

МЕЛИОРАЦИЯ, ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И АГРОФИЗИКА

Научная статья

УДК 631.6.02

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-2-149-173

Обоснование комплекса мероприятий, направленных на снижение диффузного загрязнения в бассейнах малых рек

Людмила Владимировна Кирейчева¹, Елена Владимировна Ангольд²,
Юрий Сергеевич Кузнецов³

^{1, 2, 3}Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова,
Москва, Российская Федерация

¹kireychevalw@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7114-2706>

²angold-elena@mail.ru

³kuzneczovu@yandex.ru

Аннотация. **Цель:** обоснование комплекса водоохраных и мелиоративных мероприятий, направленных на предотвращение негативного воздействия источников диффузного загрязнения на качество воды в бассейнах малых рек, сокращение почвенной эрозии и восстановление элементов экологического каркаса на примере бассейна р. Казанка. **Материалы и методы.** Методологической базой является анализ исследований, освещающих основные вопросы формирования стока и почвенной эрозии, нормативных документов и методических указаний. **Результаты.** Обоснована необходимость реализации комплексной задачи по снижению диффузного загрязнения в бассейнах рек, а именно: применение взаимосвязанных организационных, агротехнических, лесомелиоративных, гидротехнических мероприятий по предупреждению развития эрозии и восстановлению элементов экологического каркаса. Выполнены расчеты экологической устойчивости по бассейну р. Казанка, которые позволили выявить наиболее неустойчивые подбассейны. Подбассейны Сула ($K_{ЭСЛ} = 0,22$) и Шимяковка ($K_{ЭСЛ} = 0,32$) характеризуются ярко выраженной нестабильностью. Там же наблюдаются деградационные процессы, приводящие к эрозии почвы и формированию диффузного стока, влекущие за собой ухудшение качества воды в р. Казанка. Стабильным можно считать только подбассейн Кисьмень ($K_{ЭСЛ} = 0,52$); малостабильными являются Атынка, Вереженка, Ия, расположенные в верховьях реки. Выполненный расчет устойчивости подбассейна Сула (репрезентативный участок) р. Казанка показал, что намеченные мероприятия позволяют перевести агроландшафт из состояния с ярко выраженной нестабильностью в малостабильный ($K_{ЭСЛ} = 0,4$). **Выводы.** Основными источниками диффузного загрязнения водных объектов являются сельскохозяйственные угодья, использование удобрений на полях, сельскохозяйственные предприятия, включая животноводческие фермы, приводящие к снижению экологической устойчивости агроландшафтов. Обоснованы мероприятия, позволяющие повысить устойчивость агроландшафта и существенно снизить диффузный сток.

Ключевые слова: диффузное загрязнение, источники загрязнения, экологическая устойчивость, агролесомелиорация, гидротехнические мероприятия

Для цитирования: Кирейчева Л. В., Ангольд Е. В., Кузнецов Ю. С. Обоснование комплекса мероприятий, направленных на снижение диффузного загрязнения в бассейнах малых рек // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 2. С. 149–173. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-2-149-173>.

LAND RECLAMATION, WATER MANAGEMENT AND AGROPHYSICS

Original article

Justification of a complex of measures aimed at reducing diffuse pollution in small river basins

Ludmila V. Kireicheva¹, Yelena V. Angold², Yuri S. Kuznetsov³

^{1, 2, 3}All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named
after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

¹kireychevalw@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7114-2706>

²angold-elena@mail.ru

³kuzneczovu@yandex.ru

Abstract. Purpose: to substantiate a complex of water protection and reclamation measures aimed at preventing the negative impact of diffuse pollution sources on water quality in small river basins, reducing soil erosion and restoring ecological framework elements using the Kazanka River basin as an example. **Materials and methods.** The methodological basis is the analysis of studies covering the main issues of runoff and soil erosion formation, regulatory documents and guidelines. **Results.** The need for a comprehensive task on reducing diffuse pollution in river basins is substantiated, namely: the use of interrelated organizational, agrotechnical, forest reclamation, and hydraulic engineering measures to prevent erosion and restore elements of the ecological framework. Calculations of environmental sustainability for the Kazanka River basin were performed, which made it possible to identify the most unstable sub-basins. The sub-basins of Sula (KESL = 0.22) and Shimyakovka (KESL = 0.32) are characterized by pronounced instability. Degradation processes leading to soil erosion and formation of diffuse runoff, which lead to deterioration of water quality in the Kazanka River, are also observed there. Only the Kis'mes' sub-basin (KESL = 0.52) can be considered stable; the Atynka, the Verezenka, the Iya, located in the upper reaches of the river, are of low stability. The performed calculation of the Sula sub-basin sustainability (representative section) of the Kazanka River showed that the planned measures make it possible to transfer the agrolandscape from a state of pronounced instability to a low-stability state (KESL = 0.4). **Conclusions.** The main sources of diffuse pollution of water bodies are agricultural lands, the use of fertilizers in fields, agricultural enterprises, including livestock farms, leading to a decrease in the ecological sustainability of agricultural landscapes. Measures to increase agricultural landscape sustainability and reduce diffuse runoff significantly are substantiated.

Keywords: diffuse pollution, pollution sources, ecological sustainability, agroforestry, hydraulic engineering measures

For citation: Kireicheva L. V., Angold Ye. V., Kuznetsov Yu. S. Justification of a complex of measures aimed at reducing diffuse pollution in small river basins. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(2):149–173. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-2-149-173>.

Введение. До настоящего времени проблема диффузного загрязнения рек остается не решенной из-за трудно выявляемых источников площадного загрязнения, особенностей формирования поверхностного стока и непредсказуемости климатических факторов, а также снижения экологиче-

ской устойчивости ландшафтов к проявлению деградационных процессов. Особенно ярко это выражено в бассейнах малых рек, где приоритетными источниками загрязнения водных объектов являются сельскохозяйственные и мелиорированные земли [1]. Посредством сельскохозяйственной и мелиоративной деятельности человек переводит естественный ландшафт в сельскохозяйственный ландшафт (агроландшафт), тем самым увеличивая антропогенную нагрузку. Это приводит в ряде случаев к нарушению экологической устойчивости агроландшафта, что определяет развитие негативных процессов. В условиях обилия осадков, особенно в период снеготаяния, с поверхностным стоком усиливается вынос веществ, связанный с процессами эрозии, выщелачивания и растворения. При эрозии в основном выносятся взвешенные почвенные частицы, на которых сорбируются биогенные вещества, в частности, фосфор, а при растворении и выщелачивании – растворенные химические вещества. В среднем с 1 га пашни в зависимости от типа почв, количества и характера выпадающих осадков, вида растений, дозы внесения удобрений может выноситься в год до 80 кг нитратного азота, 3 кг фосфора и 60 кг калия [2].

Исследованием диффузного загрязнения рек занимались многочисленные ученые в мире и в России. Поверхностному стоку с водосборов и диффузному загрязнению посвящены работы С. В. Долгова, Н. И. Коронкевича и др. [3], Л. В. Кирейчевой [4], В. И. Данилова-Данильяна [1], С. В. Ясинского [5], В. В. Бородычева [6], А. Л. Бубер, А. А. Бубер [7], В. Н. Маркина [8], Л. Д. Ратковича [9] и многих других отечественных ученых. Зарубежные ученые J. Cantoni, Z. Kalantari, G. Destouni [10] в своей работе поднимают не решенную до сих пор проблему повсеместного ухудшения качества воды, несмотря на принятые меры по снижению активного загрязнения. Авторы утверждают, что в процессе переноса загрязняющих веществ из источников в водные экосистемы они могут сохранять-

ся на участках их переноса, например, в течение десятилетий. Целью исследования в работе [11] было изучение взаимосвязи между качеством воды в реке и скоростью поверхностного стока, определяемой как отношение годового поверхностного стока к среднегодовому количеству осадков по модели HSPF. Было обнаружено, что существует статистически значимая связь между скоростью поверхностного стока и концентрациями БПК и ХПК. Анализ показал, что скорость поверхностного стока может быть использована в качестве эффективного инструмента, наглядно демонстрирующего ухудшение качества воды в реке на уровне водосбора. Результаты данного исследования свидетельствуют о том, что для предотвращения ухудшения качества воды в реке необходимо регулировать и контролировать величину поверхностного стока в пределах около 15 % [11].

