

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УСТОЙЧИВОСТЬ БЕРЕГОВ СУДОХОДНЫХ РЕК И КАНАЛОВ МЕЛИОРАТИВНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В. Е. Левкевич, доктор технических наук

В. В. Кобяк, кандидат технических наук

Д. С. Миканович, кандидат технических наук

А. В. Бузук, кандидат технических наук

Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь,
г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлен системный анализ факторов, определяющих устойчивость берегов судоходных рек и каналов различного назначения, в том числе и мелиоративного, расположенных на территории Беларуси. Определены ключевые природные и антропогенные факторы, влияющие на процессы берегоразрушения: гидрологические характеристики, геолого-геоморфологическое строение берегов и гидродинамические воздействия. На основе проведенной оценки факторов разработан алгоритм, структурирующий процесс анализа и прогнозирования деформаций берегов. Алгоритм позволяет перейти от разрозненных наблюдений к комплексному мониторингу и оценке рисков, который имеет практическую значимость для планирования берегозащитных мероприятий и обеспечения безопасной эксплуатации водных путей и крупных мелиоративных каналов. Исследование подкреплено результатами натурных обследований некоторых участков рек и каналов.

Ключевые слова: деформация, судоходные реки, мелиоративные каналы, берегоформирующие факторы, эрозия.

**V. E. Levkevich, V. V. Kobyak, D. S. Mikanovich,
A. V. Buzuk.**

ALGORITHM FOR ASSESSING FACTORS DETERMINING THE STABILITY OF THE BANKS OF SHIPPING RIVERS AND LAND RECLAMATION CANALS

Abstract. This paper presents a systematic analysis of the factors determining the stability of the banks of shipping rivers and canals for various purposes, including drainage, located in Belarus. Key natural and anthropogenic factors influencing coastal erosion processes are identified: hydrological characteristics, geological and geomorphological structure of the banks, and hydrodynamic impacts. Based on the assessment of these factors, an algorithm has been developed that structures the process of analyzing and predicting coastal deformations. This algorithm enables a transition from isolated observations to comprehensive monitoring and risk assessment, which has practical significance for planning coastal protection measures and ensuring the safe operation of waterways and large drainage canals. The study is supported by the results of in-situ surveys of selected river and canal sections.

Keywords: deformation, shipping rivers, drainage canals, bank-forming factors, erosion.

Введение

Разрушение (деформации) берегов – одно из масштабных негативных явлений, встречающееся на судоходных реках, каналах мелиоративного назначения и водохранилищах. По своей сути данный процесс представляет собой горизонтальные и вертикальные боковые деформации русла реки или канала, которые в ряде случаев угрожают человеку, создают риски для эксплуатации береговых гидротехнических сооружений и объектов экономики.

Строительство коммуникаций вблизи береговой линии, не учитывающее динамики

русловых процессов, также приводит к опасному разрушению береговых склонов. Кроме того, в результате антропогенной деятельности часто видоизменяются природные факторы, непосредственно воздействующие на горизонтальные и вертикальные деформации (перемещения) русла.

Для прогноза горизонтального перемещения – смещения русла важен учет его морфологии, гидрологических факторов, а также особенностей строения берега: высоты, уклонов и характера растительного покрова.

Основная часть

Общая протяженность рек Беларуси составляет более 50 тыс. км, из них пригодны для транспортного судоходства около 3,5 тыс. км. В настоящее время используется примерно 1,2 тыс. км, в том числе на Днепре и Припяти – около 400 км, Березине – 300, Соже – 120, Немане – 60, Западной Двине – 50, Днепро-Бугском канале – 244, других водоемах – 50 км [1].

В рамках проекта «Международный водный путь U-40» в течение последних 20 лет реконструировано 5 судоходных шлюзов на гидроузлах Днепро-Бугского канала («Новосады», «Дубой», «Кобрин», «Тришин», «Залузье») и ряде водопропускных сооружений, обеспечивающих в нем регулирование стока.

На территории Беларуси р. Днепр судоходна практически по всей своей длине: на ней есть множество речных пристаней и два порта, расположенных в Речице и Могилеве. Река Припять – часть внутренних водных путей Беларуси; на всем своем протяжении от Пинска до Мозыря она судоходна и представляет собой основную часть Днепро-Бугского водного пути. Совместно с Днепро-Бугским каналом Припять выступает основным внешнеторговым водным путем Беларуси, проходящим по территории Беларуси, Украины и Польши по следующему маршруту от Балтийского до Черного моря: Гданьск – Варшава – Брест – Пинск – Киев – Днепр – Херсон.

