

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 140—150.
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):140—150.

ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК [556.537+556.537](28)(5711.21)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-140-150

Оценка скоростей деформаций меандрирующих рек Ямала

Анастасия Ивановна Баскакова¹, Дмитрий Игоревич Исаев²

¹ Независимый исследователь, baskakovan96@gmail.com

² Российский государственный гидрометеорологический университет

Аннотация. В статье рассматривается изменение планового положения свободно меандрирующих речных русел юго-западной части Ямальского полуострова. Выполнено совмещение разновременного положения речных русел за период более 53 лет. Рассчитаны основные параметры излучин и их изменения с использованием методики пятиугольных полигонов. Показано, что изменение параметров отдельных излучин рассматриваемых рек не соответствует гидроморфологической теории руслового процесса. При нормальных скоростях плановых деформаций 1,1 м/год на отдельных участках зафиксированы скорости деформаций до 7,3 м/год на нехарактерных участках излучин. Установлено, что для рассматриваемых излучин имеется тенденция к усложнению формы, что объясняется влиянием мерзлотных процессов на руслоформирование.

Ключевые слова: русловый процесс, Ямал, меандры, параметры излучин, многолетняя мерзлота, размыв русла.

Для цитирования: Баскакова А. И., Исаев Д. И. Оценка скоростей деформаций меандрирующих рек Ямала // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 140—150. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-140-150.

HYDROLOGY

Original article

Estimation of deformation rates of meandering rivers of Yamal

Anastasiya I. Baskakova¹, Dmitriy I. Isaev²

¹ State Hydrological Institute, St.-Petersburg, Russia, baskakovan96@gmail.com

² Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

Summary. The paper presents the results of a comparison of the position of the bends of meandering rivers flowing on the territory of the Yamal Peninsula for 1967—1970, 1986 and 2021. The positions of the channel in 1967—1970 and in 1986 were restored based on archival aerial photographs. The position of the riverbed in 2021 was obtained from modern satellite imagery. The object of the study was sections of the meandering channels of the rivers Enzoryakha, Erkatayakha, Shchuchya, Yuribey, Yasavey-Yakha,

with a total length of 1283 km, flowing in the territory of discontinuous permafrost, in conditions of the manifestation of cryogenic landforms.

As a result of comparing the positions of river coastlines at different times, it was found that for plan deformations the average rates of channel displacements are small and amount to 0,3—1,1 m/year, while the maximum rates of planned deformations reached 7,3 m/year. It was noted that in most of the sections considered, the maximum displacement rates are observed in those sections of the bends for which maximum erosion rates are not typical.

An assessment was made of changes in the size of the main characteristics of the bends - the relative completeness of the bends, the relative elongation of the bends and the relative severity of the bends, using the pentagonal polygon technique, which consists in determining the planned position of the inflection points. It has been established that the maximum rates of planned deformations at most of the considered bends are not associated with the meandering process and are caused by changes in the permafrost landscape caused by the degradation of permafrost.

Keywords: Channel process, Yamal, meander, meanders parameters, permafrost, riverbed erosion.

For citation: Baskakova A. I., Isaev D. I. Estimation of deformation rates of meandering rivers of Yamal. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(140—150). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-140-150. (In Russ.).

Введение

Освоение Ямальского полуострова, активно развивающееся в последние годы, требует грамотной оценки природных процессов, протекающих в регионе. Строительство сооружений на Ямале неизбежно связано с гидрографической сетью полуострова. Проектные работы при этом должны опираться на прогноз русловых деформаций. Развитие мерзлотных процессов, высокая степень заболоченности, изменение климата и иные факторы создают особые условия для процесса русловых переформирований, зачастую определяя их исключительные проявления.

Согласно СТО ГУ ГГИ 08.29-2009, для территории Ямала наибольшее распространение имеют свободно меандрирующие русла рек. Свободное меандрирование как тип руслового процесса, согласно гидроморфологической теории [1], проявляется в развитии речных излучин от форм слабовыраженной синусоиды до петлеобразных очертаний в плане с дальнейшим прорывом перешейка излучины и образованием старичного озера. Визуальная оценка форм речных излучин Ямала позволяет сделать вывод об особенностях развития этого процесса в условиях вечной мерзлоты.