Вопросы эрозионных процессов и обоснования противоэрозионных мероприятий рассмотрены в работах отечественных ученых: М. Н. Заславского, В. А. Беляева, А. В. Донцова [12], П. С. Захарова, Е. В. Полуэктова [13], И. М. Корнилова [14] и др. Е. В. Полуэкто в своих исследованиях большое внимание уделяет противоэрозионным мероприятиям по задержанию поверхностного стока с определением их количественных и качественных характеристик, а также приводит данные о водозадерживающей способности противоэрозионных приемов, полученные опытным путем (рисунок 1) [13, 15].

Зарубежные авторы в работе [16] фокусируются на методах контроля эрозии почвы в сельскохозяйственных районах, на которые влияют рельеф, осадки и интенсивная сельскохозяйственная деятельность. В попытке справиться с эрозией почвы за пределами участка и на месте воздействия на сельскохозяйственные угодья в Азии исследователи разработали надлежащие методы контроля и стратегии для сокращения объема эрозии почвы. Общая площадь, пострадавшая от эрозии почвы в Азии, составляет

663 млн га. Эрозия почв является одной из основных экологических проблем в Китае, где потеря почвы в основном наблюдается на залежных и сельскохозяйственных землях. В Индии деградация земель, вызванная эрозией, происходит из-за неправильных методов ведения сельского хозяйства. В Индонезии высокий уровень эрозии почвы вызван ненадлежащим ведением сельскохозяйственной деятельности на очень крутых склонах (более 15 %) и возделыванием этих земель без каких-либо защитных мер. Ежегодно в Азии проводится множество исследований методов контроля эрозии почвы с точки зрения управления. Исследования посвящены влиянию различных способов управления, таких, как вспашка, применение мульчирования, возделывание покровных и промежуточных культур на образование стока и процесс эрозии. Результаты исследований за 6 лет показали, что технология обработки почвы и мульчирование доминируют среди видов природоохранных мероприятий, используемых для борьбы с эрозией почвы, и составляют 22,73 и 21,21 % соответственно. Далее следует возделывание покровных культур – 18,18 %, выращивание трав – 15,15 % [16]. В результате полевого эксперимента, проведенного на склоновых сельскохозяйственных угодьях в холмистых районах Южного Китая, было установлено, что поперечная гребневая обработка снижает среднегодовой сток на 6,11–64,2 % по сравнению с традиционной обработкой [17].

Большая часть исследований как склонового стока, так и диффузного загрязнения носит локальный характер, а сток и диффузное загрязнение рассматриваются изолированно друг от друга. Цель исследования – обоснование комплекса водоохранных и мелиоративных мероприятий, направленных на предотвращение негативного воздействия источников диффузного загрязнения на качество воды в бассейнах малых рек, сокращение почвенной эрозии и восстановление элементов экологического каркаса на примере бассейна р. Казанка.



Рисунок 1 – Водоудерживающая способность противоэрозионных приемов

Figure 1 – Water-retaining capacity of erosion-preventive techniques

Материалы и методы исследований. Объектом исследований является бассейн р. Казанка – левого притока р. Волга, протекающего в Республике Татарстан. Водосбор р. Казанки представляет слабоволнистую асимметричную равнину, расчлененную речными долинами многочисленных притоков. Определена площадь водосбора на основе ГИС-моделей с применением OSM и SRTM карт (работы выполнены ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова»), которая составляет 2002,41 км². Освоенная сельскохозяйственная площадь занимает более чем 70–80 %. Пашней занята большая часть территории бассейна. В структуре сельскохозяйственного производства преобладают зерновые и зернобобовые культуры, доля которых составляет 40 %.

Правобережная часть водосбора наклонена в сторону р. Казанка, преобладающие уклоны 2–3°, максимальные уклоны составляют около 5°. Бассейн р. Казанка разделен на 8 подбассейнов (Атынка, Вереженка, Ия, Казанка, Кисьмесь, Красная, Сула, Шимяковка), которые в свою очередь разделены на 125 субподбассейнов с площадью преимущественно от 2 до 50 км² (рисунок 2).

Методологическую основу исследований составили нормативные документы, приказы и постановления правительства по проблемам негативного воздействия источников диффузного загрязнения на качество воды; труды отечественных и зарубежных ученых, разработки ведущих специалистов. В процессе разработки противоэрозионных мероприятий исходили из природной специфики региона, основываясь на анализе природно-климатических условий, особенностей рельефа, свойств почв и растительного покрова, а также экономики развития сельскохозяйственного производства.

