эффективности очистки сточных вод.
2. Повышение долевого участия водооборотных систем водоснабжения.
3. Повышение долевого участия повторных систем водоснабжения.
4. Обустройство водоохраных зон реки.
5. Локальная внутрисистемная очистка поверхностного и дренажного стока с применением сорбентов.

Примером использования сорбентов в локальных природоохранных сооружениях на мелиоративной системе может служить устройство поглотителей поверхностных вод. Для предотвращения поступления загрязняющих веществ с поверхностным стоком возможно обустройство поглотителей поверхностных вод (ППВ) по границе загрязненной территории или местных понижений с засыпкой сорбента.

Конструкция типового ППВ представлена на рисунке 4. Количество поглотителей и объем сорбента рассчитываются из условия, что водосборная площадь дренажного колодца-поглотителя должна составлять не меньше 3,0 га, но не больше величины эрозионно-опасной площади. Количество поглотителей по границе загрязненной территории зависит от модуля поверхностного стока, определяемого

для рассматриваемой части водосборной площади. Необходимое количество сорбента и периодичность его замены рассчитываются с учетом физико-химических показателей сорбентов и загрязняющей нагрузки [1, 12, 13]. В отношении рассматриваемого объекта расчеты выполнены для площади отвода воды с территории 204 га при модуле диффузного стока 0,05 л/с × га. Состав загрязнений в диффузном стоке с мелиорируемых земель представлен в таблице 5.

Как следует из представленных рисунков, достичь качества воды класса «Очень

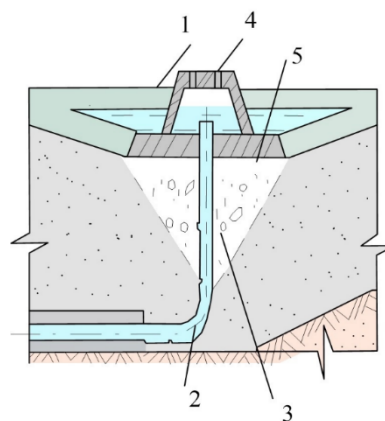


Рис. 4. Конструкция типового поглотителя поверхностных вод

- 1 – перфорированная железобетонная труба;
2 – отводная труба из ПВХ;
3 – гравий или гранулированный сапропель;
4 – перфорированная железобетонная крышка;
5 – обратная засыпка

Fig. 4. Design of a typical surface water absorber

- 1 – Perforated reinforced concrete pipe;
2 – PVC drain pipe; – Gravel or granulated sapropel;
4 – Perforated reinforced concrete cover; 5 – Backfill

Таблица 4. Классы качества воды в реке по коэффициенту предельной загрязненности

Table 4. Water quality classes in the river according to the maximum pollution coefficient

$K_{пзр}$	$\leq -0,8$	$-0,8-0,0$	$0,0-1$	$1-3$	$3-5$	>5
Класс качества quality category	очень чистая very clean	Чистая clean	Умеренно-за- грязненная moderately con- taminated	Загрязненная contaminated	Грязная polluted	очень грязная very polluted

Таблица 5. Содержание остатков удобрений и тяжелых металлов в диффузном стоке с мелиорированных земель [12,13]

Table 5. Fertilizer and trace metal residues in diffuse runoff from reclaimed land [12,13]

Загрязняющие вещества Pollutants	$N-NO_3$	P_2O_5	Zn	Cu	Pb	Cd	Mn	Fe
$C_{ввп}$, мг/л	9,74	1,94	0,0016	0,0045	0,1875	0,0008	0,0163	0,0764
ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, мг/л Maximum permissible concentration for fishery waters, mg / l	9,1	0,03	0,01	0,001	0,006	0,005	0,01	0,1

Kabtoula Kh., Glazunova I.V., Karpenko N.P., Sokolova S.A., Shiryayeva M.A. Analysis of water use conditions in the justification of water protection measures on the basis of the integrated approach taking into account the impact of hydro-reclamation

чистая» по укрупненным водохозяйственным показателям позволило введение локальной очистки дренажного и диффузного стока на мелиоративных системах при применении локальных водоохраных мероприятий и сооружений с засыпкой сорбентов на основе сапропеля. В частности, обустройство водоохраных зон создается с целью: защиты водного объекта от загрязнений, поступающих с диффузными стоками; защиты склонов первой надпойменной террасы от водной эрозии; укрепления берегов. Локальная очистка дренажного стока обеспечивает как снижение загрязняющей нагрузки на реку, так и возможное формирование дополнительного ресурса воды для целей нерегулярного орошения [12-15]. Рассматриваемая река относится к классу «средних», поэтому при расчетах по звеньям речной сети получена площадь водоохранной зоны (ВОЗ), равная 1300 га, что составляет 1% от площади лесов на водосборе реки.

