

Гидрология

Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК: 911.2

DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-119-129

EDN: VGTCIJ

**УСТОЙЧИВОСТЬ РУСЕЛ РЕК БАССЕЙНА Р. УРАЛ К ЗАИЛЕНИЮ**Александр Сергеевич Завадский¹, Константин Михайлович Беркович², Арсений Андреевич Камышев³^{1, 2}, 3 Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

1 az-mgu@mail.ru, Researcher ID: M-3089-2015

2 berkovitch@yandex.ru, Researcher ID: M-3158-2015, Scopus Author ID: 6601927306

3 arsenii.kamyshev@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9081-8006, SPIN-код: 5957-5679

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы устойчивости русел рек бассейна Урала к процессам заиления, развивающимся под воздействием комплекса природных и антропогенных факторов, в условиях современных и прогнозируемых климатических изменений. Особое вниманиеделено влиянию ожидаемого сокращения водоносности рек, а также возможному усилению сельскохозяйственного освоения водосборов, способных существенно повысить поступление мелкодисперсных наносов в русловую сеть. Установлено, что снижение руслоформирующих расходов приводит к уменьшению транспортирующей способности потока и, как следствие, ускоряет процессы аккумуляции наносов, особенно в верхних звеньях речной системы и на малых водотоках, обладающих ограниченным стоком воды. Показано, что максимальной устойчивостью к заиению характеризуются реки с врезанными руслами, значительными уклонами и узкими поймами, способные сохранять высокие значения гидравлической мощности потока. В противоположность этому, широкопойменные реки и участки с низким модулем стока проявляют наибольшую чувствительность к нарушению руслового режима и снижению водоносности.

Прогнозируемое сокращение стока на 15–20 % к середине XXI в. может привести к расширению территорий, подверженных риску заиления, что усиливает необходимость разработки адаптационных подходов к управлению водными ресурсами, включая противоэрозионные мероприятия в пределах сельскохозяйственно освоенных бассейнов. Полученные результаты могут служить основой для формирования научно обоснованных решений в области рационального использования водных ресурсов, предотвращения деградации русловых систем, а также пространственного планирования природоохранных мероприятий, направленных на поддержание функциональной устойчивости гидрографической сети бассейна Урала в условиях климатических и антропогенных изменений.

Ключевые слова: устойчивость русел рек, заиление, транспортирующая способность потока, водоносность рек, антропогенное воздействие, бассейн реки Урал

Финансирование. Исследование выполнено по планам НИР (Г3) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова «Гидрология, морфодинамика и геоэкология эрозионно-русловых систем» (проект 121051100166-4).

Для цитирования: Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А. Устойчивость русел рек бассейна р. Урал к заиению // Географический вестник = Geographical bulletin. 2025. № 4(75). С. 119–129. DOI 10.17072/2079-7877-2025-4-119-129 EDN VGTCIJ

HYDROLOGY

Original article

DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-119-129

EDN: VGTCIJ

THE RESISTANCE OF RIVERBEDS IN THE URAL RIVER BASIN TO SILTINGAlexander S. Zavadsky¹, Konstantin M. Berkovich², Arseniy A. Kamyshev³^{1, 2, 3} Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

1 az-mgu@mail.ru, ResearcherID: M-3089-2015

2 berkovitch@yandex.ru, ResearcherID: M-3158-2015, Scopus Author ID: 6601927306

3 arsenii.kamyshev@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-9081-8006, SPIN-code: 5957-5679



© 2025 Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А. Распространяется по лицензии CC BY 4.0. Чтобы ознакомиться с условиями этой лицензии, перейдите по ссылке <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Гидрология

Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

Abstract. The study examines the resistance of river channels in the Ural River basin to siltation processes developing under the combined influence of natural and anthropogenic factors in the context of current and projected climatic changes. Special attention is given to the impact of the anticipated reduction in river water yield as well as to the potential intensification of agricultural development within the catchments, which may significantly increase the supply of fine sediments to the fluvial network. The study has established that the reduction of channel-forming discharges leads to a decrease in the sediment-transport capacity of the flow and, consequently, accelerates sediment accumulation, particularly in the upper segments of the river system and in small watercourses characterized by limited water discharge. It is shown that rivers with incised channels, significant longitudinal slopes, and narrow floodplains – which maintain high hydraulic power – demonstrate the greatest resistance to siltation. In contrast, wide-floodplain rivers and reaches with low runoff yield exhibit the highest sensitivity to disturbances of channel dynamics and reductions in water availability.

The projected 15–20% decline in river discharge by the mid-21st century may lead to an expansion of areas vulnerable to siltation, reinforcing the need to develop adaptive approaches to water-resource management, including anti-erosion measures within agriculturally developed basins. The results obtained may serve as a basis for scientifically grounded decision-making in the field of rational water-resource use, prevention of channel degradation, and spatial planning of environmental protection measures aimed at maintaining the functional stability of the hydrographic network of the Ural basin under climatic and anthropogenic change.

Keywords: river channel stability, siltation, stream transport capacity, river water yield, anthropogenic impact, Ural River basin

Funding: the work was carried out according to the state assignment undertaken by the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Lomonosov Moscow State University ‘Hydrology, morphodynamics, and geoecology of erosion-channel systems’ (project No. 121051100166-4)

For citation: Zavadsky, A.S., Berkovich, K.M., Kamyshev, A.A. (2025). The resistance of riverbeds in the Ural river basin to silting. *Geographical Bulletin*. No. 4(75). Pp. 119–129. DOI: 10.17072/2079-7877-2025-4-119-129 EDN: VGTCIJ

Введение

Одной из ключевых проблем функционирования речных систем в условиях интенсивного природопользования является устойчивость русел к заилиению – процессу накопления наносов, приводящему к деструктивным изменениям русловой морфологии и гидрологических характеристик рек [6, 11, 13, 14]. Эта проблема остро проявляется в бассейне Урала, где природные особенности формирования речных русел сочетаются с масштабным антропогенным воздействием на водный и русловой режим рек. В вызванное заилиением снижение транспортирующей способности речных потоков приводит к деградации экосистем, осложняет хозяйственное водопользование и повышает опасность наводнений.

Устойчивость речных русел к заилиению зависит от комплекса факторов: геолого-геоморфологических условий водосбора, морфометрии русла и пойменного комплекса, водного режима и характеристики стока наносов, а также характера и интенсивности хозяйственного освоения водосборных территорий [7, 9]. Еще одним фактором, определяющим устойчивость русел бассейна Урала в среднесрочной перспективе, является прогнозируемое сокращение годового и половодного стока на 15–20 % к середине XXI в. [5, 10, 12].

Целью работы является количественная оценка устойчивости русел рек бассейна Урала к заилиению на основе расчета продольной изменчивости их транспортирующей способности, сопоставление последней с возможными объемами поступления наносов в русловую сеть, картографическая визуализация степени устойчивости русел рек в бассейне Урала к заилиению. Результаты выполненного исследования могут быть направлены на выявление уязвимых территорий, требующих приоритетных мер по недопущению деградации речных русел, а также использованы при разработке адаптационных стратегий управления водными ресурсами при хозяйственном освоении водосборов и прогнозировании последствий изменения климата.