В отечественной практике, на наш взгляд, существует острая необходимость в развитии методологии оценки русловых процессов рек в условиях многолетней мерзлоты. Современная нормативная документация требует усовершенствования методик с учетом современных натурных наблюдений. Авторами [2, 3] опубликованы работы, посвященные исследованиям различных аспектов руслоформирования в условиях криолитозоны. Кроме того, некоторые работы по данной теме опубликованы сотрудниками лаборатории эрозии почв и русловых процессов МГУ [4, 5].

В настоящее время в зарубежной практике тема меандрирующих рек в условиях многолетней мерзлоты также вызывает значительный научный интерес. В работе [6] рассматривается влияние многолетнемерзлых грунтов и отсутствия

растительности на руслоформирование. Авторы указывают на значительное увеличение скоростей плановых деформаций под влиянием термокарста. В работе [7] указана роль изменения температуры воды на скорости береговой эрозии рек. Особое внимание зарубежные ученые уделяют моделированию размывов свободно меандрирующих рек в различных условиях [8, 9].

Целью настоящего исследования является оценка параметров излучин рек, скоростей их деформаций, протекающих в условиях многолетней мерзлоты.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных использованы топографические карты меандрирующих рек Ямала масштабом 1:10000 и 1:25000, полученные по данным съемок, выполненных отделом русловых процессов Государственного Гидрологического Института в 1967—1970 гг., и современные снимки спутника Landsat за 2021 г. Для оценки скоростей деформаций использован метод совмещения съемок за разные годы.

Для определения параметров излучин в качестве основы использована методика, опубликованная в [2]. Суть метода заключается в следующем: в речную излучину вписывается пятиугольник, основанием которого является линия шага излучины, проведенная по точкам перегиба, далее определяется вершина излучины как наиболее удаленная от линии шага точка и назначаются две точки на верхнем и нижнем крыльях излучины, характеризующие ее ширину. В соответствии с типизацией излучин, изложенной в [10], для омегаобразных излучин определение их ширин не вызывает особых затруднений, а для сегментных излучин ширина принимается по средней линии. На рис. 1 расстояние 1—5 соответствует шагу излучины λ ; расстояние 2—4 характеризует ширину излучины $B_{\text{н}}$; расстояние 1—2—3—4—5 хорошо соответствует периметру излучины S . Таким образом, имея координаты всех пяти характерных точек, можно рассчитать степень развитости излучины S/λ , вытянутость h/λ , относительную ширину $B_{\text{н}}/\lambda$ и др.

Результаты оценки скоростей деформаций

Работа по совмещению разновременных плановых положений речных русел выполнена для участков пяти рек Ямала: р. Ензорьяха, р. Щучья, р. Юрибей, р. Еркагаяха, р. Ясавей-Яха. Эти реки относятся к категории средних, что позволяет рассматривать скорости их русловых деформаций как характерные для рассматриваемого региона. Результаты совмещения съемок представлены на рисунках 2—6.

Анализ полученных совмещений показывает, что для всех изученных участков речных русел общее смещение положения береговых линий незначительно, что в целом характерно для рек Ямала. Низкие темпы размыва Ямальских рек объясняются низкими температурами воздуха и подстилающих многолетнемерзлых грунтов, определяющих ограниченную возможность свободного руслового потока оказывать воздействие на форму русла. Характерные скорости деформаций для рассматриваемых участков приведены в табл. 1.

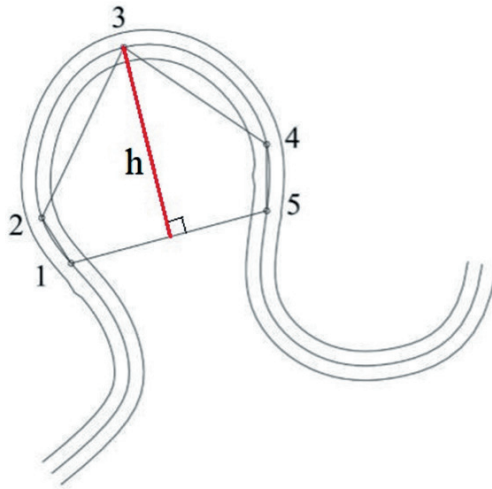


Рис. 1. Схема определения параметров излучин:

1 и 5 — точки перегиба излучины; 2 и 4 характеризуют ширину излучины; 3 — максимально удалена от линии шага излучины; h — нормаль от 3 до 1—5.