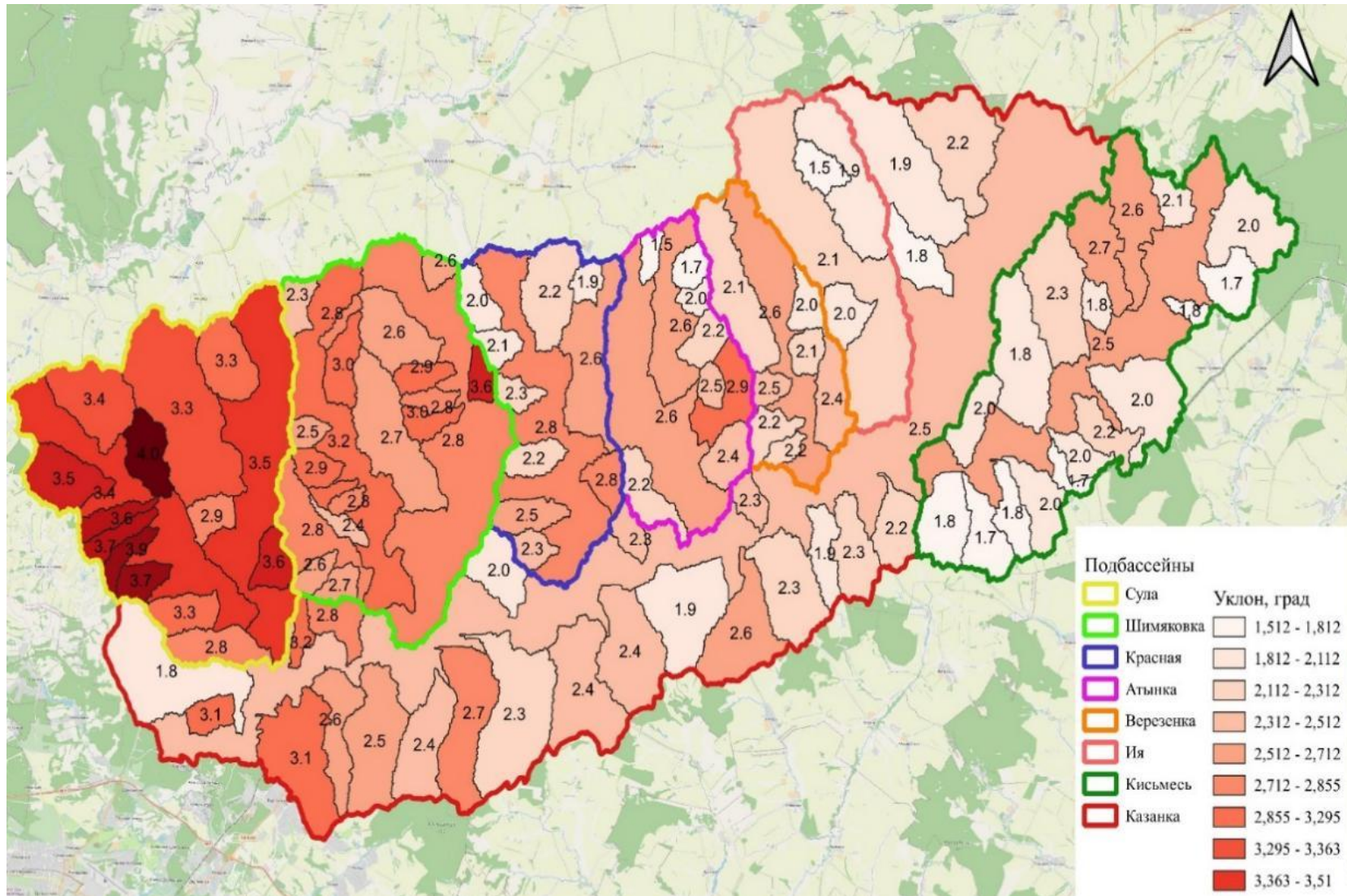


Рисунок 2 – Карта бассейна р. Казанка
 Figure 2 – Map of the Kazanka River basin

Для выполнения оценки экологической устойчивости ландшафта бассейна р. Казанка были применены методические подходы, приведенные в работе [18], в основу которой положено определение коэффициента экологической стабильности (КЭСЛ) с учетом качественного состояния элементов агроландшафта:

$$КЭСЛ = \frac{\sum (P_i \cdot K_{эз}) \cdot K_{г\gamma}}{P \cdot K_{эз}}, \quad (1)$$

где $(P_i \cdot K_{эз})$ – площадь i -го биотического элемента (отдельных угодий) с учетом их коэффициентов значимости;

P – общая площадь агроландшафта;

$K_{эз}$ – коэффициент экологической значимости, который принимается в зависимости от биотического элемента, входящего в структуру землепользования в конкретном подбассейне (таблица 1);

$K_{г\gamma}$ – коэффициент геоморфологической устойчивости: для устойчивых материальных пород равен 1 (стабильные), для песков, оползней, оврагов – 0,7 (нестабильные).

Таблица 1 – Коэффициент экологической значимости для отдельных биотических элементов

Table 1 – Ecological significance coefficient for individual biotic elements

Биотический элемент	$K_{эз}$
Лиственные леса	1
Застройки и дороги	0
Пашня	0,14
Яровые зерновые:	
- при крутизне до 1,5°	0,4
- при крутизне от 1,5° до 2,5°	0,3
- при крутизне от 2,5° до 3°	0,2
- при крутизне более 3°	0,1
Многолетние травы	0,97
Орошение	1
Луга, сенокосы, кустарники, балки	0,62
Пастбища	0,68
Водоемы и водотоки	0,79
Гидротехнические сооружения	0,97
Животноводческие комплексы, необустроенные	0
Современные животноводческие комплексы	1

Градация коэффициента экологической стабильности ландшафта дана в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка коэффициента экологической стабильности ландшафта [18]

Table 2 – Assessment of the landscape ecological sustainability coefficient [18]

Коэффициент экологической стабильности ландшафта	Характеристика ландшафта
0–0,25	Ярко выраженный нестабильный
0,25–0,33	Нестабильный
0,33–0,5	Малостабильный
0,5–0,66	Стабильный
0,66–1	Ярко выраженный стабильный

Результаты и обсуждения. Для оценки экологической устойчивости территории бассейна с помощью космоснимков (Landsat), имеющихся географических карт и данных Минсельхоза Республики Татарстан была определена текущая структура землепользования с указанием площадей (сенокосы, пашня, лес, водные объекты, поселения, орошаемые земли, фермы) (таблица 3), составлена электронная карта сельскохозяйственного использования и рассчитаны по вышеприведенной формуле коэффициенты экологической стабильности по всем подбассейнам (таблица 4).

Таблица 3 – Исходные данные по структуре землепользования территории бассейна реки Казанка

Table 3 – Initial data on the land-use pattern of the Kazanka River basin

Наименование подбассейн	Sсен, км ²	Spаш, км ²	Slес, км ²	Swод, км ²	Sгор, км ²	Sор, км ²	Sarea, км ²	Средний уклон, град.	Sферм, км ²
Сула	33,13	213,19	17,53	0,11	7,10	0,00	271,21	3,46	0,15
Шимковка	33,68	206,77	12,69	0,21	5,12	0,00	258,59	2,81	0,12
Красная	19,42	116,80	2,72	0,00	4,73	0,93	144,65	2,33	0,045
Атынка	16,10	103,26	2,06	0,01	4,40	3,70	129,61	2,25	0,075
Верезенка	8,56	69,16	10,61	0,04	5,51	2,42	96,39	2,25	0,09
Ия	9,44	90,08	7,81	0,02	6,46	2,22	116,165	1,9	0,135
Кисьмесь	18,35	183,82	85,77	0,86	8,95	3,31	301,27	1,93	0,21
Казанка	40,65	452,44	129,53	2,98	51,92	6,61	684,52	2,39	0,39

Примечание – Sсен – площадь сенокосов; Spаш – площадь пашни; Slес – площадь леса; Swод – площадь водных объектов; Sгор – площадь поселений; Sor – площадь орошаемых земель; Sarea – общая площадь; Sферм – площадь, занимаемая фермами.

Таблица 4 – Коэффициенты экологической стабильности ландшафта
Table 4 – Landscape ecological sustainability coefficients

Наименование подбассейна	КЭСЛ	Характеристика ландшафта
Атынка	0,36	Малоустойчивый
Верезенка	0,37	Малоустойчивый
Ия	0,37	Малоустойчивый
Казанка	0,4	Малоустойчивый
Кисьмесь	0,52	Устойчивый
Красная	0,31	Неустойчивый
Сула	0,22	Ярко выраженный неустойчивый
Шимяковка	0,32	Неустойчивый

На водосборе р. Казанка ярко выраженной неустойчивостью характеризуется подбассейн Сула, неустойчивым – подбассейн Шимяковка. Эти подбассейны расположены ближе к устью реки. Устойчивым можно считать только один подбассейн – Кисьмесь; малоустойчивыми – Атынка, Верезенка, Ия и Красная, расположенные в верховьях реки (рисунок 3).

Устойчивость подбассейнов снижается от истока к устью, ярко выраженная неустойчивость характерна для подбассейнов Сула и Шимяковка, находящихся в нижнем течении реки. Там же наблюдаются деградиционные процессы, приводящие к эрозии почвы и формированию диффузного стока, влекущие за собой ухудшение качества воды в р. Казанка.