Объект и методы исследования

Объектом исследования стали наиболее крупные реки бассейна Урала (в границах Оренбургской области и южных районов Башкортостана), формирующиеся в различных морфологических условиях (равнинные, предгорные, горные). Количественная оценка изменчивости транспортирующей способности потока (величины предельного расхода наносов, способных переноситься потоком при фиксированном расходе воды) на реках бассейна Урала была проведена на основе формулы Е.М. Замарина [4], адаптированной для оценки устойчивости речных русел к заилиению [3]. Транспортирующая способность водного потока пропорциональна произведению расхода воды на квадратный корень из уклона русла ($QI^{0.5}$). Теоретическая зависимость расхода наносов, соответствующего транспортирующей способности для наносов среднего размера 0,1 мм (основная фракция, поступающая с водосбора в результате плоскостного смыва) [1], может быть определена с использованием данных Н.А. Ржаницына [8] о морфометрических и гидрологических характеристиках рек Европейской части России. Модуль стока наносов линейно связан с произведением $QI^{0.5}$ [15]. Теоретическое значение $QI^{0.5}$ связано с длиной реки (L) по следующей зависимости (1)

$$QI^{0.5} = 0,0014L^{1.16}. \quad (1)$$

Гидрология

Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

Для основных рек бассейна Урала была рассчитана продольная изменчивость (по длине реки) значения $QI^{0.5}$ (теоретическое значение по формуле (1) и реальное – на основе базы данных гидрологических и морфометрических характеристик, созданной в рамках предыдущих исследований [2]).

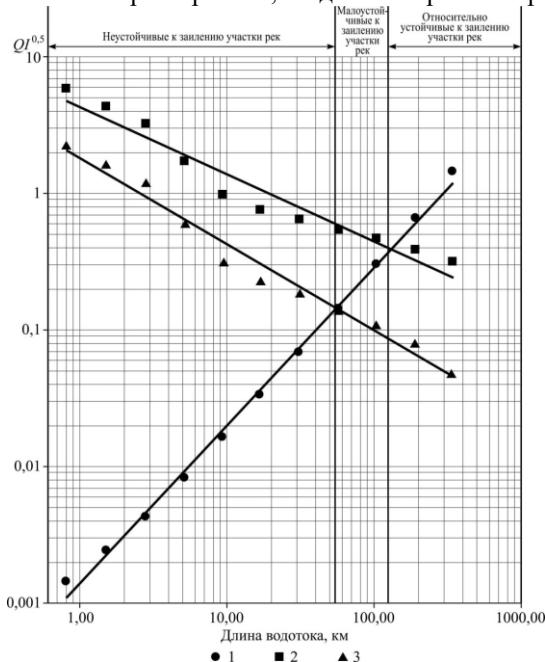


Рис. 1. Схематизация разделения речных русел по степени устойчивости к заилиению:

1 – реальная транспортирующая способность потока; 2 – необходимая транспортирующая способность потока при смыве в 5 т/га в год; 3 – необходимая транспортирующая способность потока при смыве в 2 т/га в год

Fig. 1. Schematic classification of river channels by degree of resistance to siltation:

1 – actual sediment transport capacity of the flow; 2 – required sediment transport capacity of the flow for soil erosion rate of 5 t/ha per year; 3 – required sediment transport capacity of the flow for soil erosion rate of 2 t/ha per year

Для оценки устойчивости русел рек бассейна Урала к антропогенным нагрузкам (в интегральном виде, отражающемся в изменении величины поступления наносов с водосбора), которые могут привести к их заилиению, были рассмотрены два сценария. Первый сценарий соответствует среднему смыву почвы с равнинных территорий Европейской части России при сельскохозяйственном использовании (2 т/га в год), а второй сценарий соответствует среднему максимальному смыву, характерному для Южно-Уральского региона при интенсивном сельскохозяйственном освоении (5 т/га в год). Модуль стока наносов с водосбора быстро уменьшается по длине рек, так как значительная часть наносов осаждается на склонах, в оврагах и балках верхних участков речной сети. Например, около 10 % наносов достигает рек, имеющих длину 20–30 км [1].

Исходя из этого, с учетом коэффициента доставки можно получить величину транспортирующей способности потока для каждого участка реки, необходимую для переноса всего объема материала, поступающего в соответствии с принятым модулем смыва (2 или 5 т/га в год). Сопоставляя ее с реальной величиной $QI^{0.5}$, представляется возможным оценить устойчивость отдельного участка реки к заилиению. Графически расчетную методику можно представить в виде обобщенного рисунка (рис. 1), с учетом которого было предложено, что участки русел с реальной транспортирующей способностью потока меньше необходимой для транспорта наносов при смыве 2 т/га в год являются *неустойчивыми* к заилиению; *малоустойчивыми* являются участки, в пределах которых транспортирующая способность меньше необходимой для транспорта наносов при смыве 5 т/га в год; к *относительно устойчивым* к заилиению относятся участки, где реальные значения транспортирующей способности потока превышают необходимую для транспорта наносов при смыве 5 т/га в год.

Оценка снижения устойчивости речных русел в условиях прогнозируемого уменьшения водного стока в бассейне Урала на 15–20 % (к середине XXI в. [5, 10, 12]) проводилась путем внесения соответствующих корректировок в расчетное значение транспортирующей способности ($QI^{0.5}$).

Результаты

Общей особенностью рек бассейна Урал является быстрое увеличение их транспортирующей способности на первых 50 км течения, после чего дальнейшее ее возрастание происходит сравнительно медленно (рис. 2). При сравнении теоретического и реального распределения величин $QI^{0.5}$ на крупнейших реках бассейна – Урале и Сакмаре – при общем совпадении положения на графиках кривых отмечаются несколько пониженные значения реальных транспортирующих способностей, особенно в среднем течении (рис. 3, 4). Для рек Бол. Ик и Салмыш характерно почти полное соответствие реального распределения теоретическому. Напротив, на реках Гумбейка, Таналык и Бол. Кумак наблюдаются значительные отклонения реальных значений от теоретических, что отражает сильно пониженную транспортирующую способность потока их водных потоков. Причем если на р. Бол. Кумак такие различия отмечаются только на нижних 100 км течения, то на р. Таналык и особенно на р. Гумбейке – по всей длине реки. Причиной этого может являться фактическое уменьшение водоносности рек вследствие интенсивного безвозвратного забора воды на промышленные нужды и регулирования их стока малыми искусственными водоемами (прудами).

Гидрология
Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

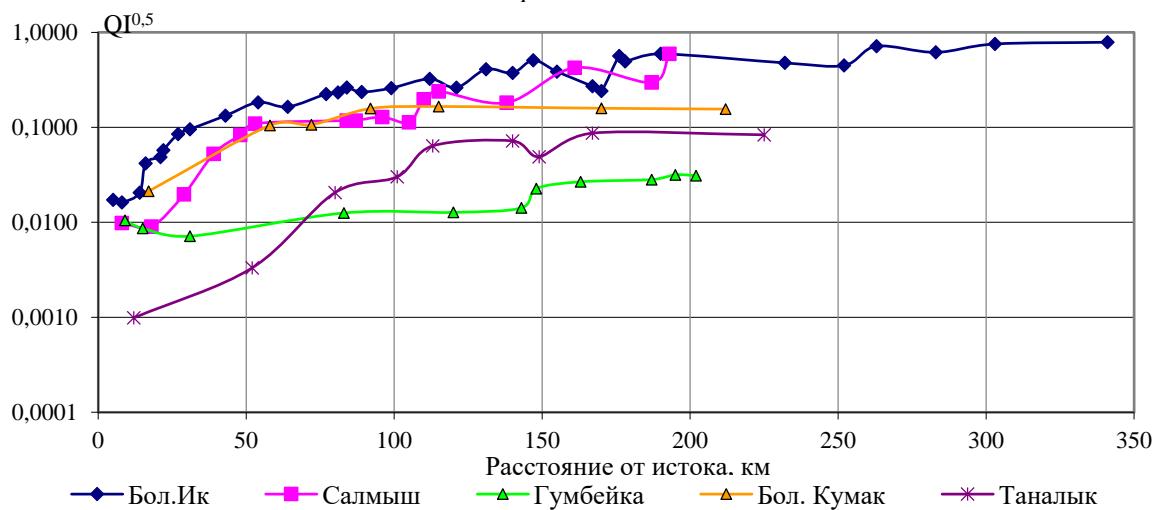


Рис. 2. Изменение транспортирующей способности потока вниз по течению на средних реках бассейна Урала
Fig. 2. Change in the downstream conveying capacity of the stream in the medium-sized rivers of the Ural basin