С целью оценки экономических затрат на проведение водоохраных мероприятий был произведен расчет ежегодных капитальных затрат и издержек (табл. 8).

Также был произведен расчет величины предотвращенного экологического ущерба, который определялся по формуле [7, 8]:

$$Y = p \cdot K_{уд} \cdot \sum W_{ввj} \cdot \sum (C_{ввij} - C'_{ввij}) \cdot A_i, \quad (3)$$

где $p = 0,7$ – коэффициент, учитывающий значимость водного объекта для водохозяйственных целей; $K_{уд}$ – удельная величина предотвращенного ущерба⁴; $C_{ввij}$ – концентрация i -го загрязняющего вещества в возвратных водах j -го участника ВХК до проведения водоохраных мероприятий (методов управления); $C'_{ввij}$ – концентрация i -го загрязняющего вещества в возвратных водах j -го участника ВХК после проведения водоохраных мероприятий; $W_{ввj}$ – объем возвратных вод j -го участника ВХК; $A_i = 1 / ПДК_i$.

Значения $C'_{ввij}$ приняты с учетом рекомендованных водохозяйственных мероприятий (методов управления).

Значения величины предотвращенного экологического ущерба приведены в таблице 9.

Таблица 6. Физико-химические показатели сорбентов на основе сапропеля

Table 6. Physical and chemical properties of sapropel-based sorbents

Сорбент / Sorbent	Емкость поглощения, мг-экв на 100 г почвы Absorption capacity, mg-eq per 100 g of soil	Удельная поверхность, м ² /г Specific surface area, m ² / g	РН
Сапропель / Sapropel	190	66	7,7

Таблица 7. Среднестатистическая эффективность сокращения уровня загрязнения рек-водоприемников остатками удобрений и пестицидов

Table 7. Average effectiveness of reducing the level of pollution in rivers – water receivers with fertilizers and pesticides residues

Мероприятия / Measures	Эффективность, % Efficiency%
Соблюдение технологии внесения удобрений и пестицидов compliance with fertilizers and pesticides application technology	40-60
Распашка поперек склона / tilling across slopes	10-30
Рыхление почв / soil loosening	5-20
Устройство лесополос / arrangement of forest belts	20-40
Устройство водоохраных зон / creation of water protection zones	40-70
Устройство водозадерживающих валов / arrangement of water-retaining shafts	10-30
Устройство бессточных канав, прудов, запруд arrangement of drainless ditches, ponds, dams	30-60
Устройство прудов накопителей дренажного стока arrangement of ponds for drainage runoff accumulators	30-40
устройство биоинженерных сооружений / bioengineering facilities	65-85
Устройство поглотители поверхностного стока / surface runoff absorbers	40-60
Применение сорбентов в локальных сооружениях по очистке поверхностного и дренажного стока на мелиоративной системе application of sorbents in local facilities for cleaning surface and drainage runoff in the land reclamation system	40-70

⁴ $K_{уд}$ – удельный экономический ущерб (443,5 руб/усл. т на 1990 г.). Для расчета ущерба от загрязнения водных объектов используют коэффициенты индексации платежей за загрязнение; в 2013 г. это значение составляло 1,15. К ставкам платы применяется коэффициент индексации, утвержденный нормативным документом: на 2023 г. – 1,26 [16]