Для обоснования мероприятий по предотвращению эрозионных процессов и снижения диффузного загрязнения рассмотрен подбассейн Сула, площадью водосбора 271,21 км². Водосбор р. Сула находится в зоне активного проявления водной и ветровой эрозии, поэтому в качестве приоритетного направления выбрано усиление экологического каркаса. Для этого целесообразно использовать защитные лесные насаждения. К ним относятся водорегулирующие лесные полосы на склонах крутизной 3–5°, 5–8°, приовражные и прибалочные лесные полосы, сплошное залесение днищ и бровок оврагов и балок. Система взаимосвязанных лесополос должна обеспечивать равномерное распространение влаги по территории водосборного бассейна и выполнять защитные функции для агроценозов при интенсивном использовании водосбора. При устройстве водорегулирующих ле-

сополос рекомендуется одновременно применять простейшие земляные гидротехнические сооружения для регулирования поверхностного стока по склонам водосборной площади. Устройство водорегулирующих и водозадерживающих валов по низовой опушке обустраиваемой лесной полосы позволит сохранить запасы влаги внутри лесонасаждений. Новые защитные лесополосы рекомендуется создавать четырехрядными. Расстояния между рядами принимаем 3 м для механизированного ухода за саженцами. Расстояние между саженцами в рядах 1–1,5 м. Конструкция лесополосы подбирается с учетом ветровой нагрузки и наличия полевых дорог: непродуваемая (просветов нет ни в нижнем, ни в верхнем высотном ярусе, состав: главная, сопутствующая порода и кустарники), ажурная (равномерные просветы), продуваемая (просветы в нижнем ярусе, в кронах просветы малы), полупродуваемая (в нижнем ярусе и в кронах есть просветы).

В процессе исследований в подбассейне Сула были выделены существующие участки леса (1846 га) и существующие лесополосы (342 га). На критических участках с уклонами 5–8° были намечены лесные полосы 1-й очереди, дополненные необходимыми гидротехническими сооружениями. На остальных участках размещены лесные полосы 2-й очереди (рисунок 4). По расчетам лесные культуры потребуются высадить на площади 890 га (3,3 % водосбора Сулы), а дополнительные лесополосы займут 551 га (2,0 %). После осуществления проекта площадь, занятая лесом и лесополосами, составит 3629 га (13,4 % водосбора Сулы).

Кроме того, для снижения эрозионных процессов в подбассейне Сула необходимо ввести почвозащитные севообороты с большой долей многолетних трав на общей площади 2313 га, залужение сельскохозяйственных угодий на сенокосах после фрезерования на площади 3313 га, а также создание биологических барьеров. Для снижения поверхностного стока на площади 1897 га следует предусмотреть выше вершин оврагов водоотводные каналы для перехвата и отвода склоновых вод или земляные сооружения, обеспечивающие водозадержание.

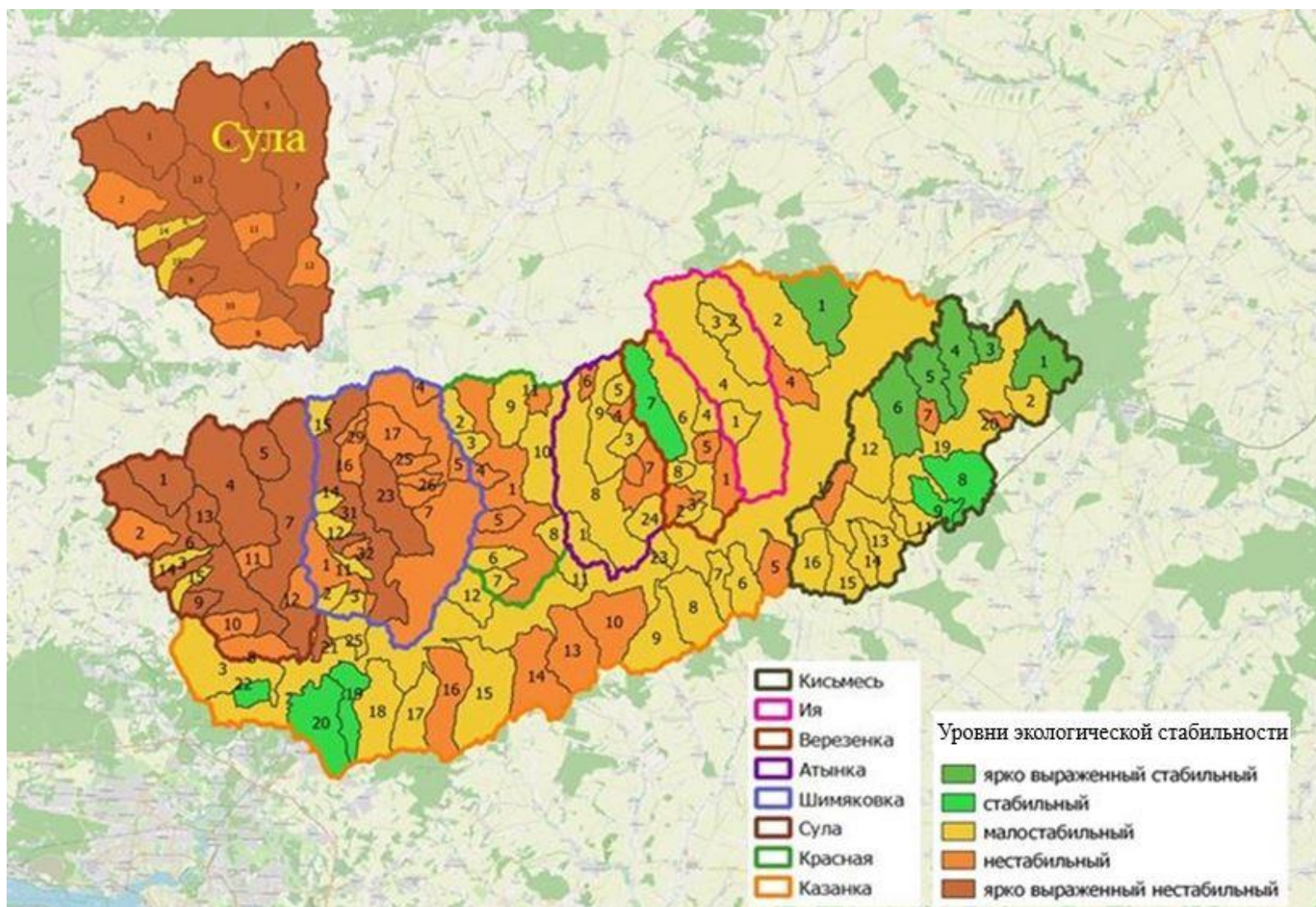
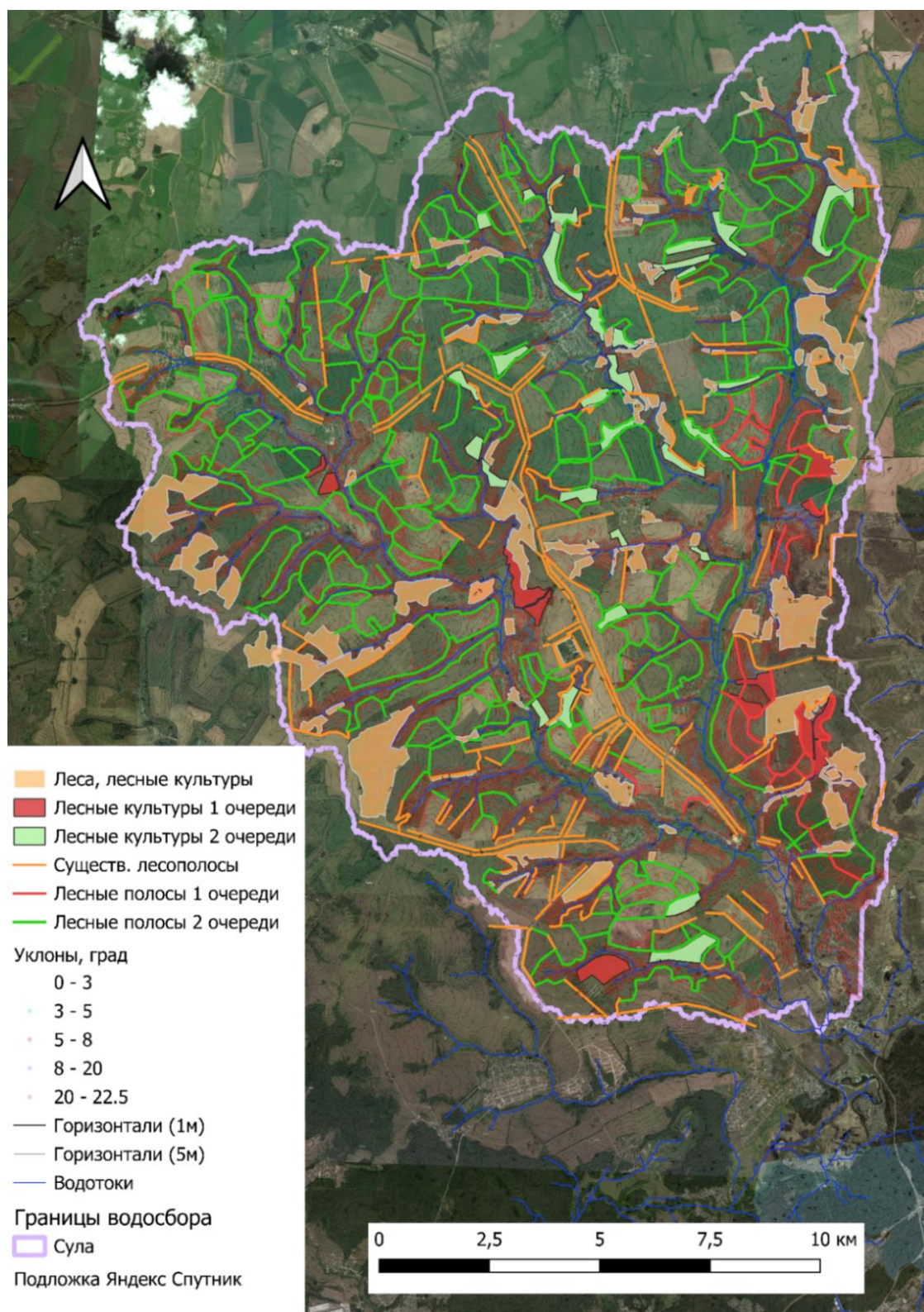