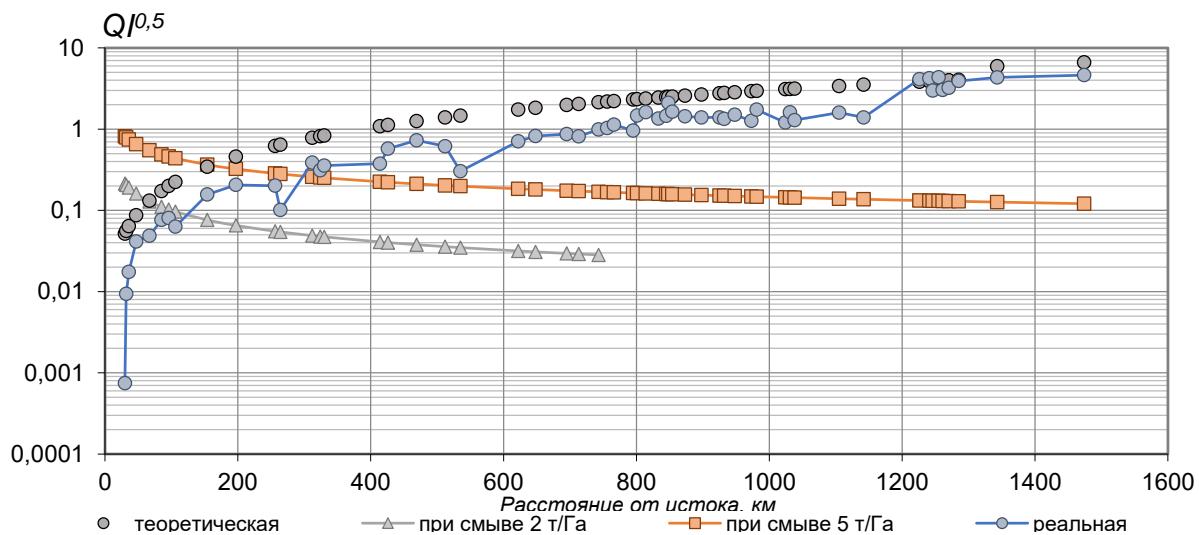


Рис. 3. Кривые распределения величины $QI^{0.5}$ по длине р. Урал (в пределах РФ)
Fig. 3. Distribution curves of $QI^{0.5}$ values along the length of the Ural River (within the Russian Federation)

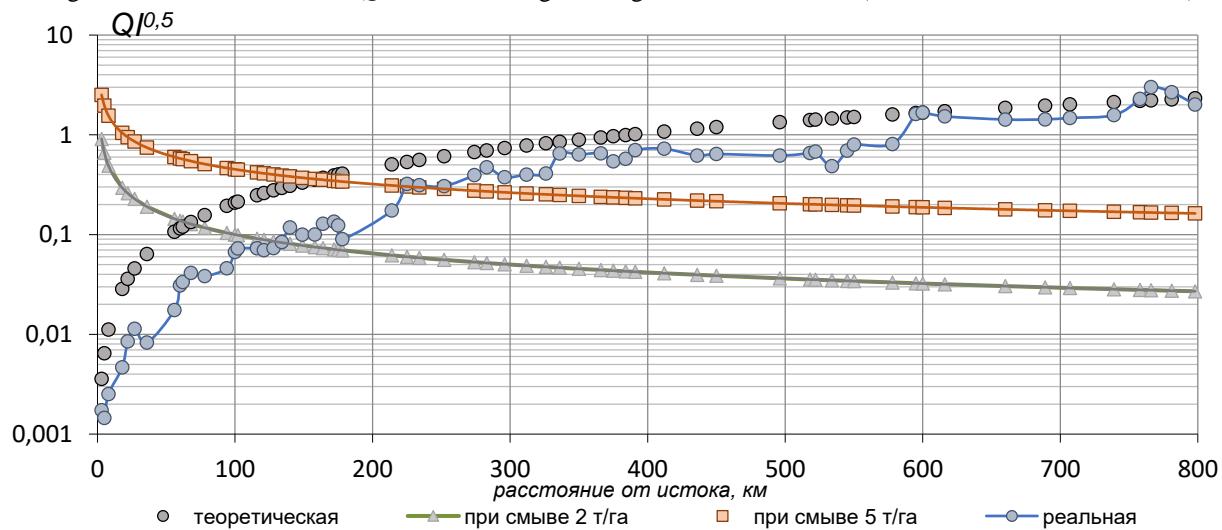


Рис. 4. Кривые распределения величины $QI^{0.5}$ по длине р. Сакмара
Fig. 4. Distribution curves of $QI^{0.5}$ values along the length of the Sakmara River

Гидрология
Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

Для большинства проанализированных участков рек бассейна Урала характерна неустойчивость их русел к заилиению в верхних течениях и малая устойчивость в средних; относительно устойчивыми являются русла в нижних течениях крупных рек бассейна. Необходимо понимать, что для верховьев рек, расположенных в горах (Урал, Сакмары, Большой Ик), неустойчивость к заилиению является виртуальной, так как в горах в большинстве случаев отсутствуют сельскохозяйственные земли, и реальное увеличения стока наносов может произойти только в результате неконтролируемой вырубки лесных угодий, карьерных разработок и других форм антропогенного нарушения устойчивости склонов без проведения соответствующих противоэрозионных мероприятий. Там, где бассейны рек располагаются в доступной для сельскохозяйственного освоения зоне, опасность заилиения представляет реальную угрозу (Салмыш, Гумбейка, Бол. Кумак, Таналык, Орь).

Река Урал обладает достаточно высокой транспортирующей способностью в отношении наносов крупностью 0,1 мм на большей части своего течения (рис. 4). Отдельные уязвимые участки выделяются в зонах подпора существующих водохранилищ. Заилиение в верховьях реки (100–300 км от истока), хотя и потенциально возможно по гидравлическим условиям, тем не менее маловероятно из-за низкой сельскохозяйственной освоенности территории. Уже ниже впадения р. Гумбейки Урал имеет достаточную транспортирующую способность для переноса мелких фракций наносов. После впадения Сакмары она еще более возрастает.

Схожая ситуация наблюдается на Сакмаре, где реальное распределение транспортирующей способности близко соответствует теоретическому (рис. 4). В верхнем и частично в среднем течении реки распространены относительно пологие склоны, лишенные лесной растительности; здесь река при распашке и увеличении смыва неустойчива к заилиению. Малоустойчивы также все притоки реки на этом участке.