Fig. 1. Scheme for determining the parameters of bends:

1 and 5 — inflection points of the bend; 2 and 4 characterize the width of the bend; 3 — maximum distance from the bend step line; h — normal from 3 to 1—5.

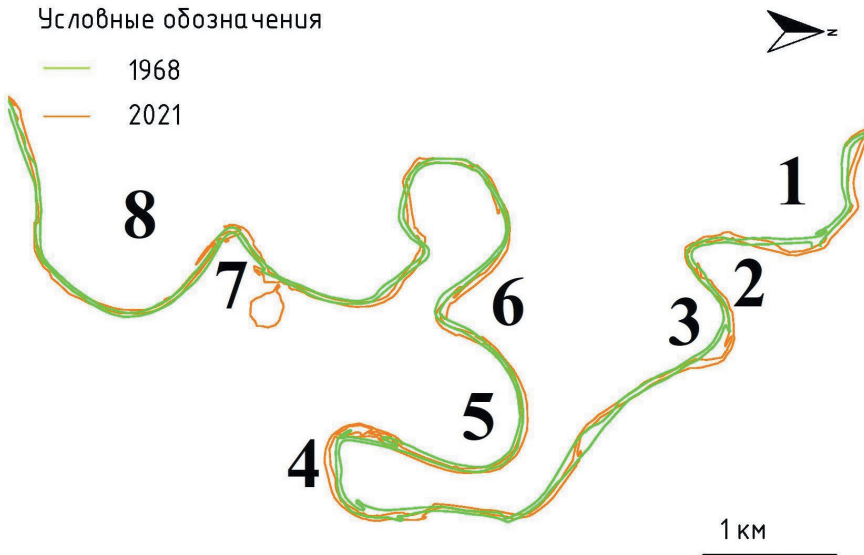


Рис. 2. Совмещение положения русла реки Энзорьяха.

Fig. 2. Coincidence of the position of the Enzoryakha River bed.

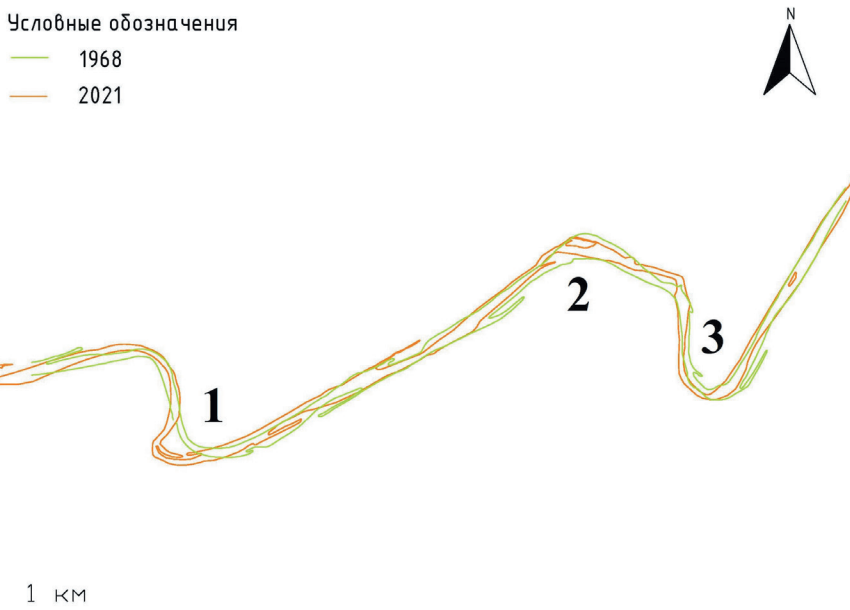


Рис. 3. Совмещение положения русла реки Еркатаяха.

Fig. 3. Coincidence of the position of the Erkatayaha River bed.