Днепро-Бугский канал (ранее – Королевский канал) – судоходный канал на территории Беларуси, построенный в период 1775–1783 гг. Он соединяет реки Пину (приток Припяти) и Мухавец (приток Западного Буга). Его общая длина – 244 км, при этом протяженность канала от Бреста до Пинска составляет 196 км (в том числе канализованная часть р. Пины – 74 км, водораздельная часть канала – 58 км; канализованная часть р. Мухавец – 64 км) (рис. 1).

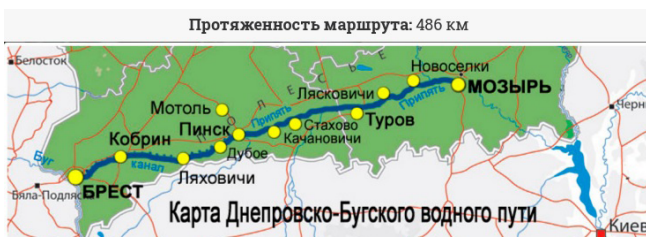


Рис. 1. Днепро-Бугский канал на карте Беларуси

Августовский канал – судоходный канал в Беларуси и Польше, соединяющий реки Вислу и Неман [1–3]. Его длина составляет 101,2 км, в том числе 22 км – на территории Беларуси и около 79 км – на территории Польши [1]. На канале функционирует ряд шлюзов и разводных мостов. В белорусской части канала расположены: три шлюза («Немново», «Домбровка» (рис. 2), «Волкушек» и две плотины, а также четырехкамерный шлюз «Немново», имеющий самый большой на канале перепад уровней воды (около 10 метров). Шлюз «Кужинец» является пограничным: половина его расположена в Польше, другая – в Беларуси, на нем и расположен пограничный переход «Лесная – Рудавка».



Рис. 2. Шлюз «Домбровка» на Августовском канале

Особенно важно оценить устойчивость и потенциальные риски разрушения берегов судоходных рек и каналов при решении задач по определению основных берегоформирующих факторов и прогнозированию возможных ущербов от проявления процессов деформаций. Количественная оценка интенсивности размыва береговых склонов на реках достаточно сложна вследствие их многофакторности и динамики [1–12]. В условиях руслового потока основным берегоформирующим фактором яв-

ляется угол подхода стрежня потока к берегу: чем он больше, тем больше скорость размыва.

Форма берегового склона – это морфологическая характеристика степени интенсивности его размыва [7–9]. При очень сильном размыве берег имеет вертикальный обрыв

(рис. 3, а); при сильном – обрыв со слабо выраженной ступенчатостью (рис. 3, б); при среднем – ступенчатый уступ (рис. 3, в); отдельные ступеньки покрыты травянистой растительностью и обвалившейся дерниной при слабом размыве (рис. 3, г).

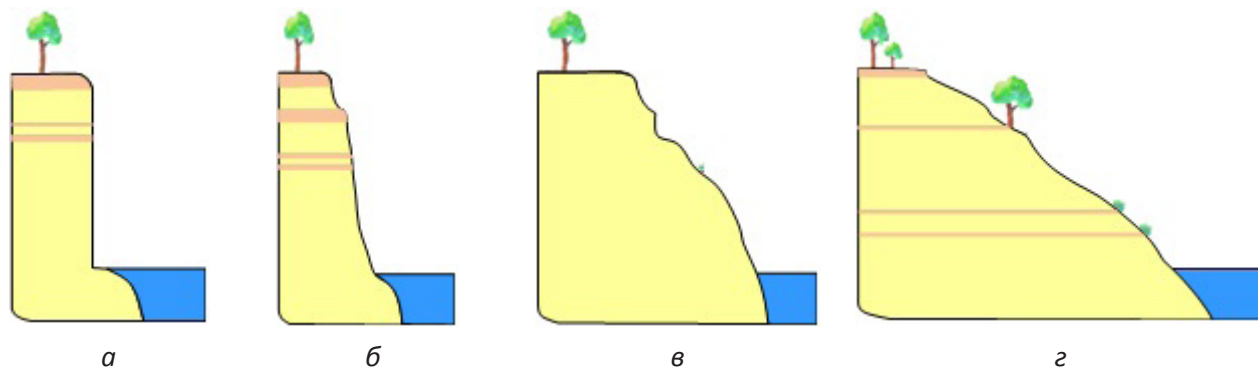


Рис. 3. Формы береговых откосов в зависимости от интенсивности размыва

Состав размываемых грунтов также определяет интенсивность деформаций русла. Как известно, русло реки на большей части своего протяжения незначительно соприкасается с коренными породами. Противоэрозионная устойчивость грунтов зависит от размера, удельного веса, степени неоднородности (сортированности) и связности частиц, составляющих грунт. В Беларуси наиболее распространены несвязные грунты, что значительно влияет на устойчивость береговых склонов.