Река Большой Ик демонстрирует хорошее соответствие между реальной и теоретической транспортирующей способностью (рис. 5). В горной части р. Большой Ик (рис. 5) на верхних 50 км может быть неустойчива к заилиению, однако это возможно только в случае антропогенной деятельности, такой как вырубка лесов на склонах. Малоустойчивыми к заилиению считаются участки на расстоянии 50–120 км от истока, а большая часть среднего и нижнего течения является относительно устойчивой к заилиению.

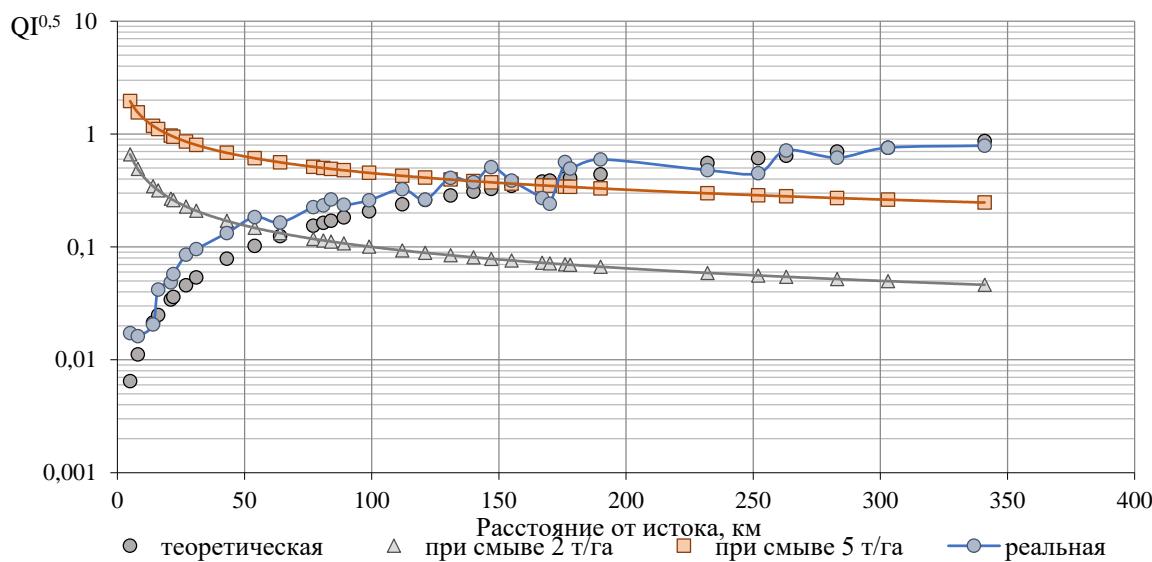
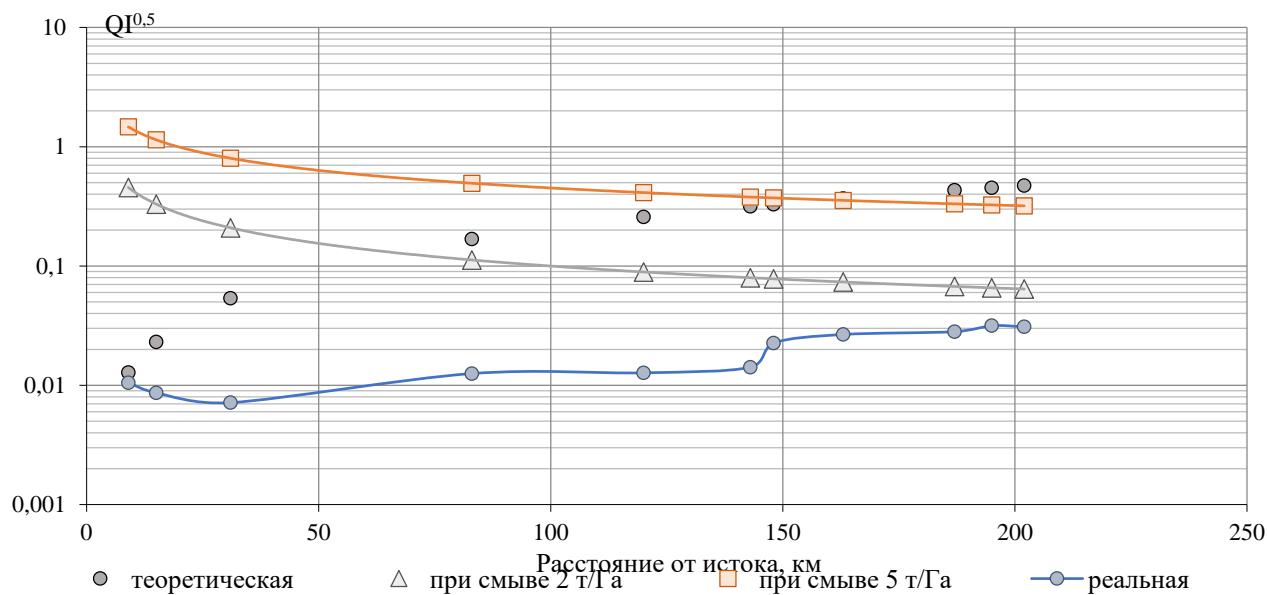


Рис. 5. Кривые распределения величины $QI^{0.5}$ по длине р. Большой Ик
Fig. 5. Distribution curves of $QI^{0.5}$ values along the length of the Bolshoy Ik River

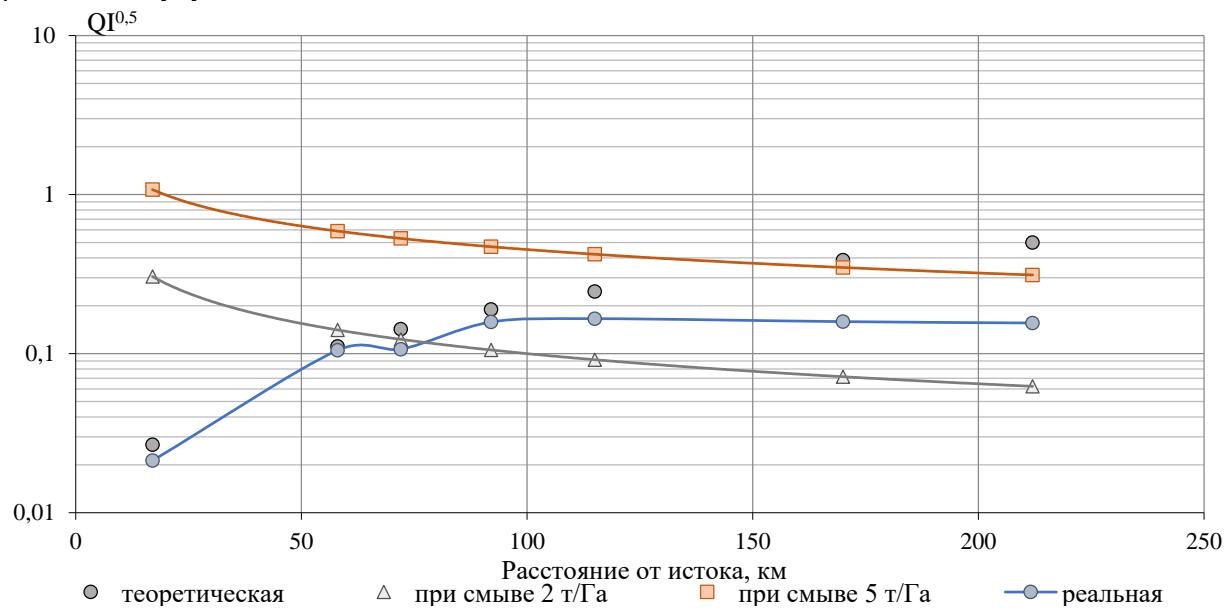
В западной части Оренбургской области реки бассейнов рек Киндель, Салмыш, Бол. Юшатырь неустойчивы к заилиению. В восточной части бассейна Урала неустойчивыми к заилиению являются русла в бассейнах рек Гумбейки, Суундук, Бол. Кумак и других рек левобережья Урала. Так, транспортирующая способность р. Гумбейки существенно ниже расчетной, что, вероятно, обусловлено значительным антропогенным преобразованием русла и регулированием стока воды. Расчет показывает, что река на всей ее длине неустойчива к заилиению (рис. 6).

