Научная статья
УДК 627.157:556.535:532.543

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДВОДНОГО КАРЬЕРА НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАНОСОВ И РУСЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В РЕКЕ ОБЬ

Д.А. Подкорытова[1,*], Т.В. Пилипенко[1], А.А. Калашников[2]

[1] Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск, Россия
[2] Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия
* E-mail: dariya9191@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния подводного песчаного карьера на перераспределение донных наносов и динамику русловых процессов на участке реки Обь. Методологическую основу составили расчёты по методу М. А. Великанова для трёх характерных расходов воды по опорному гидропосту Новосибирск (1250, 3500 и 4800 м³/с), моделирующих меженный, руслоформирующий и полноводный режимы. В качестве ключевых диагностических параметров использованы неразмывающая (Vнр) и размывающая (Vр) скорости, а также фактические скорости на участках реки (Vстр). Результаты расчётов показали, что наличие карьера приводит к кардинальной перестройке скоростного поля. В пределах карьера, из-за увеличения живого сечения, происходит снижение Vстр ниже Vнр, что формирует устойчивую зону аккумуляции наносов. Одновременно, непосредственно ниже по течению возникает компенсационная зона активного размыва, где Vстр превышает Vр, создавая риски для устойчивости берегов и инженерных сооружений. Наиболее критичным с точки зрения активизации русловых деформаций является руслоформирующий расход (3500 м³/с). Сделан вывод о том, что размещение подводных карьеров в руслах крупных рек требует обязательного предварительного прогнозного моделирования русловых процессов, как в зоне работ, так и на значительном расстоянии ниже по течению, а также разработки компенсационных мероприятий.

Ключевые слова: *русловые процессы; перераспределение наносов; подводный карьер; неразмывающая скорость; размывающая скорость; размыв; морфодинамика.*

Для цитирования: Подкорытова Д.А., Пилипенко Т.В., Калашников А.А. Оценка влияния разработки руслового карьера на русловые деформации на примере участка реки Обь // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2026. Т. 12. № 2. С. 77–85.

Original article

ASSESSING THE IMPACT OF CHANNEL QUARRY DEVELOPMENT ON CHANNEL DEFORMATIONS USING THE EXAMPLE OF A SECTION OF THE OB RIVER

D.A. Podkorytova[1,*], T.V. Pilipenko[1], A.A. Kalashnikov[2]

[1] Novosibirsk State University of architecture and Civil Engineering(Sibstrin), Novosibirsk, Russia
[2] Siberian State Water Transport University, Novosibirsk, Russia
* E-mail: dariya9191@mail.ru

Abstract. The article investigates the impact of an underwater sand quarry on the redistribution of bottom sediments and the dynamics of channel processes in a section of the Ob

© Подкорытова Д.А., Пилипенко Т.В., Калашников А.А. 2026

River. The methodological basis consists of calculations using the M. A. Velikanov method for three characteristic water discharges (1250, 3500, and 4800 m³/s), simulating low-water, channel-forming, and flood regimes. Key diagnostic parameters include the non-scouring velocity ($V_{нр}$), scouring velocity ($V_р$), and actual flow velocities in streamtubes ($V_{стр}$). The calculation results revealed that the quarry's presence leads to a radical restructuring of the velocity field. Within the quarry boundaries, the increase in cross-sectional area causes a drop in $V_{стр}$ below $V_{нр,}$ forming a stable sediment accumulation zone. Simultaneously, a compensatory zone of active scour develops immediately downstream, where $V_{стр}$ exceeds $V_р$, posing risks to bank stability and infrastructure. The channel-forming discharge (3500 m³/s) was identified as the most critical for activating channel deformations. The study concludes that the placement of underwater quarries in large river channels necessitates mandatory predictive modeling of channel processes both in the work area and for a significant distance downstream, as well as the development of compensatory measures.

Keywords: *channel processes; sediment redistribution; underwater quarry; non-scouring velocity; scouring velocity; scour; morphodynamics.*

For citation: Podkorytova D.A., Pilipenko T.V., Kalashnikov A.A. Assessing the impact of channel quarry development on channel deformations using the example of a section of the Ob river. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2026. Vol. 12, No. 2. pp. 77–85.