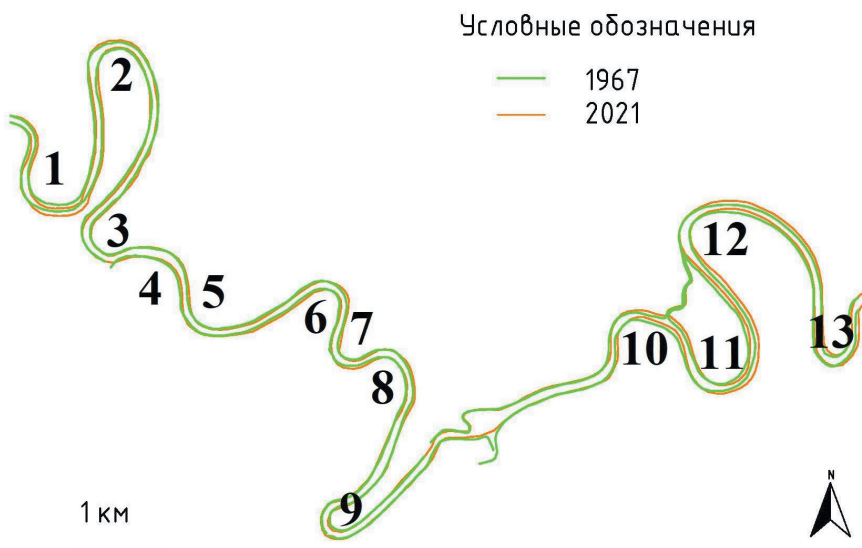


Рис. 4. Совмещение положения русла реки Щучья.

Fig. 4. Coincidence of the position of the Shchuchya River bed.

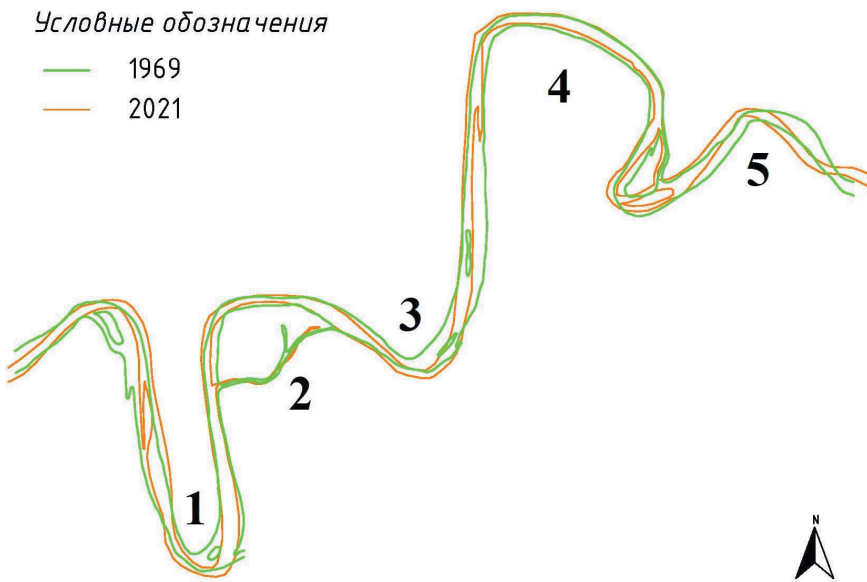


Рис. 5. Совмещение положения русла реки Юрибей.

Fig. 5. Coincidence of the position of the Yuribey River bed.



Рис. 6. Совмещение положения русла реки Ясавей-Яха.

Fig. 6. Coincidence of the position of the Yasavei-Yaha River bed.

Скорости русловых деформаций
Rates of channel deformations

Река	Период, гг.	Средняя скорость смещения на участке, м/год	Максимальная скорость смещения на участке, м/год
Ензорьяха	1968—2021	0,6	2,1
Еркатаяха	1968—2021	0,9	7,3
Щучья	1967—2021	0,3	0,9
Юрибей	1969—2021	1,1	3,2
Ясавей-Яха	1969—2021	0,7	4,4

Однако практически на всех рассмотренных реках отмечаются локальные участки, на которых речное русло значительно изменило свое положение. Наиболее заметно это на сегментной излучине р. Еркатаяха (см. рис. 4 излучина 1).

Для каждого разновременного положения русла этих пяти рек определены параметры излучин по вышеизложенному методу. На рис. 7 приведены гистограммы распределения изменения параметров излучин за период с 1968 г. по 2021 г. Для удобства анализа на гистограммах показано «положение неизменения» — положение, при котором параметр для разных по времени съемок не менялся.

При классическом сценарии свободного меандрирования происходит сближение центральных участков выше и ниже расположенных излучин с последующим образованием прорыва перешейка [11], что в рамках рассмотрения параметров излучин должно проявляться в значительном увеличении ширины и степени развитости излучины в течение времени. Высота h для развитых излучин с течением времени нарастает, но с наименьшими скоростями.