Гидрология
Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

Рис. 6. Кривые распределения величины $QI^{0.5}$ по длине р. ГумбейкиFig. 6. Distribution curves of $QI^{0.5}$ values along the length of the Gumbeika River

Схожая ситуация наблюдается и на р. Большой Кумак (рис. 7). Здесь реальная транспортирующая способность в нижнем течении также значительно ниже расчетной. На верхних 70 км река неустойчива к заилиению, а на всем остальном протяжении остается малоустойчивой.

Неустойчивыми к заилиению являются и верхние 130–150 км течения р. Таналык (рис. 8), транспортирующая способность которого существенно ниже расчетной. На всем остальном протяжении река малоустойчива к заилиению. На других участках река также малоустойчива к заилиению. На устьевом участке воздействие подпора от Ириклинского водохранилища в реальных условиях также отражается на снижении устойчивости русла и предрасположенности к заилиению. Неустойчивыми являются русла и других малых рек, впадающих в Ириклинское водохранилище (Суундук, Бол. Уртазымка, Жуса, Ташля), на устьевых участках которых может развиваться регressiveвая аккумуляция.

Рис. 7. Кривые распределения величины $QI^{0.5}$ по длине р. Большой КумакFig. 7. Distribution curves of $QI^{0.5}$ values along the length of the Bolshoy Kumak River

Гидрология
Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

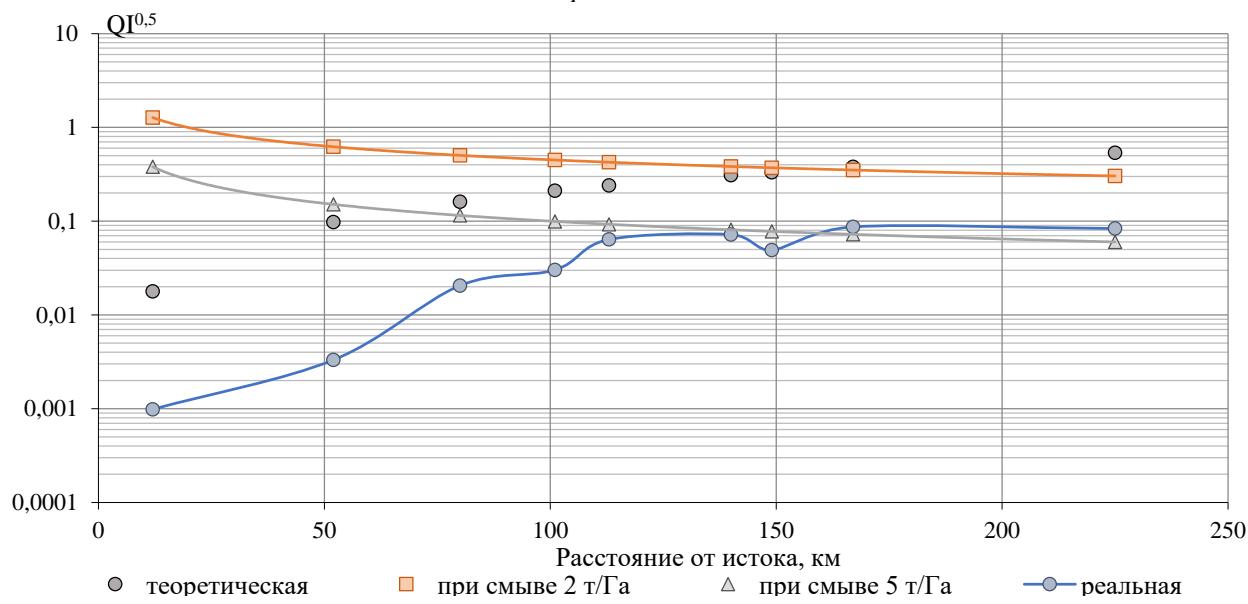


Рис. 8. Кривые распределения величины $QI^{0.5}$ по длине р. Таналык
Fig. 8. Distribution curves of $QI^{0.5}$ values along the length of the Tanalyk River

Река Орь в пределах российской части (нижние 140 км) является относительно устойчивой к заиленнию. При увеличении среднего смыва в бассейне до 5 т/га возможно заиление реки (рис. 9). Притоки реки Орь в пределах России неустойчивы к заиленнию. Следует отметить, что транспортирующая способность потока Ори несколько понижена по сравнению с расчетной, что говорит о искусственной зарегулированности стока воды в ее бассейне.

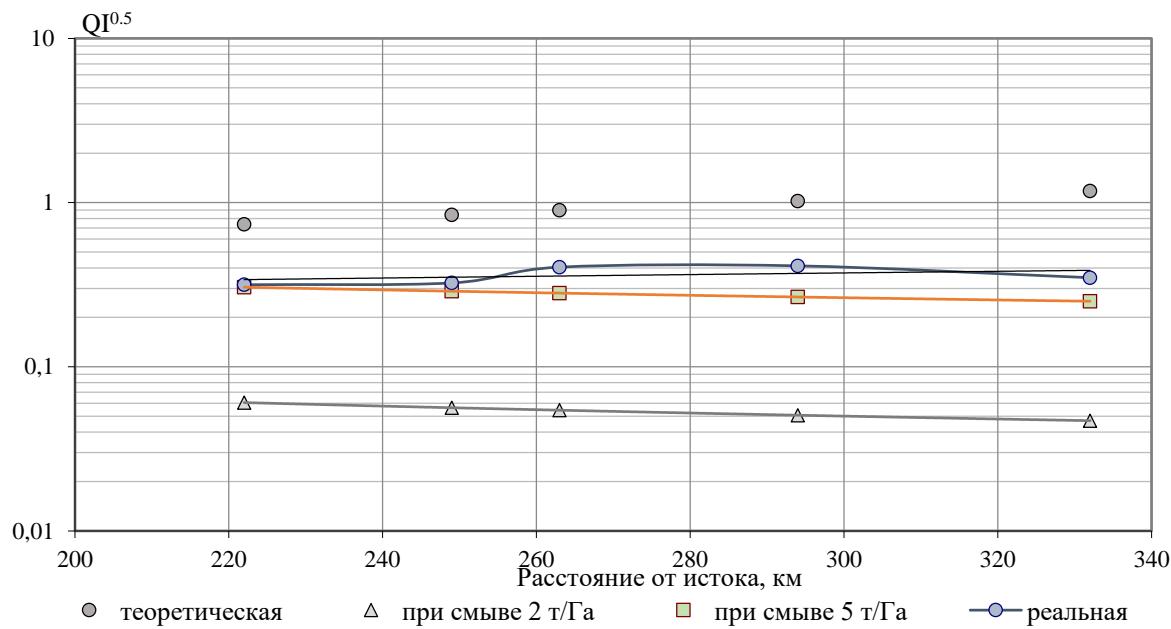


Рис. 9. Кривые распределения величины $QI^{0.5}$ по длине р. Орь
Fig. 9. Distribution curves of $QI^{0.5}$ values along the length of the Or River

Еще более снижена транспортирующая способность р. Илек на нижних 350 км течения, что, вероятно, также связано со значительным регулированием стока (в основном на территории Казахстана) (рис. 10). Однако Илек в пределах РФ можно причислить к относительно устойчивым к заиленнию, чему способствуют достаточно большие уклоны и сохранившаяся значительная водоносность реки.