Введение

Русловые процессы на крупных равнинных реках, таких как Обь, характеризуются динамическим взаимодействием потока, наносов и морфологии русла. Антропогенная деятельность, в частности добыча нерудных материалов из русла (подводные карьеры), существенно нарушает естественный баланс, приводя к локальным и системным изменениям гидравлических и морфодинамических параметров. Работа подводного карьера создает зоны с измененной геометрией (увеличенные глубины, измененные ширины), что влечет за собой перераспределение расходов воды, скоростных характеристик и, как следствие, интенсивности транспорта наносов.

Современное состояние исследований по проблеме влияния подводных карьеров на перераспределение наносов и русловые процессы на реке Обь характеризуется фрагментарностью. В трудах К.М. Берковича, С.Н. Рулевой и Р.С. Чалова [1] заложены основы изучения русловых процессов и оценено влияние дноуглубительных работ на Верхней Оби, однако целенаправленных работ по выделению эффекта именно от стационарных подводных карьеров (в отличие от траншейных прорезей) недостаточно. В зарубежной литературе эффекты от добычи гравия детально рассмотрены в работах Д.Верикат [2], П.Вилкок [3], где установлено, что такие изъятия приводят к формированию «ловушек» для наносов, дефициту транспортируемого материала и регрессивной эрозии ниже по течению.

Целью данного исследования является количественная оценка влияния подводного карьера, расположенного в сечениях 1-7 (рис.1), на перераспределение наносов и изменение характера русловых процессов на участке реки Обь, охватывающем сечения 1–7. Исследование проводится для трех характерных расходов: меженного (Q = 1250 м³/с), руслоформирующего (Q = 3500 м³/с) и полноводного (Q = 4800 м³/с). Основное внимание уделяется анализу изменения неразмывающей скорости ($V_{нр}$), размывающей скорости ($V_р$) и фактической скорости в струях ($V_{стр}$) для выявления зон аккумуляции (намыва) и размыва грунта.

Гипотеза исследования заключается в том, что наличие карьера приводит к значительной перестройке скоростного поля: в зоне карьера происходит снижение $V_{стр}$ относительно $V_{нр}$, что вызывает аккумуляцию наносов, а ниже по течению — увеличение $V_{стр}$ сверх $V_р$, инициирующее размыв и потенциально угрожающее устойчивости берегов и инженерных сооружений.