Рисунок 3 – Карта экологической стабильности бассейна р. Казанка в современном состоянии
Figure 3 – Map of ecological sustainability of the Kazanka River basin in its current state



оранжевые – лесополосы существующие; зеленые и красные – намечаемые водорегулирующие и приовражные лесополосы
orange – existing forest belts; green and red – planned water-regulating and gully forest belts

**Рисунок 4 – Экологический каркас водосбора р. Сула
(межхозяйственный уровень)**

Figure 4 – Ecological frame of the Sula River catchment area (inter-farm level)

С целью снижения концентрации диффузного стока рекомендуется на существующих фермах, расположенных на площади 15 га, предусмотреть создание навозохранилищ и выгульных площадок, а сточные воды после соответствующей подготовки утилизировать на орошение многолетних трав. За счет выполнения данных мероприятий величина задержанного стока может уменьшиться до 30–60 % и рассматриваемый водосбор перейдет в малостабильную категорию (таблица 5).

Выполненный расчет устойчивости подбассейна Сула р. Казанка показал, что намеченные мероприятия позволяют перевести агроландшафт из критического состояния с ярко выраженной нестабильностью в малостабильный. Следует заметить, что разработанный комплекс достаточно легко реализуем и малозатратен и является первоочередным мероприятием по снижению экологического риска. Для перевода данного подбассейна в следующую категорию – стабильную – потребуется проведение натурных исследований и изысканий для проектирования лесомелиоративных и гидротехнических мероприятий. Дальнейшее снижение риска будет возможно только при изменении структуры землепользования путем сокращения пашни, введения в севооборот стабилизирующих культур (культур-фитомелиорантов), а также насыщение экологического каркаса лесными посадками.

Аналогично подбассейну Сула были выполнены расчеты по остальным подбассейнам и обоснован комплекс мероприятий по восстановлению экологического каркаса. Рекомендованные комплексы мероприятий позволяют обоснованно снижать поверхностный твердый и жидкий сток, а значит и вынос загрязняющих веществ с диффузным стоком с водосбора в речную сеть.

Мероприятия разработаны с учетом уклонов местности, длины склона и существующего контура сельскохозяйственных полей (рисунок 5).

Таблица 5 – Исходные данные по структуре землепользования и показатели оценки стабильности по подбассейну Сула до и после проведения мероприятий

Table 5 – Initial data on land-use pattern and sustainability assessment indicators for the Sula sub-basin before and after the measures implementation

Показатель	Площадь, км ²														
	Субподбассейны подбассейна Сула														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Сенокосы	3,16	1,44	1,11	4,48	1,57	6,03	6,19	2,10	1,29	1,50	1,45	0,61	0,98	0,76	0,45
Пашня	15,61	10,19	4,26	39,66	11,53	37,83	49,62	9,52	4,48	6,17	4,57	5,63	8,70	2,78	2,61
Лес	0,06	2,56	0,33	1,91	0,16	1,08	4,96	0,05	0,21	0,75	0,03	1,01	0,86	1,75	1,80
Водные объекты	0,00	0,01	0,00	0,00	0,08	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Поселения	0,31	0,40	0,00	2,22	0,58	1,59	1,51	0,12	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
Земли, занятые фермами	0,015	0,015	0	0,03	0	0,06	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0
Общая площадь	19,15	14,61	5,70	48,30	13,92	46,62	62,32	11,80	5,98	8,66	6,06	7,25	10,55	5,30	5,00
Уклон, град.	3,363	3,541	3,684	3,311	3,295	3,441	3,510	2,783	3,708	3,288	2,855	3,581	4,034	3,646	3,921
КЭСЛ до проведения мероприятий	0,19	0,31	0,25	0,18	0,17	0,19	0,22	0,28	0,24	0,27	0,30	0,27	0,22	0,47	0,47
Характеристика ландшафта до мероприятий	Ярко выраженный нестабильный	Нестабильный	Ярко выраженный нестабильный					Нестабильный	Ярко выраженный нестабильный	Нестабильный			Ярко выраженный нестабильный	Малостабильный	
КЭСЛ после проведения мероприятий	0,38	0,41	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,41	0,38	0,41	0,41	0,41	0,38	0,59	0,59
Характеристика ландшафта после мероприятий	Малостабильный													Стабильный	