Гидрология
Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

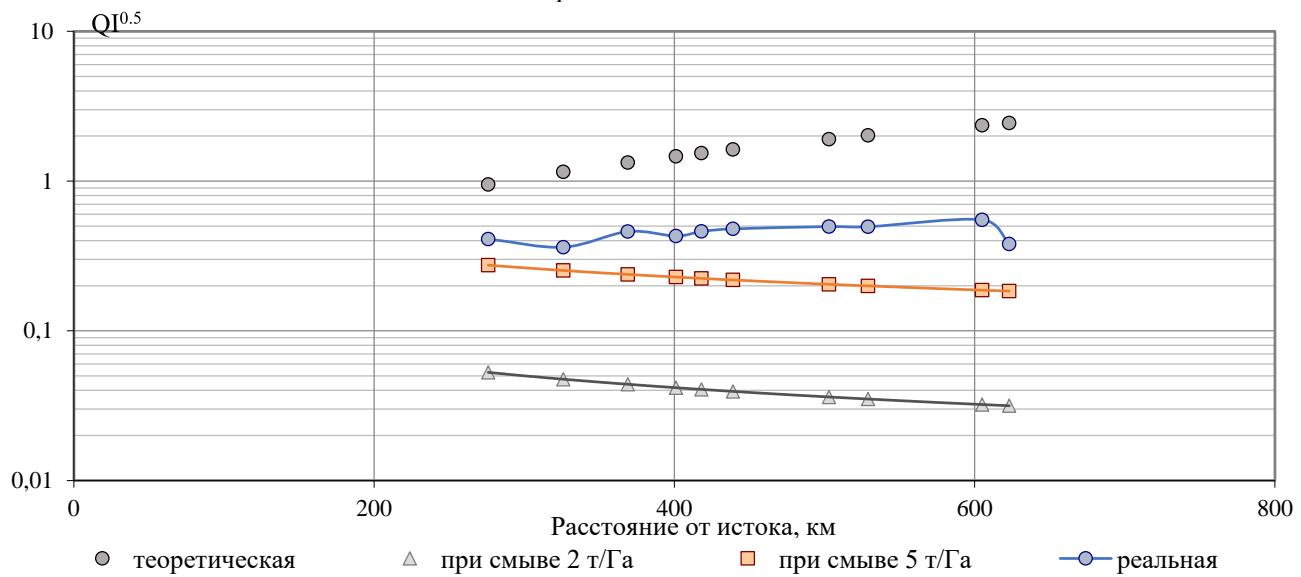


Рис. 10. Кривые распределения величины $QI^{0.5}$ по длине р. Илек
Fig. 10. Distribution curves of $QI^{0.5}$ values along the length of the Ilek River

В целом устойчивость к заилиению не только малых, но и средних рек региона мала. Прогнозируемое сокращение нормы стока рек бассейна Урала на 15–20 % к середине ХХI в. дополнительно снизит их транспортирующую способность, что приведет к увеличению протяженности русел, подверженных заилиению. В качестве примера на рис. 11 приведен анализ изменения величины $QI^{0.5}$ на р. Салмыш, для которой русло в нижнем течении станет опасным для заилиения (степень устойчивости из разряда относительно устойчивого перейдет к малоустойчивому).

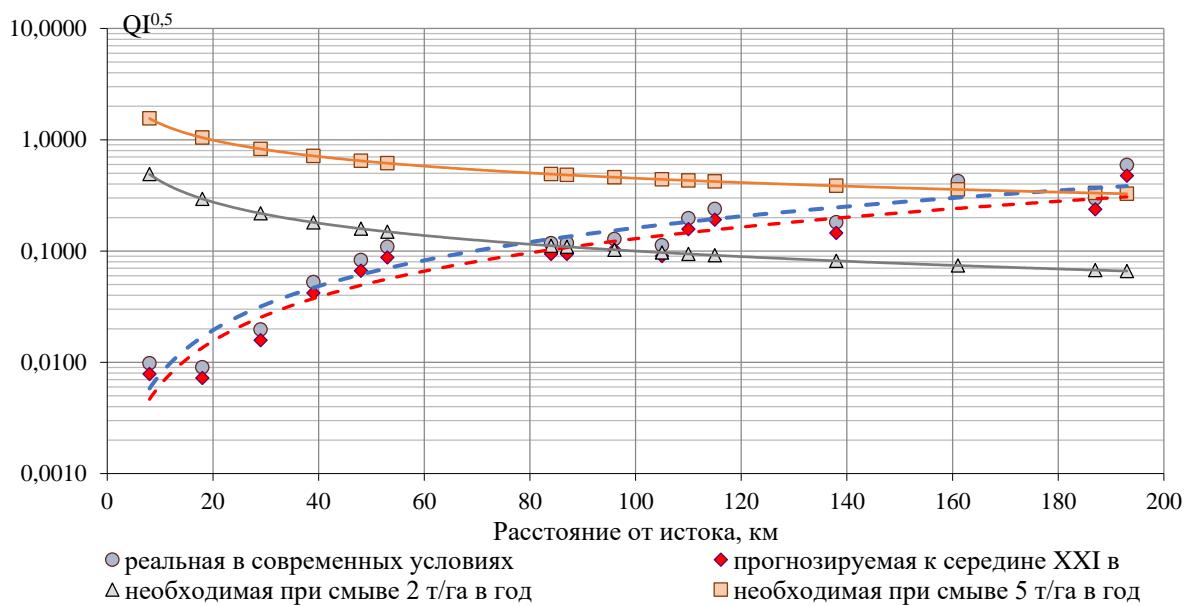


Рис. 11. Изменение транспортирующей способности по длине р. Салмыш в результате прогнозируемого к середине ХХI в. уменьшения водности на 15–20 %

Fig. 11. Change in throughput capacity along the entire length of the Salmysh River due to a projected decrease in water flow by 15–20 % by the middle of the 21st Century

Результаты проведенного исследования позволили дать оценку распространения в бассейне Урала рек (отдельных речных участков), различающихся по степени устойчивости к заилиению, а также возможного изменения такого распространения в условиях прогнозируемого сокращение годового и половодного стока на 15–20 % к середине ХХI в. [5, 10, 12]. Доля участков с неустойчивым к заилиению руслом составила 21 %, при этом она увеличится к середине ХХI в. на 120 км (до 25 %); малоустойчивое русло в настоящее время занимает 17 % (уменьшится до 15 %); относительно устойчивое русло занимает 62 % (уменьшится до 60 %).