ISSN 2413–9858

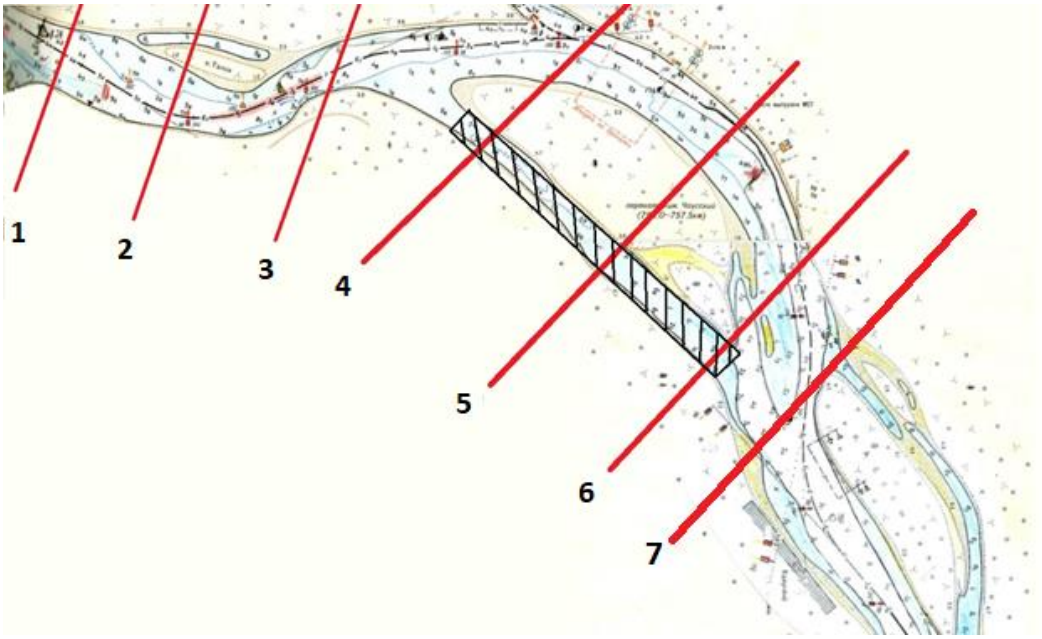


Рисунок 1 - Расположение расчетных сечений на р. Обь

Методы

В основу методики положена схема расчета распределения расходов и скоростей по методу М.А. Великанова [4, 5]. Метод основан на дискретизации живого сечения на ряд элементарных струй и пропорциональном распределении общего расхода между ними в зависимости от их гидравлической крупности, характеризуемой величиной $T_{ср}$, где $T_{ср}$ — средняя глубина на участке.

Для расчета приняты следующие расходы воды: Q_1 = 1250 м³/с (меженный), Q_2 = 3500 м³/с (руслоформирующий), Q_3 = 4800 м³/с (полноводный). Исходные данные по ширинам струй ($B_{стр}$) и их площадям ($w_{стр}$) для каждого сечения принимаются и рассчитываются на основании выполненных русловых съемок. Для сечений 4–6 задана измененная геометрия, имитирующая подводный карьер (локальное увеличение $w_{стр}$ при соответствующем $B_{стр}$). Уклон свободной поверхности принят i = 0,00022, коэффициент шероховатости n = 0,022 (соответствует руслу, сложенному песками средней крупности).

Скорость в струе ($V_{стр}$) определяется как отношение расхода струи к площади живого сечения струи

$$V_{стр} = \frac{Q_{стр}}{\omega_{стр}} \quad (1)$$

где $Q_{стр} = Q_р/m$

$Q_р$ - расчетный расход, определяемый с помощью кривой расхода $Q_р = f(H)$, м³/с;

m - принятое количество струй в плане течений.

Неразмывающая скорость ($V_{нр}$) рассчитывается по эмпирической формуле, учитывающей гидравлическую крупность грунта (d), глубину потока ($T_{стр}$) и уклон:

$$V_{нр} = 3{,}9 \cdot \left(d_{ср} + 0{,}0014\right)^{0{,}3} \cdot \left(\varphi \cdot T_{стр}\right)^{0{,}2} \quad (2)$$

где $d_{ср}$ – средний диаметр частиц грунта в пределах струи по кривой гранулометрического состава, м; $\varphi = d_{ср}/d_{90}$ – коэффициент неоднородности грунта, изменяющийся для равнинных рек с песчаным ложем в пределах 0,3-0,6; d_{90} – диаметр частиц грунта 90-процентной обеспеченности; $T_{стр}$ – средняя глубина струи, м; $\omega_{стр}$ – площадь струи в поперечном сечении, располагающаяся между границами струи, дном и расчетным уровнем воды, м^2.

Данная формула позволяет вычислить критическую скорость, при которой прекращается взвешивание и начинается отложение наносов заданной крупности (для расчетов принят d = 0,5 мм).

Размывающая скорость (V_p) принимается с коэффициентом запаса, равным 1,3 и вычисляется по формуле

$$V_p = 1{,}3 \cdot V_{кр}. \quad (3)$$

Расчетный расход наносов для струи (Q_T) производится по формуле:

$$Q_T = 0{,}015 \cdot \left(\frac{V_{стр}}{V_{нр}} \right)^3 \cdot d_{ср} \cdot \left(V_{стр} - V_{нр} \right) \cdot B_{стр} \quad (4)$$

Положительное значение Q_T указывает на преобладание размыва (транспорт наносов со дна), отрицательное — на аккумуляцию (отложение наносов).

Для каждого из трех расходов и для двух состояний русла («свободное русло» и «русло с карьером в сечениях 4–6») были выполнены следующие шаги:

1) расчет распределения общего расхода по струям (ΔQ) по методу Великанова;

2) распределение $V_{стр}$, $V_{нр}$, V_p для каждой струи во всех сечениях;

3) сравнение $V_{стр}$ с $V_{нр}$ и V_p для качественной оценки процесса ($V_{стр} < V_{нр}$ — аккумуляция; $V_{нр} < V_{стр} < V_p$ — транзит; $V_{стр} > V_p$ — размыв);

4) расчет баланса наносов (ΔQ_i) между соседними сечениями для каждой струи. Накопление положительной разницы свидетельствует о размыве вышележащего участка, отрицательной – о намыве.