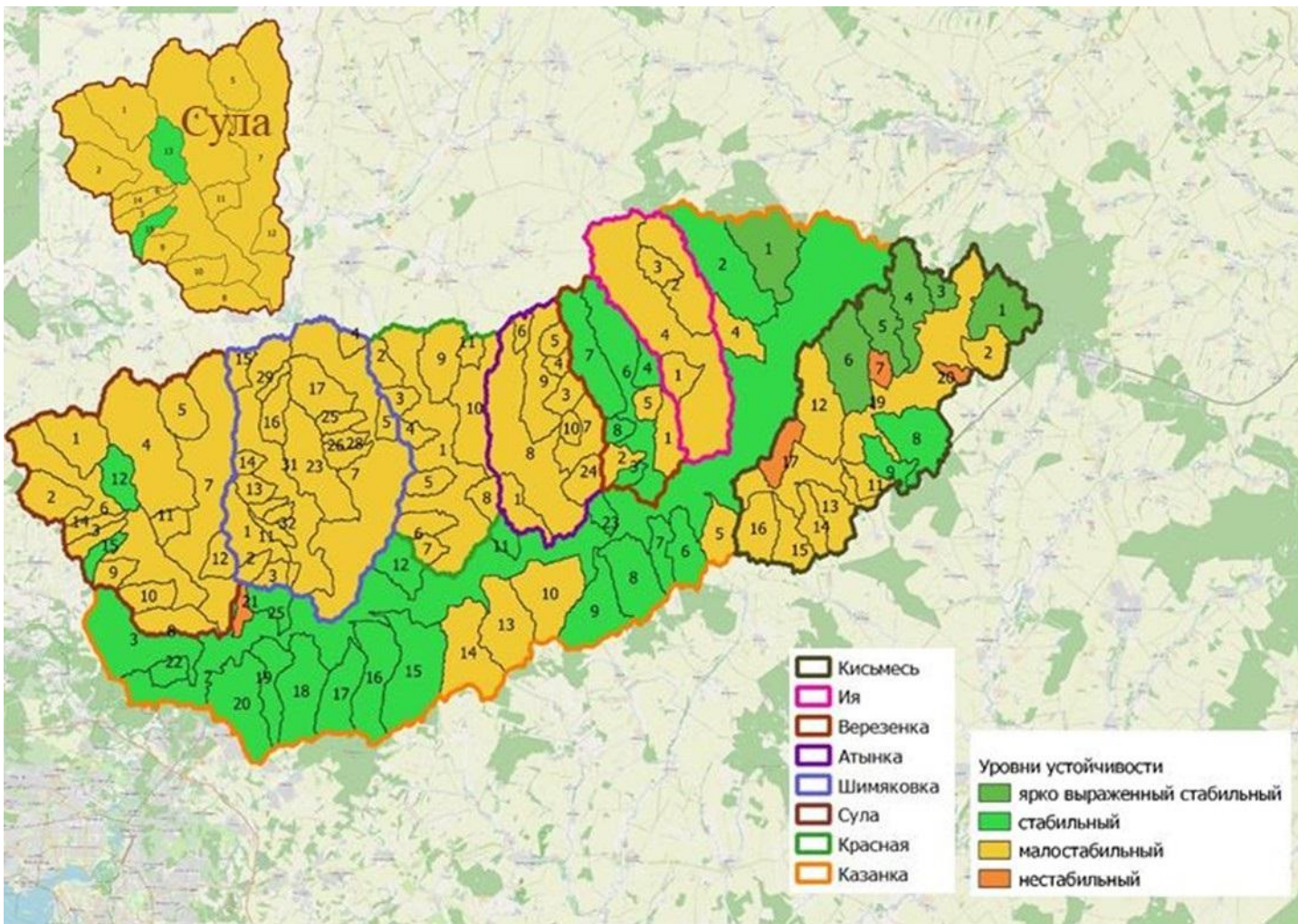


Рисунок 5 – Карта экологической стабильности бассейна р. Казанка после проведения комплекса мероприятий по восстановлению экологического каркаса
Figure 5 – Map of ecological sustainability of the Kazanka River basin after a complex of measures for restoring the ecological frame

Экономическая эффективность защитных лесных насаждений и залужения определялась путем сопоставления всех затрат, связанных с созданием лесополос и возможного дохода от снижения экологического ущерба после проведения противоэрозионных мероприятий. Основой для расчета затрат на 1 га лесополос служили расценки ФЕР-47 «Озеленение, защитные лесонасаждения». Были учтены следующие виды работ:

- подготовка почвы к созданию лесных культур на лесных участках механизированным способом – 45 тыс. руб./га;
- заказ посадочного материала – 2500 шт./га по цене 16 руб. за единицу – 40 тыс. руб./га;
- доставка посадочного материала на место проведения работ 2500 шт./га по цене 0,5 руб. за единицу – 1250 руб./га;
- транспортные расходы 2000 руб./га.

На основании данных, подготовленных руководителем службы информационно-консультационного обслуживания АПК Республики Татарстан М. Д. Исаевым, стоимость 1 га залужения сельскохозяйственных угодий принята 9000 руб./га (ГСМ + фонд зарплаты + амортизация и текущий ремонт + семена + основное удобрение + уборка травостоев в первый год), а прибыль от залужения, полученная в 1-й год, составляет 1892 руб./га.

Таким образом, в подбассейне Сула затраты на создание и выращивание лесных полос составили 25 504 250 руб., затраты на залужение – 29 817 000 руб. Прибыль от залужения составила 6 268 196 руб., а доход от снижения экологического ущерба – 1 944 791,26 руб. Срок окупаемости 6–7 лет.

Расчет экономической эффективности агролесомелиоративных мероприятий по всем подбассейнам бассейна р. Казанка показал, что затраты на залужение многолетними травами площадей сенокосов и введение дополнительных площадей для защитных лесонасаждений окупаются уже в течение 5–7 лет.

В рамках проектирования водорегулирующих лесных полос на территории подбассейна Сулы был выбран ярко выраженный нестабильный участок склона, для которого был проведен расчет смыва почвы до водорегулирующих мероприятий и после (таблица 6). Как видно из таблицы 6, при создании лесополос смыв почвы снизится более чем в 2 раза, а значит, уменьшится и диффузное загрязнение р. Казанка.

Таблица 6 – Расчет эффективности водорегулирующих мероприятий для участка склона в подбассейне Сула до и после проведения мероприятий

Table 6 – Calculation of water regulation measures efficiency for a slope section in the Sula sub-basin before and after the measures were taken

Характеристика	Единица измерения	Значение показателя
Текущее состояние процесса смыва		
Склон на участке с кадастровым номером		16:16:000000:10162
Площадь склона	га	283,7756
Средняя длина линий стока по склону	м	1800
Средняя крутизна склона	град	2
Максимальный смыв по зяби	т/га в год	29,0
Средний смыв по зяби	т/га в год	14,6
Расчетные значения параметров после создания лесополос (водорегулирующих мероприятий)		
Расстояние между водорегулирующими лесополосами (короткий гон, линия стока)	м	500
Расстояние между вспомогательными лесополосами (длинный гон)	м	700–800
Максимальный смыв по зяби	т/га в год	9,3
Средний смыв по зяби	т/га в год	7,3
Уклон вдоль трассы водорегулирующей лесополосы	град.	0,5
Длина линии стока вдоль лесополосы	м	700
Средний смыв почв вдоль лесополосы	т/га в год	2,2
Протяженность лесополос:		
- водорегулирующих	м	3572
- приовражных	м	7982
- всего по склону	м	11554
Площадь отвода под лесополосы	га	17,3
Покрыто лесом площади склона (без учета оврагов и балок)	%	6

Выводы. Выполненный анализ природно-хозяйственных условий, сельскохозяйственного использования территории и антропогенной на-

груженности бассейна р. Казанка позволил выявить главные источники загрязнения, основным из которых является диффузный сток с сельскохозяйственных полей и сельскохозяйственных предприятий, осложненный эрозионными процессами смыва почвы.

Для выполнения оценки экологической устойчивости ландшафта бассейна р. Казанка были применены методические подходы, основанные на определении коэффициента экологической стабильности (КЭСЛ) с учетом качественного состояния элементов агроландшафта. Выполнены расчеты экологической устойчивости обоснования комплекса мероприятий по восстановлению экологического каркаса по подбассейнам бассейна р. Казанка. В таблице 7 приведены данные по КЭСЛ до и после мероприятий.