Гидрология

Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

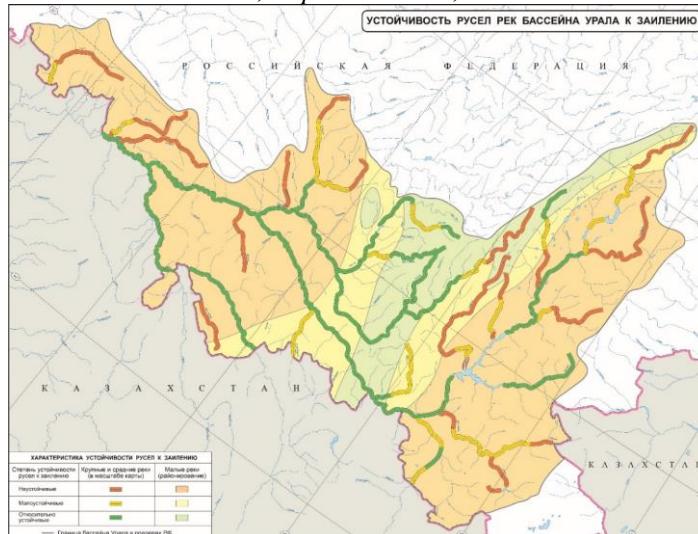


Рис. 12. Карта-схема «Устойчивость русел рек бассейна Урала к заилиению»
Fig. 12 Map-scheme ‘Siltation resistance of river channels in the Ural River basin’

Для рек бассейна Урала (в пределах РФ) устойчивость к такой форме антропогенного воздействия, как заиление, была визуализирована путем создания карта-схемы «Устойчивость русел рек бассейна Урала к заиению» (рис. 12), на которой эта характеристика для средних и больших рек отображена соответствующими линейными знаками. Устойчивость к заиению малых рек имеет площадную характеристику с соответствующим цветовым фоном.

Обсуждение

Пространственная структура устойчивости русел и ее географическая обусловленность. Анализ распределения показателя транспортирующей способности $QI^{0.5}$ на протяжении русел рек бассейна р. Урал выявил, что наибольшей устойчивостью к заиению обладают нижние участки крупных рек (Урал, Сакмара, Орь), тогда как верховья и притоки первого и второго порядка демонстрируют высокую степень неустойчивости. Такая закономерность объясняется, с одной стороны, естественным нарастанием водоносности вниз по течению, с другой – морфометрическими и геолого-геоморфологическими особенностями: русла крупных рек часто врезаны, имеют узкие поймы, устойчивую конфигурацию и устойчивые аллювиальные формы.

В то же время малые и средние реки, особенно в предгорных и возвышенных районах, испытывают недостаток стока, слабую способность к переносу наносов, а их водосборы активно используются под пашню. В совокупности это формирует условия для заиления даже при относительно высоких уклонах.

Сравнение с данными других регионов и литературы. Полученные результаты соответствуют выводам, сформулированным в более ранних работах по устойчивости речных русел в Европейской части России [3, 11, 14]. В частности, Р.С. Чалов [11] отмечал, что наиболее уязвимыми к заиению оказываются малые реки с ограниченным паводковым стоком и широкими поймами – именно такая картина наблюдается в бассейне Урала. Работы А.Н. Гельфана и Н.Л. Фроловой [5, 10] также подчеркивают влияние снижения водоносности на морфодинамику русел, что подтверждается приведенными в данном исследовании графиками и расчетами.

Следует отметить, что рассчитанные значения транспортирующей способности потока на многих реках региона (особенно Гумбейка, Таналык, Большой Кумак) значительно ниже теоретических значений, необходимых для переноса наносов при стандартном смыве. Подобные отклонения также зафиксированы в исследованиях К.М. Берковича и А.Ю. Сидорчука [2, 3], где показана чувствительность русловых систем к небольшим изменениям режима стока и смыва.

Климатический аспект и сценарии будущих изменений. Прогнозируемое к середине XXI в. снижение водоносности на 15–20 % [5, 10, 12] оказывает дополнительное негативное влияние на устойчивость русел. Согласно полученным расчетам, при таком снижении часть рек (например, Салмыш, Большой Кумак, Илек) перейдет из категории «малоустойчивых» в «неустойчивые», что особенно критично для регионов с интенсивным землепользованием. Это согласуется с выводами Н.Л. Фроловой и др. [10] о важности адаптации речных систем к гидроклиматическим трансформациям. Таким образом, даже относительно устойчивые участки при текущем тренде изменений могут стать нестабильными.

Ограничения и неопределенности. Следует отметить ряд ограничений исследования. Во-первых, расчеты базировались на усредненных значениях расхода и уклона, тогда как локальные особенности водотоков могли вносить дополнительные вариации. Во-вторых, учет наносов производился на основе типовых сценариев смыва без детальной калибровки по каждому бассейну. Также следует учитывать временную изменчивость режимов: заиление – процесс сезонно и межгодично неравномерный. Тем не менее несмотря на эти ограничения пространственная картина устойчивости, полученная в ходе исследования, обладает достаточной репрезентативностью.

Гидрология

Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.

Практические выводы и рекомендации. Результаты исследования могут быть использованы при разработке региональных стратегий управления водными ресурсами, реализации противоэрозионных мероприятий, выборе участков для мониторинга устойчивости малых рек в зоне активного сельскохозяйственного освоения, где заиление может иметь быстрый и необратимый характер. Предлагаемая схема классификации русел по степени устойчивости является удобным инструментом для пространственного планирования и оценки риска деградации русловых систем.

Выводы

Проведенное исследование позволило оценить пространственную устойчивость русел рек бассейна Урала к заиению на основе сопоставления транспортирующей способности потока с потенциальной нагрузкой наносами при различных сценариях поверхностного смыва. Полученные результаты показывают, что:

1. **Наиболее устойчивыми к заиению** являются нижние участки крупных рек (Урал, Сакмары, Орь), отличающиеся высокой водоносностью, врезанными руслами и узкими поймами, что обеспечивает благоприятные гидравлические условия для переноса наносов;

2. **Высокой степенью неустойчивости** характеризуются верховья рек и малые притоки, особенно в предгорных и возвышенных районах, где сочетание малой водоносности, высоких уклонов и активного сельскохозяйственного освоения создает предпосылки ускоренного заиления;

3. **Отклонения реальной транспортирующей способности от теоретических значений**, особенно на реках Гумбейка, Таналык и Большой Кумак, свидетельствуют о снижении способности потока к переносу наносов вследствие антропогенных воздействий и регулирования стока;

4. **Прогнозируемое сокращение водности на 15–20 % к середине XXI в.** приведет к дальнейшему снижению устойчивости русел, особенно в уже уязвимых зонах. Ряд участков перейдет из категории малоустойчивых в неустойчивые, что требует учета в стратегиях водохозяйственного планирования;

5. **Разработанная методика классификации русел по степени устойчивости** на основе показателя $QI^{0.5}$ может быть использована как инструмент для пространственного планирования, идентификации участков с высоким риском заиления и принятия превентивных мер.