Результаты

При всех трех расчетных расходах наличие карьера в сечениях 4–6 приводит к закономерному изменению картины распределения скоростей (рис. 2):

- в зоне карьера (сечения 4–6) за счет искусственного увеличения площади живого сечения ($w_{стр}$) средняя скорость в струях ($v_{стр}$) снижается на 15-40% по сравнению со сценарием свободного русла. Для руслоформирующего расхода (3500 м³/с) в струях, соответствующих карьеру, $v_{стр}$ падает с 0,8–1,1 м/с до 0,5–0,7 м/с; при этом $v_{нр}$, будучи функцией глубины, в карьере возрастает (из-за увеличения $T_{стр}$) на 10-25%, и в результате для большинства струй в пределах карьера наблюдается условие $v_{стр} < v_{нр}$.

- непосредственно ниже карьера происходит обратный эффект: поток, выходящий из расширенной и углубленной зоны, концентрируется, что ведет к росту $v_{стр}$ на 20-35%; для полноводного расхода (4800 м³/с) $v_{стр}$ в отдельных струях ниже карьера может превышать 1,5 м/с. Значения v_p здесь также несколько выше из-за больших глубин, но рост $v_{стр}$ оказывается более значительным.

Критерием оценки зон размыва и намыва служит сравнение $V_{стр}$ *с* $V_{нр}$ и V_p, а также знак и величина ΔQ_i.

В свободном русле распределение зон происходит относительно равномерно. Для расхода 3500 м³/с размыв ($V_{стр} > V_p$) отмечается в основных струях сечений 2 и 3, где русло сужено. Аккумуляция ($V_{стр} < V_{нр}$) характерна для мелководных побочней и устьевых участков проток (сечения 4, 6). Баланс близок к динамическому равновесию.

В русле с карьером зона аккумуляции наносов четко локализована в пределах сечений 5, 6. Условие $V_{стр} < V_{нр}$ приводит к отрицательным значениям ΔQ_i. Интенсивность намыва максимальна для руслоформирующего расхода, так как именно при нем в реку поступает основной объем транспортируемых наносов. Расчеты показывают, что мощность потенциальных отложений в карьере за гидрологический сезон может составить 0,5–1,5 м.