Неточности и некоторая неопределенность в вычислении интенсивности размыва берегов связаны с тем, что разрушение берегов происходит в результате проявления и взаимодействия двух наиболее важных процессов: обрушения масс материала, слагающего берега, и удаления этого материала от подножья берегового склона. Первый из этих процессов определяется физическими характеристиками грунтов: механическим составом (глины, суглинки или пески), связностью, объемным весом, способностью насыщения влагой, углом внутреннего трения в сухом и влагонасыщенном состоянии. Второй процесс целиком зависит от транспортирующей способности потока и морфологии речного русла [1, 7–10].

Теоретически сложно рассчитать достоверную скорость размыва (эрозии) берегов. Осредненные скорости их размыва определяются на основе использования эмпирических зависимостей, корреляционного анализа и метода экспертных оценок. Например, по-

лучена следующая формула для условий рек средней европейской части России [7–9]:

$$C_b = 10,6 \times I^{0,57} \times Q_{\max}^{0,47}, \quad (1)$$

где C_b – скорость размыва пойменных берегов; I – уклон реки; $Q_{\max}$ – средний максимальный расход, м³/с.

Оценивать риск аварийной ситуации при этом возможно с использованием детерминистических подходов [6–9]. Вероятность события будет обуславливаться задаваемой обеспеченностью расхода половодья при соответствующем расчетном расходе, а ущерб – потерей земельных участков и строений при соответствующей утрате территории.

Наряду с геологическим строением берегового склона, имеет значение и высота его уступа: чем он выше, тем меньше интенсивность размыва. При увеличении высоты берега по единице длины размываемой береговой линии в русло поступает большее количество наносов, что снижает размывающую способность потока. Это отражено в формуле, предложенную К. М. Берковичем [4] для расчета C – скорости отступления берега (м/год):

$$C = K (Q^2 I / d H_6), \quad (2)$$

где Q – среднегодовой расход воды (м³/с); I – уклон потока; d – диаметр частиц, слагающих берег (мм); H_6 – его высота над меженным уровнем воды (м), K – коэффициент (м³/с)⁻¹, зависящий от размера реки (для условий Беларуси $5,5 \times 10^{-3}$).

В табл. 1 приведены данные по скорости размыва берегов рек Беларуси с различным геологическим строением [1].

Таблица 1. Скорости размыва берегов в зависимости от их геологического строения

Характеристика размыва	Скорость размыва (м/год) в зависимости от геологического строения берегового склона			
	Пески и супесь	Суглинки	Глина	Торф
Слабый	< 2	< 1	$< 0,5$	$< 0,2$
Средний	$2 \div 5$	$1 \div 2$	$0,5 \div 1$	$0,2 \div 0,5$
Сильный	$5 \div 10$	$2 \div 5$	$1 \div 2$	$0,5 \div 1$
Очень сильный	> 10	> 5	> 2	> 1

Основные показатели гидрологического режима, влияющие на переформирования русла, – это объем и неравномерность стока, интенсивность и амплитуда изменений уровня воды, характер ледового режима и насыщенность потока наносами.

Начало процесса отступания берега часто происходит из-за разрушения основания откоса вследствие того, что основания берега размываются потоком или подтачиваются плавающим льдом, а также в результате термоэрозии грунта искусственным или естественным углублением русла. На подъеме и пике половодья, когда энергия потока наибольшая, дно русла в основании берега размывается, особенно если оно сложено несвязным, мелкозернистым материалом. При врезке понижаются отметки дна и увеличиваются высоты берега. Одновременно с повышением уровня в русле грунт насыщается водой в результате фильтрации со стороны реки и намокает при повышении уровня грунтовых вод и капиллярном поднятии. Вес грунта увеличивается при уменьшении сцепления и угла внутреннего трения. В результате устойчивость грунта на откосе нарушается и при падении уровня воды он приходит в движение, что нарушает устойчивость его массива. Такие процессы наблюдались на Августовском канале вблизи

участка «Домбровка» и на р. Неман (недалеко от Гродненской ГЭС).