Таблица 7 – Показатели оценки экологической стабильности по подбассейнам бассейна р. Казанки

Table 7 – Assessment indicators of ecological sustainability by sub-basins of the Kazanka River basin

Наименование подбассейна	КЭСЛ (до мероприятий)	Характеристика ландшафта	КЭСЛ (после проведения мероприятий)	Характеристика ландшафта
Атынка	0,36	Малоустойчивый	0,46	Малоустойчивый
Верезенка	0,37	Малоустойчивый	0,5	Устойчивый
Ия	0,37	Малоустойчивый	0,48	Малоустойчивый
Казанка	0,4	Малоустойчивый	0,48	Малоустойчивый
Кисьмесь	0,52	Устойчивый	0,52	Устойчивый
Красная	0,31	Нестойчивый	0,42	Малоустойчивый
Сула	0,22	Ярко выраженный неустойчивый	0,4	Малоустойчивый
Шимяковка	0,32	Ярко выраженный неустойчивый	0,45	Малоустойчивый

На основании анализа территории всех подбассейнов были выполнены рекомендуемые мероприятия с целью повышения экологической устойчивости агроландшафтов. Для снижения диффузного выноса биогенных веществ в водные объекты бассейна р. Казанка с сельскохозяйственных полей, занимающих почти 80 % территории водосбора, следует пересмотреть структуру севооборотов в плане увеличения доли многолетних

трав. С целью снижения смыва почвы и предотвращения ее деградации в связи с разрушением и истощением почвенного покрова, вызванного развитием водной эрозии, рекомендуется провести реконструкцию действующих лесополос, проектирование и создание дополнительных лесополос.

Разработку и введение почвозащитных севооборотов, залужение сельскохозяйственных угодий следует отнести к противоэрозионным мероприятиям, которые можно реализовать в ближайшее время и без существенных затрат. Реконструкция действующих лесополос, проектирование и создание дополнительных лесополос будут являться перспективными приемами, которые позволят предотвратить эрозию и тем самым добиться систематического повышения плодородия почвы.

Список источников

1. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения: коллективная монография / под рук. В. И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с. EDN: CBLCTD.
2. Кирейчева Л. В., Лентяева Е. А. Влияние сельскохозяйственного производства на загрязнение водных объектов // Природообустройство. 2020. № 5. С. 18–26. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-18-27. EDN: OMUCXC.
3. Долгов С. В., Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А. Особенности современного формирования стока биогенных веществ в центральной части Русской равнины // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 136–145. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-9. EDN: AGVCUD.
4. Оценка диффузного загрязнения от сельскохозяйственных территорий в бассейне верхней Волги и разработка мероприятий по его снижению на примере реки Яхromы / Л. В. Кирейчева, Е. А. Лентяева, А. Д. Тимошкин, В. М. Яшин // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 523–535. DOI: 10.31857/S0321059620050090. EDN: ATENTA.
5. Антропогенная нагрузка и влияние водосбора на диффузный сток биогенных элементов в крупный водный объект (на примере водосбора Чебоксарского водохранилища) / С. В. Ясинский, Е. А. Кашутина, М. В. Сидорова, А. Н. Нарыков // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 5. С. 630–648. DOI: 10.31857/S0321059620050223. EDN: FXROOC.
6. К обоснованию мероприятий по предотвращению диффузного загрязнения поверхностных водных объектов при орошении на основе имитационного моделирования / В. В. Бородычев, А. Л. Бубер, С. Д. Исаева, Ю. П. Добрачев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 3(55). С. 323–332. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-03-41. EDN: ITERGW.
7. Бубер А. А., Талызов А. А. Подготовка исходных данных для исследования влияния сельскохозяйственных угодий на бассейн реки Малый Караман // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных агротехнологий: материалы междунар. науч.-практ. конф., Рязань: Изд-во РГАТУ, 2019. С. 35–39.
8. Маркин В. Н., Шабанов В. В. Ранжирование водохозяйственных мероприятий: монография. М.: Российский ГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2016. 83 с. EDN: XUAJPR.

9. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты / Л. Д. Раткович, В. Н. Маркин, И. В. Глазунова, С. А. Соколова // Природообустройство. 2016. № 3. С. 64–75. EDN: XUAJPR.

10. Cantoni J., Kalantari Z., Destouni G. Legacy contributions to diffuse water pollution: Data-driven multi-catchment quantification for nutrients and carbon // Science of The Total Environment. 2023. Vol. 879. Article number: 163092. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163092. EDN: WJASMU.

11. Investigation of correlation between surface runoff rate and stream water quality / S. Jang, H. Ji, J. Choi, K. Suh, H. Kim // Water Science and Technology: Water Supply. 2021. Vol. 21, no. 4. P. 1495–1505. DOI: 10.2166/ws.2021.023. EDN: XWLFKS.

12. Состояние и основные направления развития землеустройства в Российской Федерации: монография / под науч. ред. С. Н. Волкова; Гос. ун-т по землеустройству. М., 2006. С. 147–206.

13. Полуэктов Е. В. Эрозия почв и плодородие. Новочеркасск: Лик, 2020. 229 с. EDN: IILMX.

14. Корнилов И. М., Турусов В. И. Эффективность противоэрозионных систем обработки почвы на склоновых землях Юго-Востока ЦЧЗ: монография. Воронеж: Изд-во «Истоки», 2021. 254 с. EDN: JJIVQG.

15. Полуэктов Е. В., Сухомлинова Н. Б. Анализ эффективности почвозащитных приемов и мероприятий по их стокорегулирующей способности // Мелиорация и гидротехника [Электронный ресурс]. 2022. Т. 12, № 1. С. 99–118. URL: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1263> (дата обращения: 27.01.2025). DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-99-118. EDN: BSVHQT.

16. A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia / N. S. B. Nasir Ahmad, F. B. Mustafa, S. Y. Muhammad Yusoff, G. Didams // International Soil and Water Conservation Research. 2020. Vol. 8, iss. 2. P. 103–115. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.04.001. EDN: DBCJUZ.

17. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farmlands in southern hilly regions of China / S. Guo, L. Zhai, J. Liu, H. Liu, A. Chen, H. Wang, S. Wu, Q. Lei // Soil and Tillage Research. 2019. Vol. 191. P. 48–56. DOI: 10.1016/j.still.2019.03.015.

18. Система оценки устойчивости агроландшафтов для формирования экологически сбалансированных агроландшафтов / Н. П. Масютенко, Н. А. Чуян, Г. И. Бахирев, А. В. Кузнецов, Г. М. Брескина, Е. В. Дубовик, М. Н. Масютенко, Т. И. Панкова, А. Г. Калужских. Курск: Изд-во «ТОП», 2013. 50 с. EDN: WIFMTN.

References

1. Danilov-Danilyan V.I., 2020. *Diffuznoye zagryaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniya: kollektivnaya monografiya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems and Solutions: collective monograph]. Moscow, RAS, 512 p., EDN: CBLCTD. (In Russian).

2. Kireycheva L.V., Lentiaeva E.A., 2020. *Vliyanie sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na zagryaznenie vodnykh ob'ektov* [The influence of agricultural production on pollution of water bodies]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 5, pp. 18-26, DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-18-27, EDN: OMUCXC. (In Russian).

3. Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Barabanova E.A., 2020. *Osobennosti sovremennogo formirovaniya stoka biogennykh veshchestv v tsentral'noy chasti Russkoy ravniny* [Special features of the contemporary biogens runoff formation in the central part of the Russian Plain]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], no. 2, pp. 136-145, DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-9, EDN: AGVCDU. (In Russian).