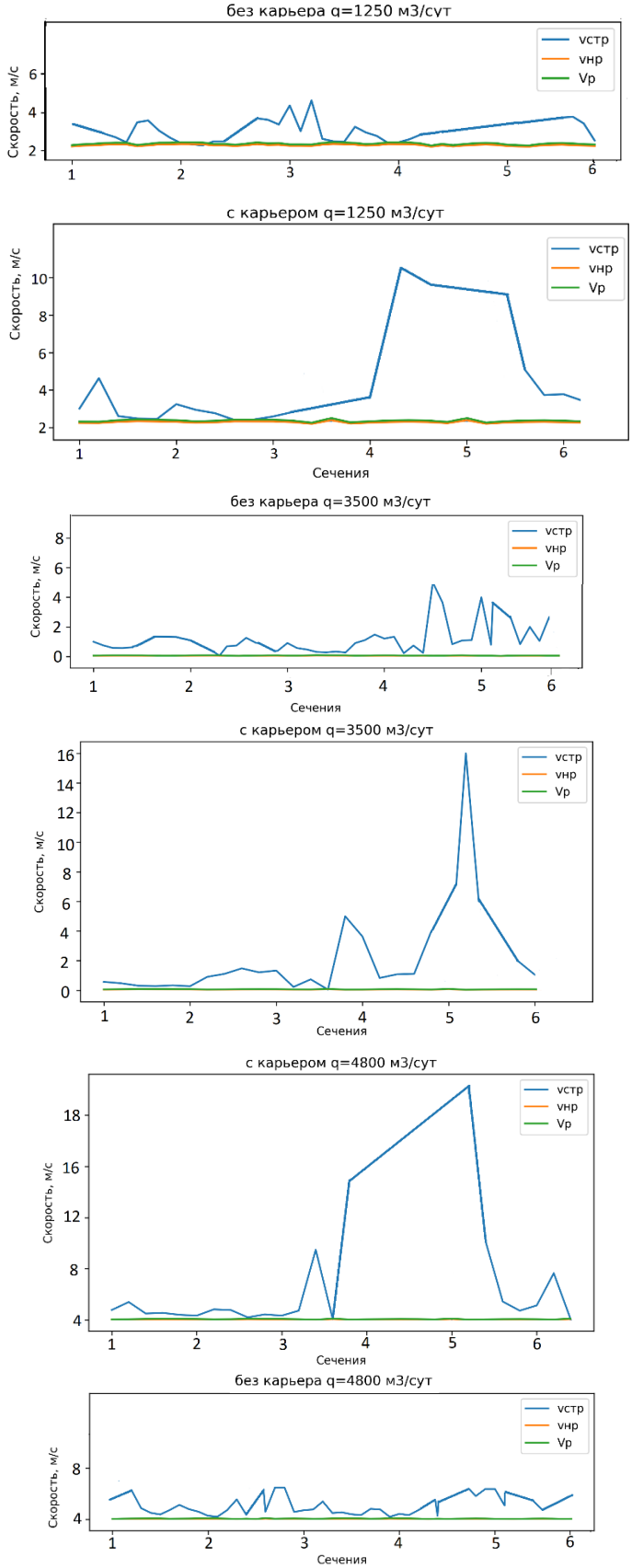


Рисунок 2 – Распределение скоростей Vнр, Vp и Vстр по створам при наличии карьера и при его отсутствии при различных расходах

Зона размыва формируется непосредственно ниже по течению от карьера (сечение 7 и ниже). Здесь выполняется условие $V_{стр} > V_p$. Наиболее опасная ситуация складывается при

полноводном расходе (4800 м³/с), когда размывающая способность потока максимальна. Расчетный размыв дна на этом участке может достигать 0,8–1,2 м, что создает угрозу подмыва берегов, опор мостов и подводных коммуникаций.

Выше карьера (сечения 1–3) картина изменяется незначительно, наблюдается небольшое увеличение $V_{стр}$ (на 5-10%) из-за общего перераспределения уклонов, но оно не приводит к смене преобладающего процесса.

Влияние величины расхода представлено в таблице 1.

Таблица 1. Влияние величины расхода на транспорт наносов

Величина расхода Q, м³/с	Эффект
1250	Изменения выражены слабо. В карьере аккумуляция незначительна, ниже карьера размыв практически отсутствует (Vстр ≈ Vнр)
3500	Наиболее показательный режим. Карьер аккумулирует наносы, а ниже его формируется устойчивая зона размыва
4800	Интенсивность обоих процессов максимальна. Однако доля взвешенных наносов в половодье выше, поэтому часть материала может транзитом проходить через карьер, несколько снижая темпы его заиления, но усиливая размыв нижележащего участка

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу и демонстрируют, что подводный карьер выступает мощным дестабилизирующим фактором, нарушающим продольный и поперечный баланс наносов на значительном протяжении реки.

Карьер, создавая локальную морфологическую аномалию (углубление), вызывает: 1) снижение транспортирующей способности потока в своей зоне, так как увеличение сечения приводит к падению скорости и, как следствие, к массовому отложению поступающих наносов, следовательно, карьер превращается в аккумулятор наносов; 2) формирование нового динамического профиля равновесия, поскольку для компенсации потери энергии на преодоление расширения поток увеличивает скорость на прилегающих участках, в первую очередь — ниже по течению, соответственно, это приводит к возникновению дефицита наносов на данных участках и к компенсационному размыву дна и берегов.

В итоге, зачастую, на определенных участках карьера происходит быстрое (в масштабах нескольких лет) техническое заиление карьера[5, 6].

Прогрессирующий размыв участка, расположенного ниже карьера, представляет главную инженерную и экологическую опасность. Это может привести к деформации и разрушению регуляционных сооружений, угрозе устойчивости береговой линии, активизации оползневых процессов, изменению условий работы водозаборов, недопустимым деформациям русла в створах мостовых переходов.