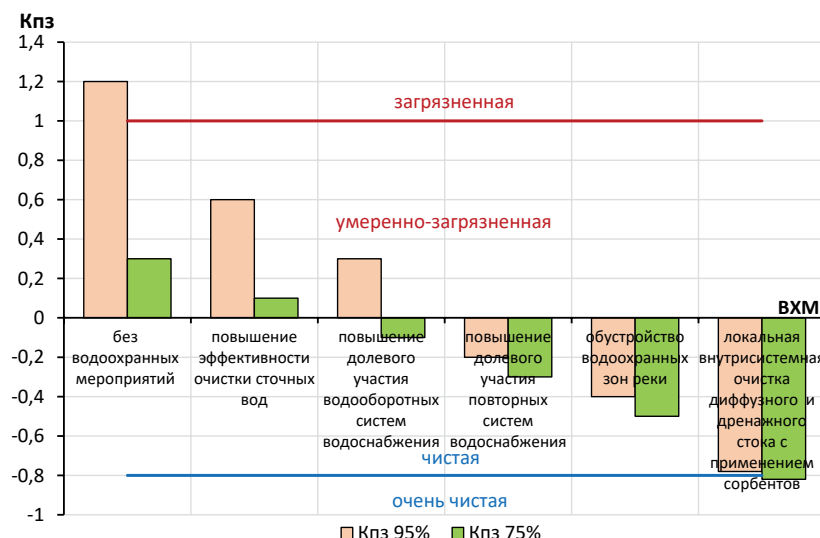


Рис. 5. Изменение качества воды в реке с учетом рекомендуемых ВХМ

Fig. 5. Change in river water quality taking into account recommended water management measures

Таблица 8. Определение ежегодных затрат на проведение водохозяйственных мероприятий

Table 8. Determination of annual costs for water management activities

Мероприятия <i>Measures</i>	Объем <i>Volume</i>	Капитальные затраты <i>capital costs</i>		Ежегодные издержки <i>annual costs</i>		З, млн руб./год <i>Z, million roubles / year</i>
		Удельные, К _п , руб./м ³ <i>Specific, K_p, roubles / m³</i>	К _п , млн руб. <i>K_p, million roubles</i>	Удельные, C _п , руб./год <i>Specific C_p, roubles / year</i>	С _п , млн руб./год <i>C_p, million roubles / year</i>	
Повышение долевого участия водооборотных систем водоснабжения в промышленности <i>Increase in share of industrial water recycling systems</i>	0,12 млн м ³	1000	50	100	5	11,00
Повышение долевого участия повторных систем водоснабжения (животноводство – орошение) <i>Increase in reuse of irrigation water from livestock farming</i>	0,06 млн м ³	2000	120	200	12	26,40
Повышение эффективности очистных сооружений в коммунально-бытовом хозяйстве <i>Improvement of wastewater treatment facilities for housing and communal services</i>	0,38 млн м ³	50	18,55	5	1,855	4,08
Водоохранная зона <i>Water protection zone</i>	1300 га	7400	10,405	740	1,041	2,29
Реконструкция дренажа на переувлажненных землях <i>Reconstruction of drainage on wetlands</i>	1406 га	90000	126,55	9000	12,655	27,84
Сорбенты для засыпки в локальные водоохранные сооружения <i>Sorbents for filling into local water protection structures</i>	94,5 т	33000	3,12	3300	0,312	0,69
Итого/ Total			328,625		32,863	72,30

расчеты выполнены в ценах 2023 года. / calculations are made in 2023 prices.

Таблица 9. Расчет величины предотвращенного ущерба

Table 9. Calculation of the amount of damage prevented

Участник ВХМ Participant of the water management activities	Загрязняющее вещество Pollutant	$C_{вв\text{ij}}$, мг/л mg/l	$C'_{вв\text{ij}}$, мг/л mg/l	$W_{вв\text{ij}}$, млн м ³ mln m ³	A_i	Y_j , млн руб. mln rbl
Промышленность industry	БПК ₅ / BOD ₅	7,95	0	0,05	0,33	229,84
	Нефтепродукты / Oil products	0,13	0		20,00	
	Сульфаты / Sulfates	24,89	0		0,01	
Животноводство livestock farming	Азот / Nitrogen	36	0	0,06	1	162,88
	Железо / Ferrum	1,0	0		20,00	
	Цинк / Zinc	0,16	0		100,00	
Коммунально-бытовое хозяйство housing and communal services	Азот / Nitrogen	20	1	0,371	1	110,24
	Железо / Ferrum	1,0	0,05		20,00	
	Цинк / Zinc	0,08	0,01		100,00	
	Железо / Ferrum	0,3	0,03		20,00	
Орошаемые земли / irrigated land	Фосфор P ₂ O ₅ / Phosphorus	0,06	0,03	2,28	33	36,88
Осушение / drainage	Фосфор P ₂ O ₅ / Phosphorus	0,07	0,03	5,7	33	42,60
Итого/ Total						582,44