Библиографический список

1. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 202 с. EDN: GTVQUJ
2. Беркович К.М., Завадский А.С., Чернов А.В. Анализ и учет русловых процессов при разработке СКИОВО // Водное хозяйство России. 2011. № 6. С. 83–95. EDN: ONRVVN
3. Беркович К.М., Сидорчук А.Ю. Оценка устойчивости русел рек Европейской России и ее оценка в связи с антропогенными нагрузками на реки и их бассейны // Проблемы оценки экологической напряженности Европейской территории России: факторы, районирование, последствия. М., 1996. С. 77–88.
4. Замарин Е.А. Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах. Л.: Госстройиздат, 1951. 82 с.
5. Гельфанд А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7, № 1. С. 36–79. DOI: 10.31857/S032105962203004X EDN: JEMWYL
6. Лапшинов В.С. Без малых рек нет больших. Ростов н/Д.: Ростов. кн. изд-во, 1983. 128 с. EDN: SFVKTL
7. Нежижовский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 476 с.
8. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети. Л.: Гидрометеоиздат, 1960. 239 с.
9. Ржаницын Н.А. Руслоформирующие процессы рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 263 с.
10. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфанд А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X EDN: YBZDRN
11. Чалов Р.С. Русловедение: теория, география, практика. М.: КРАСАНД, 2011. Т. 2. 960 с. ISBN: 978-5-396-00325-5 EDN: QKHHJZ
12. Юмина Н.М., Магрицкий Д.В. Оценка климатического и антропогенного вкладов в многолетние колебания сезонного стока рек бассейна реки Урал // Гидрометеорол. исслед. и прогнозы. 2024. № 391 (1). С. 135–151. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-1-135-151 EDN: JSMXPY
13. Charlton R. Fundamentals of Fluvial Geomorphology. London: Routledge, 2007. 516 p.
14. Julien P.Y. Erosion and Sedimentation. 2nd ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2010. 365 p.
15. Leopold L.B., Wolman M.G. River Channel Patterns – Braided, Meandering and Straight // Geol. Surv. Prof. Pap. № 282-B. Washington: U.S. Gov. Print. Off, 1957. 85 p.

References

1. Alekseevskiy N.I. *Formirovanie i dvizhenie rechnykh nanosov* [Formation and movement of river sediments], Moscow: Moscow St. Univ. Publ., 1998. 202 p. (In Russian)
2. Berkovich K.M., Zavadsky A.S., Chernov A.V. (2011). Analiz i uchet ruslovyh processov pri razrabotke SKIOVO [Analysis and consideration of channel processes in the development of SKIOVO], *Vodnoe hozjajstvo Rossii*, no. 6, pp. 83–95. (In Russian)
3. Berkovich K.M., Sidorchuk A.Y. [Assessment of the stability of river channels in European Russia and its evaluation in relation to anthropogenic pressures on rivers and their basins], *Problemy ocenki jekologicheskoy naprijazhennosti Evropejskoj territorii Rossii: faktory, rajonirovaniye, posledstvija* [Problems of assessing the ecological stress of the European territory of Russia: factors, zoning, consequences], 1996, pp. 77–88 (in Russian).
4. Zamarin E.A. *Transportirujushhaja sposobnost' i dopuskaemye skorosti techenija v kanalah* [Transport capacity and permissible flow velocities in channels], Moscow–Leningrad, Gosstroiiizdat Publ., 1951. 82 p. (in Russian).
5. Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritsky D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Y., Motovilov Y.G., Gusev E.M. (2021). *Vlijanie izmenenija klimata na godovoj i maksimal'nyj stok rek Rossii: ocenka i prognoz* [The impact of climate change on annual and peak runoff of Russian

*Гидрология**Завадский А.С., Беркович К.М., Камышев А.А.*

streams: assessment and forecast], *Fundamental'naja i prikladnaja klimatologija*, vol. 7, no. 1, pp. 36–79. DOI: 10.31857/S032105962203004X
(In Russian)

6. Lapshenkov V.S. *Bez malyh rek net rek bol'shih* [Without small rivers, there are no large rivers], Rostov-on-Don: Rostov Book Publishing House, 1983. 128 p. (In Russian)

7. Nezhikhovsky R.A. *Ruslovaja set' bassejna i process formirovaniya stoka vody* [The river network of the basin and the process of water flow formation], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1971. 476 p. (In Russian)

8. Rzhanitsyn N.A. *Morfologicheskie i gidrologicheskie zakonomernosti stroenija rechnoj seti* [Morphological and hydrological patterns of river network structure], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1960. 239 p. (In Russian)

9. Rzhanitsyn N.A. *Rusloformirujushchie processy rek* [River channel-forming processes], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 263 p. (In Russian)

10. Frolova N.L., Magritsky D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Y., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. (2022) Stok rek Rossii pri proishodjashchih i prognoziruemyh izmenenijah klimata: obzor publikacij. Ocenka izmenenij vodnogo rezhima rek Rossii po dannym na-bljudenij [Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data], *Vodnye resursy*, vol. 49, no. 3, pp. 251–269. (In Russian)

11. Chalov R.S. *Ruslovedenie: teoriya, geografija, praktika. T. 2. Morfodinamika rechnyh rusel* [Ruslovedenie: theory, geography, practice. Vol. 2. Morphodynamics of river beds] Moscow, KRASAND Publ., 2011. 960 p. DOI: 10.31857/S032105962203004X (In Russian)

12. Yumina N.M., Magritsky D.V. (2024) Ocenka klimaticheskogo i antropogennego vkladov v mnogoletnie kolebanija sezonnogo stoka rek bassejna reki Ural [Assessment of climatic and anthropogenic contributions to long-term fluctuations in seasonal river runoff in the Ural River basin], *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, no. 391 (1), pp. 135–151. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-1-135-151 (In Russian)

13. Charlton R. Fundamentals of Fluvial Geomorphology. // London: Routledge, 2007. 516 p.

14. Julien P.Y. Erosion and Sedimentation. 2nd ed. // Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2010. 365 p.

15. Leopold L.B., Wolman M.G. River Channel Patterns – Braided, Meandering and Straight // Geol. Surv. Prof. Pap. 1957. №. 282-B. // Washington: U.S. Gov. Print. Off. 85 p.

Статья поступила в редакцию: 03.02.25, одобрена после рецензирования: 27.10.25, принятa к опубликованию: 12.12.25.

The article was submitted: 3 February 2025; approved after review: 27 October 2025; accepted for publication: 12 December 2025.

Информация об авторах**Александр Сергеевич Завадский**

Кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник НИЛ «Эрозии почв и русловых процессов», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;

119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: az-mgu@mail.ru

Константин Михайлович Беркович

Доктор географических наук, старший научный сотрудник НИЛ «Эрозии почв и русловых процессов», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;

119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: berkovich@yandex.ru

Арсений Андреевич Камышев

Кандидат географических наук, младший научный сотрудник НИЛ «Эрозии почв и русловых процессов», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова;

119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1

e-mail: arsenii.kamyshev@yandex.ru

Information about the authors**Alexander S. Zavadsky**

Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Konstantin M. Berkovich

Doctor of Geography, Senior Researcher Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Arseniy A. Kamyshev

Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes, Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119991, Russia

Вклад авторов

Завадский А.С. – идея, сбор материала, обработка материала.

Беркович К.М. – идея, сбор материала, обработка материала.

Камышев А.А. – написание статьи, научное редактирование текста.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Contribution of the authors

Alexander S. Zavadsky – concept development; data collection and processing.

Konstantin M. Berkovich – concept development; data collection and processing.

Arseniy A. Kamyshev – writing of the article; scientific editing of the text.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.