Местоположение зон размыва берегов связано с формой русла, то есть его морфодинамическим типом.

В зависимости от геолого-геоморфологического строения долин рек русла могут быть:

широкопойменными ($B_n > 2 \div 3b_p$, где B_n – ширина поймы реки, b_p – ширина русла), где в нашем случае наблюдаются интенсивные размывы пойменных или террасовых берегов;

врезанными ($B_n < b_p$, или пойма отсутствует), когда размывы берегов локальны и невелики;

адаптированными ($b_p < B_n < 2 \div 3b_p$), занимающими промежуточное положение между вышеприведенными [9].

Развитие рельефа речной поймы в конечном итоге определяется русловой эрозией, процессами переотложения размываемого грунта в виде наносов и их аккумуляцией при затоплении пойм. Кроме того, большинство судоходных рек Беларуси имеют достаточно извилистую форму русла в силу специфики рельефа местности. Аналогичный процесс протекает в судоходном либо мелиоративном канале или же водохранилище, он лишь более растянут во времени. Отличие же заключается в том, что канал имеет форму, близкую к прямолинейной.



а



б

Рис. 4. Процессы боковой эрозии: а – Августовский канал, б – р. Неман

Что касается судоходных каналов, предназначенных для транспортировки грузов и судоходства, на них сооружаются судоходные шлюзы, входящие, как правило, в состав плотин водохранилищ. Берега рек в чаше искусственного водного объекта превращаются в озеровидный водоем, и там развиваются существенно иные процессы, а именно:

- волновая абразия способствует возникновению различных склоновых процессов (осыпей, обвалов, оползней и т. д.), которые зависят от геологических и морфометрических характеристик берегового склона;
- аккумуляция наносов «волнового поля» приводит к образованию кос, террас, пересыпей и других озерных аккумулятивных форм [10–12].

Чтобы оценить устойчивость берегового склона от размыва, исходя из его геоморфологических особенностей и конфигурация русла реки, широко применяются такие показатели, как число Лохтина ($L = d/I$, где d – крупность грунта, мм; I – уклон русла и коэффициент стабильности русла по Маккавееву ($K_c = d/b \times I$, где b – ширина русла, м) [1, 7].

На основании проведенных расчетов Н. И. Маккавеев обосновал типизацию не-

которых участков русла р. Неман по степени опасности размыва берегов (табл. 2).

На рис. 5 приведен разработанный алгоритм поэтапного разрушения берега судоходной реки (канала).

На первом этапе нарушается профиль устойчивого равновесия из-за воздействия на берег факторов, приводящих к развитию процесса его разрушения. На втором этапе волны, взаимодействуя с берегом, вымывают грунт и перемещают его к основанию берегового склона. На третьем этапе интенсифицируется процесс нарушения устойчивости берега: разрушается береговой склон, образуется подводная часть отмели за счет врезки в коренной берег и аккумуляции материала переработки. Четвертый этап характеризуется выработкой устойчивого профиля равновесия и затуханием процесса разрушения берега.

Чтобы оценить состояние креплений берегов судоходных рек и откосов каналов, были проведены натурные обследования их технического состояния на территории Полесья. В результате выделены основные типы деформаций креплений (табл. 3).

Таблица 2. Классификация русла по опасности размыва берегов р. Неман [7]

Степень опасности русла	Устойчивость состояния русла	Опасность в баллах	Устойчивость		Интенсивность размыва, м/год
			L	K_c	
Низкая	Устойчивое	1	$> 2,5$	> 100	$0,01 \div 0,18$
Средняя	Средней устойчивости	2	$2,0 \div 2,5$	$50 \div 100$	до 0,57
Относительно высокая	Слабоустойчивое	3	$1,0 \div 2,0$	$20 \div 50$	до 0,86
Высокая	Неустойчивое	4	$< 0,5$	< 20	$1,16 \div 3,62$