Выводы

В работе оценены современная водохозяйственная обстановка на объекте и перспективы ее развития с характеристиками водопотребления и водоотведения; выполнены водохозяйственные расчеты на современный и перспективный периоды с учетом качества воды по $K_{\text{из}}$ (для лет 75 и 95% обеспеченности по стоку реки) с учетом влияния гидромелиораций. Приведены результаты расчетов коэффициентов предельной загрязненности и их сравнение для различных отраслевых водопользователей при акценте на гидромелиорации. Выявлено доленое участие различных отраслевых водопользователей на реку по $K_{\text{из}}$ в отчетный период с учетом существующих систем очистки сточных вод, которое изменяется в диапазоне от 7 до 36. Учтено, в том числе, влияние дренажного диффузного стока с массива осушения 204 га, которое оценивается в диапазоне 3...6 без локальной очистки на мелиоративной системе.

Выполнена интегрированная комплексная оценка влияния антропогенной нагрузки на реку Нерль на основе водохозяйственных расчетов с учетом качества воды по $K_{\text{из}}$ и рекомендованы возможные водохозяйственные мероприятия на перспективу до 2035 года. Предложены наилучшие доступные технологии (ВХМ) по отраслевым водопользователям, а также обустройство водоохраных зон реки и локальные водоохраные мероприятия и сооружения для массива осушения с применением сорбентов для очистки воды.

С учетом применения ВХМ качество воды в реке по интегрированным показателям будет соответствовать нормативным классам качества воды. Определены ежегодные затраты на проведение водохозяйственных мероприятий и выполнен расчет величины предотвращенного экологического ущерба с учетом коэффициентов индексации платежей за загрязнение.

Список использованных источников

1. Кирейчева Л.В. Экологически безопасные ресурсы. Технические решения очистки дренажно-сбросных вод / Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова // Вода Magazine. 2008. № 4. С. 44-47. EDN: PTUNOZ
2. Карпенко Н.П. Управление земельными и водными ресурсами для снижения загрязнения рек на основе экспертных оценок эффективности природоохранных мероприятий / Н.П. Карпенко, И.В. Глазунова // Природообустройство. 2019. № 4. С. 102-108. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-102-108. EDN: YXWIGK
3. Айдаров И.П. Методология и количественная оценка экологической безопасности функционирования природно-антропогенных систем / И.П. Айдаров, Н.П. Карпенко, Д.А. Манукян // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2003. № 2. С. 32-36. EDN: PEODOJ/

References

1. Kireycheva L.V. Ecologically safe resources. Technical solutions for the treatment of drainage discharge waters / L.V. Kireycheva, I.V. Glazunova // Water Magazine, 2008. No 4, P. 44-47. EDN: PTUNOZ
2. Karpenko N.P. Management of land and water resources to reduce river pollution based on expert assessments of the effectiveness of environmental protection measures / N.P. Karpenko, I.V. Glazunova // Prirodoobustroystvo. 2019. No 4. P. 102-108. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-4-102-108. EDN: YXWIGK
3. Aydarov I.P. Methodology and quantitative assessment of the environmental safety of functioning natural-anthropogenic systems / I.P. Aydarov, N.P. Karpenko, D.A. Manukyan // Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 2003. No 2. P. 32-36. EDN: PEODOJ/

4. Бакштанин А.М. Водохозяйственные системы и водопользование / А.М. Бакштанин, Э.С. Беглярова, А.Л. Бубер [и др.]. М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. 452 с. DOI: 10.12737/textbook_5c62791282d144.90563100. EDN: PQYWJH

5. Соколова С.А. Проблемы водоснабжения и перспективы использования подземных вод в Люберецком районе Московской области / С.А. Соколова // Природообустройство. 2013. № 5. С. 50-54. EDN: RQREVJ

6. Мелиорация и водное хозяйство. Том 5. Водное хозяйство: справочник/ Под ред. И.И. Бородавченко. М.: Агропромиздат, 1988. 399 с.