4. Kireycheva L.V., Lentiaeva E.A., Timoshkin A.D., Yashin V.M., 2020. *Otsenka diffuznogo zagryazneniya ot sel'skokhozyaystvennykh territoriy v bassejne verkhney Volgi i razrabotka meropriyatiy po ego snizheniyu na primere reki Yakhromy* [The assessment of the diffuse pollution from agricultural territories in the Upper Volga basin and the development of measures to reduce it: case study of the Yakhroma River]. *Vodnye resursy* [Water Resources], vol. 47, no. 5, pp. 523-535, DOI: 10.31857/S0321059620050090, EDN: ATENTA. (In Russian).

5. Yasinsky S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Narykov A.N., 2020. *Antropogennaya nagruzka i vliyanie vodosbora na diffuznyy stok biogennykh elementov v krupnyy vodnyy ob'ekt (na primere vodosbora Cheboksarskogo vodokhranilishcha)* [Anthropogenic load and the effect of drainage area on the diffuse runoff of nutrients into a large water body: case study of the Cheboksary Reservoir]. *Vodnye resursy* [Water Resources], vol. 47, no. 5, pp. 630-648. DOI: 10.31857/S0321059620050223, EDN: FXROOC. (In Russian).

6. Borodychev V.V., Buber A.L., Isaeva S.D., Dobrachev Yu.P., 2019. *K obosnovaniyu meropriyatiy po predotvrashcheniyu diffuznogo zagryazneniya poverkhnostnykh vodnykh ob'ektov pri oroshenii na osnove imitatsionnogo modelirovaniya* [Justification of protective measures against diffuse pollution of surface water objects during irrigation based on simulation]. *Izvestiya Nizhne-volzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [Proceed. of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education], no. 3(55), pp. 323-332, DOI: 10.32786/2071-9485-2019-03-41, EDN: ITEPGW. (In Russian).

7. Buber A.A., Talyzov A.A., 2019. *Podgotovka iskhodnykh dannykh dlya issledovaniya vliyaniya sel'skokhozyaystvennykh ugodiy na basseyn reki Malyy Karaman* [Preparation of initial data for the study of the impact of agricultural land on the Maly Karaman River basin]. *Ekologicheskoe sostoyanie prirodnoy sredy i nauchno-prakticheskie aspekty sovremennykh agrotekhnologiy: materialy mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecological State of Natural Environment and Scientific and Practical Aspects of Modern Agro-Technologies: Proceed. of the International Scientific-Practical Conference]. Ryazan, RGATU Publ., pp. 35-39. (In Russian).

8. Markin V.N., Shabanov V.V., 2016. *Ranzhirovanie vodokhozyaystvennykh meropriyatiy: monografiya* [Ranking of Water Management Measures: monograph]. Moscow, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, 83 p., EDN: XUAJPR. (In Russian).

9. Ratkovich L.D., Markin V.N., Glazunova I.V., Sokolova S.A., 2016. *Faktory vliya-niya diffuznogo zagryazneniya na vodnye ob'ekty* [Factors of influence of diffuse pollution on water bodies]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 64-75, EDN: XUAJPR. (In Russian).

10. Cantoni J., Kalantari Z., Destouni G., 2023. Legacy contributions to diffuse water pollution: Data-driven multi-catchment quantification for nutrients and carbon. *Science of The Total Environment*, vol. 879, Article number: 163092, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163092, EDN: WJASMU.

11. Jang S., Ji H., Choi J., Suh K., Kim H., 2021. Investigation of correlation between surface runoff rate and stream water quality. *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 21, no. 4, pp. 1495-1505, DOI: 10.2166/ws.2021.023, EDN: XWLFKS.

12. Volkov S.N., 2006. *Sostoyanie i osnovnye napravleniya razvitiya zemleustroystva v Rossiyskoy Federatsii: monografiya* [The State and Main Directions of Land Management Development in the Russian Federation: monograph]. State University of Land Management. Moscow, pp. 147-206. (In Russian).

13. Poluektov E.V., 2020. *Eroziya pochv i plodorodie* [Soil Erosion and Fertility]. Novocherkassk, Lik Publ., 229 p., EDN: IIILMX. (In Russian).

14. Kornilov I.M., Turusov V.I., 2021. *Effektivnost' protiverozionnykh sistem obrabotki pochvy na sklonovykh zemlyakh Yugo-Vostoka TSCHZ: monografiya* [Efficiency of Anti-Erosion Soil Cultivation Systems on Sloping Lands of the South-East of the Central Chernozem Region: monograph]. Voronezh, Istoki Publ., 254 p., EDN: JJIVQG. (In Russian).

15. Poluektov E.V., Sukhomlinova N.B., 2022. *Analiz effektivnosti pochvozaschitnykh priemov i meropriyatiy po ikh stokoreguliruyushchey sposobnosti* [Analysis of the efficiency of soil conservation practices and measures for their flow-regulating ability]. *Melioratsiya i gidrotekhnika* [Land Reclamation and Hydraulic Engineering], vol. 12, no. 1, pp. 99-118, available: <https://rosniipm-sm.ru/article?n=1263> [accessed 27.01.2025], DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-1-99-118, EDN: BSVHQT. (In Russian).

16. Nasir Ahmad N.S.B., Mustafa F.B., Muhammad Yusoff S.Y., Didams G., 2020. A systematic review of soil erosion control practices on the agricultural land in Asia. *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 8, iss. 2, pp. 103-115, DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.04.001, EDN: DBCJUZ.

17. Guo S., Zhai L., Liu J., Liu H., Chen A., Wang H., Wu S., Lei Q., 2019. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farm-lands in southern hilly regions of China. *Soil and Tillage Research*, vol. 191, pp. 48-56, DOI: 10.1016/j.still.2019.03.015.

18. Masyutenko N.P., Chuyan N.A., Bakhirev G.I., Kuznetsov A.V., Breskina G.M., Dubovik E.V., Masyutenko M.N., Pankova T.I., Kaluzhskikh A.G., 2013. *Sistema otsenki ustoychivosti agrolandshaftov dlya formirovaniya ekologicheskoi sbalansirovannykh agrolandshaftov* [System for Assessing the Agricultural Landscape Sustainability for the Formation of Ecologically Balanced Agricultural Landscapes]. Kursk, TOP Publ., 50 p., EDN: WIFMTN. (In Russian).

Информация об авторах

Л. В. Кирейчева – руководитель научного направления, доктор технических наук, профессор, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Москва, Российская Федерация, kireychevalw@mail.ru, SPIN-код: 3319-5340, AuthorID: 105946, ORCID: 0000-0002-7114-2706;

Е. В. Ангольд – старший научный сотрудник, кандидат технических наук, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Москва, Российская Федерация, angold-elena@mail.ru, SPIN-код: 5626-1260, AuthorID: 927399, Scopus ID: 56436764200;

Ю. С. Кузнецов – младший научный сотрудник, Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, Москва, Российская Федерация, kuzneczovu@yandex.ru, SPIN-код: 1271-1577, AuthorID: 1220419.

Information about the authors

L. V. Kireicheva – Head of the Scientific Direction, Doctor of Technical Sciences, Professor, All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation, kireychevalw@mail.ru, SPIN-code: 3319-5340, AuthorID: 10594, ORCID: 0000-0002-7114-2706.

Ye. V. Angold – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences, All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation, angold-elena@mail.ru, SPIN-code: 5626-1260, AuthorID: 927399, Scopus ID: 56436764200.

Yu. S. Kuznetsov – Junior Researcher, All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation, kuzneczovu@yandex.ru, SPIN-code: 1271-1577, AuthorID: 1220419.

*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 03.02.2025; одобрена после рецензирования 21.05.2025;
принята к публикации 24.06.2025.*

*The article was submitted 03.02.2025; approved after reviewing 21.05.2025; accepted for
publication 24.06.2025.*