Таблица 3. Нарушение устойчивости сооружений на р. Припять

Выявленные нарушения устойчивости берегов и защитных сооружений	
Типы деформаций	Признаки проявления деформаций
Разрушение участков берегов в зоне русла, проходящего через населенный пункт (рис. 6, а)	На незащищенных берегах ярко выражено ледовое воздействие: имеются перемещения грунта под воздействием льда
Разрушение участков берегов в зоне русла, проходящего через населенный пункт (рис. 6, б)	Протекают процессы абразии и русловой эрозии на отдельных участках берега
Разрушение участков берегов в зоне русла, проходящего вне населенного пункта (рис. 6, в)	На незащищенных берегах имеются перемещения грунта под воздействием льда и поверхностной водной эрозии
Разрушение плит крепления на участках, находящихся у опор моста через реку (рис. 6, г)	Наблюдается разрушение верхнего слоя бетона на железобетонных плитах крепления берегозащитных сооружений

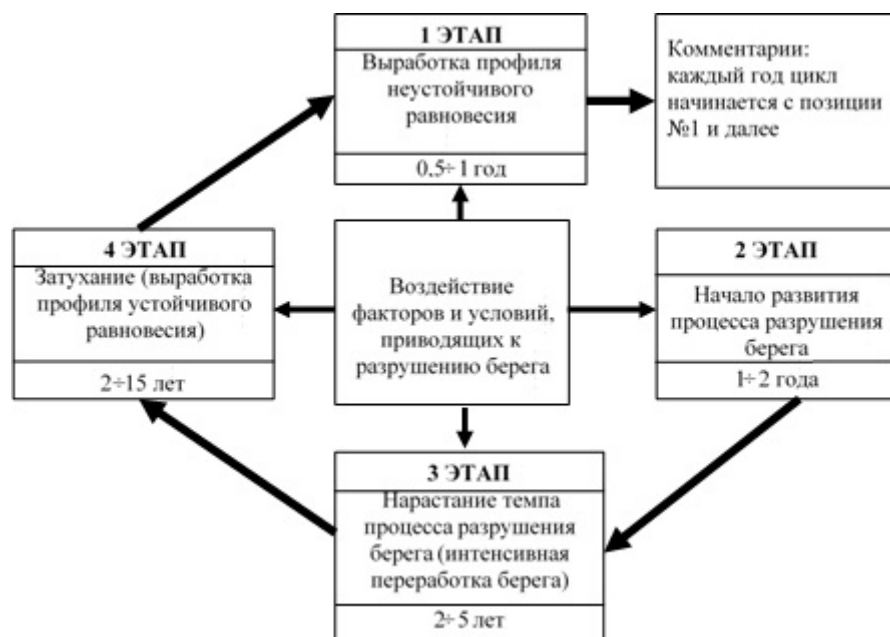


Рис. 5. Алгоритм разрушения берега судоходной реки (канала)

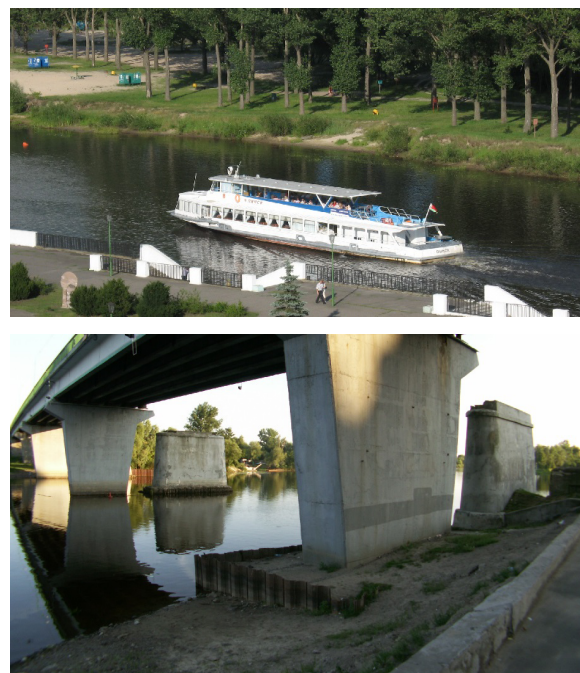


Рис. 6. Разрушение участков берега на р. Припять

Анализ результатов натурных исследований устойчивости креплений и берегозащитных мероприятий (с оценкой характера и масштабов повреждений) в бассейнах Припяти, Мухавца, Пины, Немана, Березины, Западной Двины, Днепра, Сожа, а также на Днепровско-Бугском и Микашевичском каналах Вилейско-Минской водной системы, Августовском канале и других показал, что деформации берегов и берегоукрепления, приведенных в табл. 3, указывают на аварийное состояние [1].