Для вышележащего участка изменения минимальны, что указывает на локальность морфологического влияния карьера вверх по течению.

В период средней воды (Q ≈ 3500 м³/с) карьер, несмотря на увеличенные глубины, может стать зоной навигационного риска из-за непредсказуемого перераспределения струй и отмелей. Ниже карьера увеличение скоростей может осложнить проводку судов против течения [7].

Заключение

Наличие подводного карьера на рассматриваемом участке реки Обь коренным образом меняет распределение скоростей и баланс наносов на рассматриваемом участке. В пределах карьера формируется устойчивая зона аккумуляции наносов, а непосредственно

ниже по течению — зона интенсивного размыва. Критическим с точки зрения активизации русловых деформаций является руслоформирующий расход (3500 м³/с), при котором транспортирующая способность потока и насыщенность наносами максимальны для меженного морфодинамического цикла.

Неразмывающая скорость ($V_{нр}$) в зоне карьера возрастает, а фактическая скорость ($V_{стр}$) падает, что и обусловливает процесс заиления. Ниже карьера наблюдается обратная картина: рост $V_{стр}$ сверх размывающей скорости ($V_р$).

Размещение подводных карьеров в руслах крупных рек требует обязательного предварительного моделирования русловых процессов не только в зоне работ, но и ниже по течению. Необходима разработка и реализация компенсационных мероприятий, таких как дноуглубление ниже карьера или искусственное закрепление размываемых участков.

Для участка ниже карьера необходимо организовать мониторинг глубин и поперечных профилей. Следует рассмотреть вариант искусственного ограничение объема выборки грунта или придания карьеру такой геометрии, которая минимизирует турбулентность потока (например, вытянутой вдоль течения формы) [8, 9, 10].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чалов Р. С., Куракова А. А., Михайлова Н. М., Рулева С. Н. Размывы пойменных берегов и эволюция форм русел рек как факторы перестройки русловой сети // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. №5. С. 29-40.

2. Brasington J., Vericat D., Rychkov I. Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning // Water Resour. Res. 2012. Vol. 48. W11519. DOI:10.1029/2012WR012223.

3. Grams P.E., Wilcock P.R. Transport of fine sediment over a coarse, immobile riverbed // J. Geophys. Res. Earth Surf. 2014. Vol. 119. P. 188-211. DOI:10.1002/2013JF002925.

4. Антроповский В.И., Шелухина О.А. Основные положения гидролого-морфологической теории русловых процессов при преобразовании речных систем // Известия РГПУ им. А. И. Герцена. 2007. №38. С. 98-103.

5. Короткова Е. М., Вершинин Д. А. Исследование процесса грядообразования на разветвленном участке р. Томи в связи с особенностями его водного и ледового режимов // Вестник Томского гос. ун-та. 2011. №351. С. 175-180.

6. Беркович К. М., Злотина Л. В., Турыкин Л. А. Природно-ориентированные подходы к добыче аллювиальных строительных материалов из речных русел и пойм // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. 2016. №3. С. 3-12.

7. Шлычков В. А., Дзюбенко Л. Ф. Математическая модель для исследования устойчивости русловых процессов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2006. №2(3). С. 97-102.

8. Шестова М. В. Особенности русловых процессов и методы стабилизации русла на участках нижних бьефов ГЭС // Научные проблемы водного транспорта. 2004. №8. С. 102-106.

9. Гладков Г. Л., Ржаковская П. С., Заварзин Р. В. Экспериментальные исследования гидравлики потока и параметров транспорта донных наносов при неустановившемся движении воды // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2024. № 2. С. 181-195.

10. Ромашин В. В. К методике оценки транспорта руслообразующих наносов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. 2009. № 1. С. 50-60.

REFERENCES

1. Chalov R.S., Kurakova A.A., Mihajlova N.M., Ruleva S.N. *Razmyvy pojmennyh beregov i evolyuciya form rusel rek kak faktory perestrojki ruslovoj seti* [Erosion of floodplain banks and evolution of river channel forms as factors in the restructuring of the channel network]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2022. No. 5, pp. 29-40.