Из анализа гистограмм на рис. 7 видно, что для большинства излучин характерен незначительный рост всех рассматриваемых параметров, что в целом характерно для свободно меандрирующих рек, протекающих в широких долинах. Однако на всех реках имеются излучины, для которых указанные параметры показывают не рост, а уменьшение. Это можно объяснить тем, что на этих излучинах появились дополнительные вершины, которые изменили конфигурацию основных ее элементов. Усложнение конфигурации таких излучин нехарактерно для свободного меандрирования и свидетельствует о влиянии факторов среды. Вероятной причиной подобных аномалий следует считать несистемное развитие таликовых подрусовых зон.

На рассмотренных реках отмечаются локальные участки с резким ростом скоростей деформаций, не объясняющиеся гидроморфологической теорией (излучина 1 на р. Еркатаяхе, излучина 7 на р. Ензорьяхе). При детальном изучении исходных спутниковых снимков обнаружено, что на такой резкий рост вытянутости повлияла просадка термокарста в вершине излучины, обусловившая провал русла.

На р. Юрибей (излучины 3, 5), р. Ясавейяхе (излучина 2) и р. Щучья (излучина 3) отмечаются сужающиеся излучины при одновременном развитии вытянутости и развитости. Это объяснимо локальными разрушениями долины реки

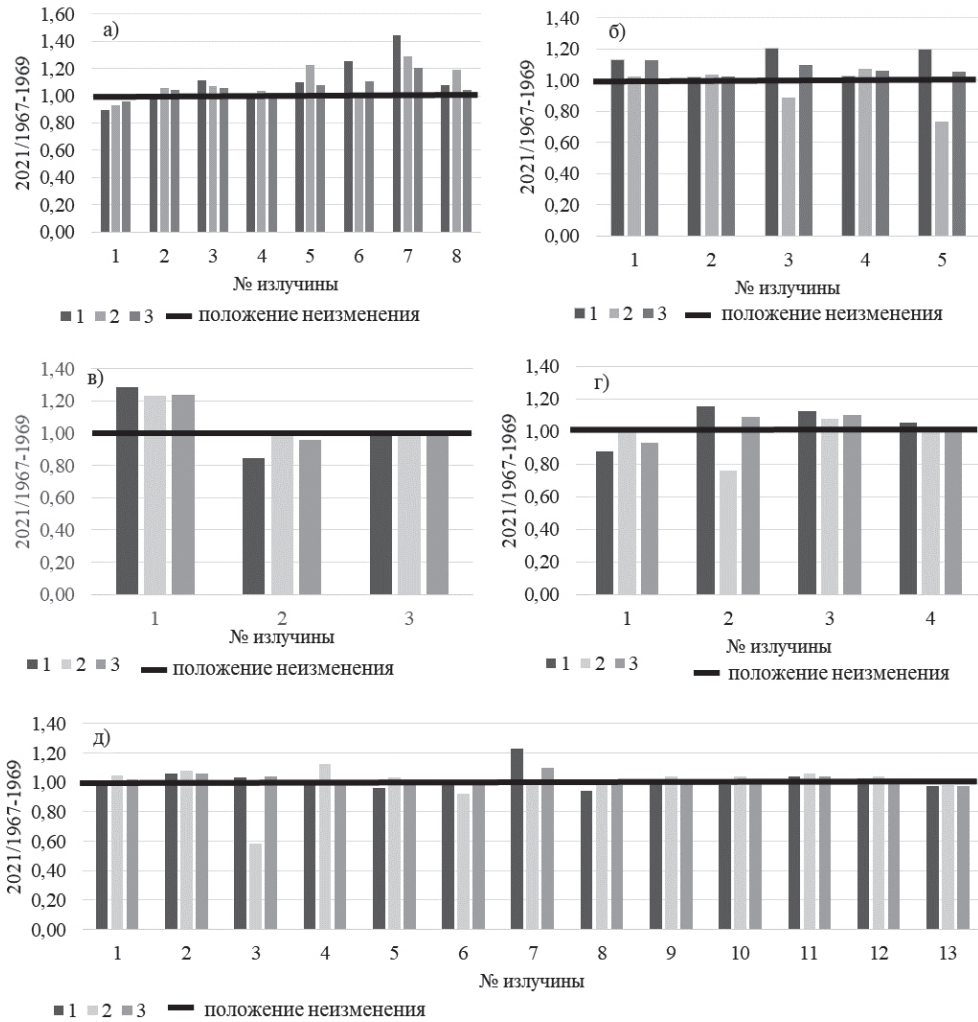


Рис. 7. Гистограммы распределения изменения параметров излучин *а* — р. Энзорьяха, *б* — р. Юрибей, *в* — р. Еркатаяха, *г* — р. Ясавейяха, *д* — р. Щучья.