Как показал статистический анализ деформаций, наиболее характерными повреж-

дениями берегоукрепительных сооружений являются разрушения заполнения швов, что сопряжено с выносом из тела сооружения грунта, песчано-гравийной подготовки и обратного фильтра, появлением трещин и разломов с последующей просадкой плит креплений независимо от конструкции.

Вышесказанное позволило уточнить структуру алгоритма по определению основных факторов, влияющих на устойчивость берегов судоходных рек и каналов (рис. 7).



Рис. 7. Последовательность определения основных факторов, влияющих на устойчивость берегов

Заключение

Установлен и систематизирован комплекс основных факторов, определяющих устойчивость берегов судоходных рек и каналов Беларуси. В него входят гидрологические характеристики (расходы и уровни воды, уклон, ледовый режим), геолого-геоморфологическое строение берегов (состав и свойства грунтов, высота уступа, морфодинамический тип русла), гидродинамические воздействия (угол подхода стрежня потока, волновая абразия). Особую значимость приобретают антропогенные факторы, связанные с эксплуатацией водных путей.

Разработанный алгоритм, описывающий процессы разрушения коренных берегов под воздействием берегоформирующих факторов, составляет структурированную основу для комплексного анализа устойчивости береговых склонов водных объектов, принадлежащих к различным типам судоходных рек, ме-

лиоративных каналов и водохранилищ. В них интегрируются ключевые морфологические, гидрологические и геологические параметры, что позволяет перейти от разрозненных наблюдений к системному мониторингу и прогнозированию данных процессов.

Практическая значимость проведенной работы заключается в создании методической базы для оценки рисков размывов и аварийных ситуаций, а также для планирования эффективных берегозащитных мероприятий на существующих судоходных участках рек и каналов Беларуси, потенциально подверженных разрушению.

Дальнейшее развитие исследований в данном направлении позволит разработать более точные прогнозные модели и оптимизировать затраты на содержание и реконструкцию берегоукрепительных сооружений.

Список использованных источников

1. Михневич, Э. И. Устойчивость русел и регулирование стока судоходных рек и каналов / Э. И. Михневич, В. Е. Левкевич. – Мн. : Право и экономика, 2022. – 188 с.
2. Разиньков, Н. Д. Динамика эрозионных процессов берегов рек как фактор риска наводнений / Н. Д. Разиньков // Вестник Воронежского гос. ун-та. Серия: Геология. – 2016. – № 1. – С. 153–154.

3. Короновский, Н. В. Основы геологии / Н. В. Короновский, А. Ф. Якушева. – М. : Высшая школа, 1991. – 416 с.
4. Беркович, К. М. Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ / К. М. Беркович. – М. : Географ. ф-т МГУ. – 2012. – 163 с.
5. Финаров, Д. П. Геоморфологический анализ и прогнозирование переформирования береговой зоны и дна водохранилищ / Д. П. Финаров. – Л. : Наука, 1986. – 228 с.
6. Роль современных геологических процессов в формировании инженерно-геологических условий территорий Гомеля / А. Н. Галкин, Е. Ю. Трацевская, А. В. Матвеев, Л. А. Нечипоренко, Н. А. Шишонок // Літасфера. – 2013. – № 2. – С. 67–73.
7. Маккавеев, Н. И. Русловые процессы / Н. И. Маккавеев, Р. С. Чалов. – М. : Изд-во МГУ, 1986. – 264 с.
8. Чалов, Р. С. Почему размываются берега рек / Р. С. Чалов // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – № 2. – С. 99–106.
9. Мележ, Т. А. Русловые процессы и устойчивость русла реки Неман (в пределах Республики Беларусь) / Т. А. Мележ // Вестник Пермского ун-та. Геология. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 104–110.
10. Широков, В. М. Рекомендации по оценке воздействия малых водохранилищ на окружающую среду / В. М. Широков, В. Е. Левкевич, П. С. Лопух. – Мн. : БГУ, 1994. – 112 с.
11. Современная динамика рельефов Беларуси / А. В. Матвеев [и др.]. – Мн. : Навука і тэхніка, 1991. – 102 с.
12. Левкевич, В. Е. Крепление берегов и верховых откосов подпорных сооружений гидроузлов Беларуси / В. Е. Левкевич. – Мн. : БНТУ, 2019. – 172 с.

Поступила 8 января 2026 г.