2. Brasington J., Vericat D., Rychkov I. Modeling river bed morphology, roughness, and surface sedimentology using high resolution terrestrial laser scanning. Water Resour. Res. 2012. Vol. 48. W11519. DOI:10.1029/2012WR012223.

3. Grams P.E., Wilcock P.R. Transport of fine sediment over a coarse, immobile riverbed. J.Geophys. Res. Earth Surf. 2014. Vol. 119. P. 188-211. DOI:10.1002/2013JF002925.

4. Antropovskij V. I., Sheluhina O. A. *Osnovnye polozheniya gidrologo-morfologicheskoj teorii ruslovyh processov pri preobrazovanii rechnyh system* [The main provisions of the *hydrological-morphological theory of channel processes in the transformation of river systems]. Izvestiya RGPU im. A. I. Gercena*. 2007. No.38, pp. 98-103.

5. Korotkova E.M., Vershinin D.A. *Issledovanie processa gryadoobrazovaniya na razvetvlennom uchastke r. Tomi v svyazis osobennostyami ego vodnogo i ledovogo rezhimov* [A study of the process of ridge formation in a branched section of the Tom River in relation to the peculiarities of its water and ice regimes]. *Vestnnik Tomskogo gos. un-ta*. 2011. No.351, pp. 175-180.

6. Berkovich K. M., Zlotina L. V., Turykin L. A. *Prirodno-orientirovannye podhody k dobyche allyuvial'nyh stroitel'nyh materialov iz rechnyh rusel i pojm* [Nature-based approaches to the extraction of alluvial building materials from river beds and floodplains]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Nauki o Zemle*. 2016. No.3, pp. 3-12.

7. Shlychkov V. A., Dzyubenko L. F. *Matematicheskaya model' dlya issledovaniya ustojchivosti ruslovyh processov* [Mathematical model for studying the stability of riverbed processes]. *Interekspo Geo-Sibir'*. 2006. No.2(3), pp. 97-102.

8. Shestova M. V. *Osobennosti ruslovyh processov i metody stabilizacii rusla na uchastkah nizhnih b'efov GES* [Features of riverbed processes and methods of riverbed stabilization in the lower reaches of hydroelectric power plants]. *Nauchnye problemy vodnogo transporta.* 2004. No.8, pp. 102-106.

9. Gladkov G. L., Rzhakovskaya P. S., Zavarzin R. V. *Eksperimental'nye issledovaniya gidravliki potoka i parametrov transporta donnyh nanosov pri neustanovivshemsya dvizhenii vody* [Experimental studies of flow hydraulics and bottom sediment transport parameters during unsteady water movement. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova*. 2024. No.2, pp. 181-195.

10. Romashin V. V. *K metodike ocenki transporta rusloobrazuyushchih nanosov* [Towards a methodology for assessing the transport of channel-forming sediments]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova*. 2009. No.1, pp. 50-60.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Подкорытова Дарья Александровна – соискатель учёной степени кандидата технических наук, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (630008, Россия г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, e-mail: dariya9191@mail.ru)	*Podkorytova Daria Alexandrovna* – PhD Candidate, Novosibirsk State University of architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (630008, Russia, Novosibirsk, Leningradskaya str., 1, e-mail: dariya9191@mail.ru)
Пилипенко Татьяна Викторовна – кандидат технических наук, доцент, Новосибирский	*Pilipenko Tatyana Viktorovna* – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Novosibirsk State University of

государственный архитектурно-строительный университет (630008, Россия г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, e-mail: taniavp_2005@rambler.ru)	architecture and Civil Engineering(Sibstrin) (630008, Russia, Novosibirsk, Leningradskaya str., 1, e-mail: taniavp_2005@rambler.ru)
Калашников Арсений Александрович – кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет водного транспорта (630008, Россия г. Новосибирск, ул. Щетинкина, 33, e-mail: blackcaster@yandex.ru)	*Kalashnikov Arsenii Alexandrovich* - Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Novosibirsk State Water Transport University (630008, Schetinkina str., 33, e-mail: blackcaster@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 26.03.2026; одобрена после рецензирования 15.04.2026, принята к публикации 28.04.2026.
The article was submitted 26.03.2026; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 28.04.2026.