1 — изменение вытянутости излучины $(h/\lambda)_{2021}/(h/\lambda)_{1967-1969}$;

2 — изменение полноты излучины $(B_n/\lambda)_{2021}/(B_n/\lambda)_{1967-1969}$;

3 — изменение относительной выраженности излучины $(S/\lambda)_{2021}/(S/\lambda)_{1967-1969}$.

Fig. 7. Histograms of distribution of changes in parameters of bends *a* — r. Enzoryakha, *b* — r. Yuribey, *c* — r. Erkatayakha, *d* — r. Yasaveyakha, *y* — r. Shchuchya.

1 — changing the elongation of the bend $(h/\lambda)_{2021}/(h/\lambda)_{1967-1969}$;

2 — changing the completeness of the bend $(B_n/\lambda)_{2021}/(B_n/\lambda)_{1967-1969}$;

3 — changing in the relative severity of the bend $(S/\lambda)_{2021}/(S/\lambda)_{1967-1969}$.

на границах пояса меандрирования, что вызвано деградацией многолетнемёрзлых форм рельефа.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты совмещения положения речных русел за 53-летний период, полученные по данным съемок, выполненных отделом русловых процессов Государственного Гидрологического Института в 1967—1970 гг. и современные снимки спутника Landsat за 2021 г. Это позволило выполнить оценку изменения параметров излучин за разные годы на ряде рек полуострова Ямал. Анализ результатов показал, что на темпы и характер русловых переформирований всех рассмотренных участков рек локальное влияние оказывают мерзлотные процессы.

При общих малых скоростях деформаций не более 1,1 м/год отмечаются участки с максимальными скоростями размыва до 7,3 м/год. По результатам дешифрирования установлено, что на всех рассмотренных участках рек максимальные скорости объясняются изменениями криогенных форм рельефа [13].

В связи с этим стоит отметить, что при оценке русловых процессов меандрирующих рек в зоне многолетней мерзлоты необходимо оценивать локальные элементы мерзлотного рельефа. В условиях изменения климата на форму речного русла наибольшее влияние могут оказывать именно мерзлотные формы рельефа (термокарст) и их разрушения.

Список литературы

1. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снисченко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л.: Изд. Гидрометеоиздат, 1982. 273 с.
2. Исаев Д. И., Иванова О. И., Баскакова А. И. Методика описания речных излучин (на примере рек Ямала) // Гидрометеорология и экология. 2021. №63. С. 227—235. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-227-235.
3. Баскакова А. И. Использование теории ландшафтоведения для оценки распространения различных типов речных русел на территории Арктической зоны Российской Федерации // Проблемы Арктики и Антарктики, 2024. Том 70, №2. №63. С. 174—184. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-174-184>.
4. Камышев А. А., Куракова А. А., Тарбеева А. М. Распространение и морфометрические характеристики четковидных русел северной части степной зоны Русской равнины // Геоморфология и палеогеография, 2024. №4. С. 134—149.
5. Чалов Р. С., Чалова Е. Р. Русловые процессы на реках полуострова Ямал и их картографирование // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о земле, 2024. №3. С. 308—314. doi:10.35634/2412-9518-2024-34-3-308-314.
6. Levy J. Meandering river evolution in an unvegetated permafrost environment // *Geomorphology*. 2023. Vol. 432, 108705. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4333052>.
7. Douglas M. M. Ablation-Limited Erosion Rates of Permafrost Riverbanks // *JGR Earth Surface*. 2023. Vol. 128, Issue 8. – URL: <https://doi.org/10.1029/2023JF007098>.
8. Crosato A. Analysis and modelling of river meandering: Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor / Alessandra Crosato. Technische Universiteit Delft. Amsterdam, The Netherlands, 2008. 268 p.
9. Treat C. Hydrologic Controls on Peat Permafrost and Carbon Processes: New Insights From Past and Future Modeling // *Frontiers Environmental Science*. 2022. Vol. 10. URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.892925>.