7. Беглярова Э.С. Изменение показателей загрязнения поверхностного стока городских территорий при проведении строительных работ на примере частных водосборов рек Лихоборки и Жабенки / Э.С. Беглярова, С.А. Соколова, А.М. Бакштанин // Гидротехническое строительство. 2020. № 11. С. 48-52. EDN: VZLYNR

8. Соколова С.А. Комплексная оценка экологического состояния реки Москвы / С.А. Соколова, С.А. Мухамедзянова // Молодежь и системная модернизация страны: Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых. В 5-ти томах, Курск, 19-20 мая 2022 года. Том 4. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. С. 375-379. EDN: SVCМНА

9. Алавердова Н.В. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. РСФСР. Выпуск 23. Бассейн реки Волги (верхнее течение) / Н.В. Алавердова [и др.] Л.: Гидрометеиздат, 1986. 631 с.

10. Кирейчева Л.В. Методика расчета прудов-накопителей дренажного стока для локальных участков орошения / Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова // Природообустройство. 2012. № 5. С. 30-34. EDN: PJQDWJ

11. Дмитриева А.В. Основы проектирования водоохраных зон и прибрежных защитных полос: учебное пособие / А.В. Дмитриева, С.А. Соколова, И.В. Глазунова. М.: университет РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2016. 70 с. EDN: ULQTTY

12. Патент № 2049107 C1 Российская Федерация, МПК C09K 17/00. состав для мелиорации почв «СОРЕБКС»: № 92000596/15: заявл. 15.10.1992: опубл. 27.11.1995 / А.И. Столяров, Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова; заявитель Научно-техническая фирма «Экспертные системы». EDN: CVQYDA

13. Кирейчева Л.В. Новые органоминеральные сорбентомелиоранты для детоксикации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами / Л.В. Кирейчева, И.В. Глазунова // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 1994. № 4. С. 16-18. EDN: YYVKTБ

14. Карпенко Н.П. Повышение экологической безопасности при проведении работ по эксплуатации природоохраных сооружений на водосборах рек / Н.П. Карпенко, И.В. Глазунова, М.В. Барсукова // Природообустройство. 2020. № 1. С. 129-136. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-129-136. EDN: LYDHDV

15. Манукьян Д.А. Экологическая безопасность функционирования техноприродных систем: состояние, проблемы и пути решения: монография / Д.А. Манукьян, Н.П. Карпенко. М.: МГУП, 2007. 294 с. EDN: QKQFZH

16. Постановление Правительства РФ от 20.03.2023 № 437 «О применении в 2023 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду».

4. Bakshtanin A.M. Water management systems and water use / A.M. Bakshtanin, E.S. Beglyarova, A.L. Buber [et al.]. Moscow: ООО "Scientific Publishing Center INFRA-M", 2019. 452 p. DOI: 10.12737/textbook_5c62791282d144.90563100. EDN: PQYWJH

5. Sokolova S.A. Problems of water supply and prospects for the use of groundwater in the Lyubersky District of the Moscow Region / Prirodoobustroystvo. 2013. No 5, P. 50-54. EDN: RQREVJ

6. Borodavchenko I.I. Land reclamation and water management. Volume 5. Water management: Reference book / Edited by I.I. Borodavchenko.. Moscow: Agropromizdat. 1988, 399 p.

7. Beglyarova E.S. Change in surface runoff pollution indicators from urban areas during construction works on the example of the small catchments of the Likhoborka and Zhabenka Rivers / E.S. Beglyarova, S.A. Sokolova, A.M. Bakshtanin // Hydraulic engineering construction. 2020. No 11, P. 48-52. EDN: VZLYNR

8. Sokolova S.A. Comprehensive assessment of the ecological state of the Moscow River / S.A. Sokolova, S.A. Mukhamedzyanova // Youth and systemic modernization of the country: Collection of scientific articles of the 7th International Scientific Conference of Students and Young Scientists. In 5 volumes, Kursk, May 19-20, 2022, Volume 4. Kursk: Southwestern State University, 2022. P. 375-379. EDN: SVCМНА

9. Alaverdova N.V. *State water cadre. Long-Term data on the regime and resources of land surface waters. Volume 1. RSFSR. Issue 23. Basin of the Volga River (Upper Reach) / N.V. Alaverdova [et al.]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 631 p.

10. Kireycheva L.V. Methodology for calculating storage ponds for drainage flow for local irrigation sites / L.V. Kireycheva, I.V. Glazunova // Prirodoobustroystvo, 2012. No 5, P. 30-34. EDN: PJQDWJ

11. Dmitrieva A.V. Fundamentals of designing water protection zones and coastal protective belts: A Textbook / A.V. Dmitrieva, S.A. Sokolova, I.V. Glazunova. Moscow: RGAU-MSHA named after C.A. Timiryazev, 2016... 70 p. EDN: ULQTTY

12. Patent, No. 2049107 C1 Russian Federation, IPC C09K 17/00. Composition for Soil Reclamation "SORBEKS": No. 92000596/15: filed 15.10.1992: published 27.11.1995 / A.I. Stolyarov, L.V. Kireycheva, I.V. Glazunova; Applicant Scientific-technical firm "Expert systems". EDN: CVQYDA

13. Kireycheva L.V. New organomineral sorbent-meliorants for detoxification of soils contaminated with heavy metals / L. V Kireycheva., I.V. Glazunova // Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences. 1994. No 4, P. 16-18. EDN: YYVKTБ

14. Karpenko N.P. Improving environmental safety during the operation of environmental structures in river catchments / N.P. Karpenko, I.V. Glazunova, M.V. Barsukova // Prirodoobustroystvo. 2020. No 1, P. 129-136. DOI: 10.34677/1997-6011/2020-1-129-136. EDN: LYDHDV

15. Manukyan D.A. Environmental safety of technonatural systems functioning: state, problems and ways of solutions: A Monograph / D.A. Manukyan, N.P. Karpenko. Moscow: MGUP. 2007. 294 p. EDN: QKQFZH

16. Decree of the Government of the Russian Federation dated March 20, 2023 No. 437 "On the Application in 2023 of rates of payment for negative impact on the environment".

Об авторах

Кабтул Хала, аспирант кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; halak93@gmail.com

Ирина Викторовна Глазунова, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>; SPIN-код: 7508-2272, AuthorID: 127917; Scopus: 6507565730; ivglazunova@mail.ru

Нина Петровна Карпенко, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник; <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X>; SPIN-код: 3054-6462, AuthorID: 532745; npkarpenko@yandex.ru

Светлана Анатольевна Соколова, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики, гидрологии и управления водными ресурсами; <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>; SPIN-код: 3004-0140, AuthorID: 939094; Scopus: 57218659380; sokolovasvetlana@mail.ru

Маргарита Александровна Ширяева, младший научный сотрудник отдела гигиены воды ФБУН ФНИЦ имени Ф.Ф. Эрисмана; <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>; SPIN-код: 4706-0330, AuthorID: 1081861; Shiryayeva.MA@fncg.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Кабтул Х., Глазунова И.В., Карпенко Н.П., Соколова С.А., Ширяева М.А. выполнили практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 10.02.2025

Поступила после рецензирования / Received after peer review 17.09.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 17.09.2025

About the authors

Kabtoula Khala, postgraduate student, department of hydraulics, hydrology and water resources management. Email: halak93@gmail.com

Irina V. Glazunova, CSc (Eng), associate professor department of hydraulics, hydrology and water resources management; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>; SPIN-code: 7508-2272, AuthorID: 127917, Scopus: 6507565730; ivglazunova@mail.ru

Nina P. Karpenko, DSc (Eng), leading researcher; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6638-149X> SPIN-code: 3054-6462, AuthorID: 532745; npkarpenko@yandex.ru

Svetlana A. Sokolova, CSc (Eng), associate professor, department of hydraulics, hydrology and water resources management. SPIN-code: 3004-0140, AuthorID: 939094, Scopus: 57218659380 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3997-6994>; sokolovasvetlana@mail.ru

Margarita A. Shiryayeva, junior researcher, department of water hygiene, FBES Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8019-1203>; SPIN-code: 4706-0330, AuthorID: 1081861; Shiryayeva.MA@fncg.ru

Kabtoula Kh., Glazunova I.V., Karpenko N.P., Sokolova S.A., Shiryayeva M.A. performed practical and theoretical research, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript, they have copyright on the article and are responsible for plagiarism.