10. Чалов Р. С., Завадский А. С., Панин А. В. Речные излуины. М.: Изд-во МГУ, 2004. 371 с.
11. Попов И. В. Методологические основы гидроморфологической теории руслового процесса: Избранные труды. СПб.: Нестор-История, 2012. 304 с.
12. Маккавеев Н. И. Экспериментальная геоморфология. Выпуск II. Издательство Московского университета, 1969. 194 с.
13. Достовалов Б. Н. Кудрявцев В. А. Общее мерзлотоведение. М.: Изд. МГУ, 1967. 444 с.

References

1. Kondratev N. E., Popov I. V., Snishchenko B. F. *Osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesa = Fundamentals of the hydromorphological theory of channel process*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1982: 273 p. [In Russ.].
2. Isaev D. I., Ivanova O. I., Baskakova A. I. Methodology for describing river bends (using the example of the Yamal rivers). *Gidrometeorologiya i ekologiya = Hydrometeorological and ecology*. 2021, 66: 227—235. [In Russian].
3. Baskakova A. I. Using the theory of landscape science to assess the distribution of various types of river beds in the Arctic zone of the Russian Federation. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Problems of Arctic and Antarctic*. 2021; 2(70): (174—184). [In Russ.].
4. Kamyshev A. A., Kurakova A. A., Tarbeeva A. M. Distribution and morphometric characteristics of the chetkovid riverbeds of the northern part of the steppe zone of the Russian plain. *Geomorphologia i paleogeografiya = Geomorphology and paleogeography*. 2024; 4(55): (134—149). [In Russ.].
5. Chalov R. S., Chalova E. R. Riverbed processes on the rivers of the Yamal Peninsula and their mapping. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o zemle = Bulletin of the Udmurt University. Biology series. Earth Sciences*. 2024; 3(34): (308—314). [In Russ.].
6. Levy J. Meandering river evolution in an unvegetated permafrost environment. *Geomorphology*. 2023; (432): 108705. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4333052>.
7. Douglas M. M. Ablation-Limited Erosion Rates of Permafrost Riverbanks. *JGR Earth Surface*. 2023; 128(8). URL: <https://doi.org/10.1029/2023JF007098>.
8. Crosato A. Analysis and modelling of river meandering: Proefschrift ter verkrijging van de graad van doctor / Alessandra Crosato; Technische Universiteit Delft. Amsterdam, The Netherlands, 2008: 268 p.
9. Treat C. Hydrologic Controls on Peat Permafrost and Carbon Processes: New Insights From Past and Future Modeling. *Frontiers Environmental Science*. 2022: 10 URL: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.892925>.
10. Chalov R. S., Zavadsky A. S., Panin A. V. *Rechnye izluchiny = River bends*. М.: Publishing house of Moscow University, 2004: 371 p. [In Russ.].
11. Popov I. V. *Metodologicheskie osnovy gidromorfologicheskoi teorii ruslovogo protsesa: Izbrannyye trudy = Methodological foundations of the hydromorphological theory of the riverbed process: Selected works*. Saint-Petersburg: Nestor-History, 2012: 304 p. [In Russ.].
12. Makkaveev N. I. *Ekspierimentalnaya geomorfologiya. Vypusk II = Experimental geomorphology. Issue II*. Moscow: Moscow University Publishing House, 1969:194 p. [In Russ.].
13. Dostovalov B. N. Kudryavtsev V. A. *Obshchee merzlotovedenie = General permafrost study*. Moscow: Moscow University Publishing House, 1967: 444 p. [In Russ.].

Сведения об авторах

Баскакова Анастасия Ивановна, независимый исследователь.

Исаев Дмитрий Игоревич, канд. геогр. наук, доцент, заведующий кафедрой водно-технических изысканий, Российский государственный гидрометеорологический университет.

Information about authors

Baskakova Anastasia Ivanovna, postgraduate student, State Hydrological Institute.

Isaev Dmitry Igorevich, PhD in Geogr., Associate Professor, Head of the Department of Water-Engineering Surveys, Russian State Hydrometeorological University.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 14.01.2025

Принята к печати 25.02.2025

The article was received on 14.01.2025

The article was accepted on 25.02.2025