

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ / REVIEW PAPER
УДК 626
DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.964-975

Размыв берегов рек: современное состояние исследований

Фам Нгок Тхинь
Университет Туйлои; г. Ханой, Вьетнам

АННОТАЦИЯ

Введение. Размыв берегов рек представляет собой сложный многомерный процесс, формирующий речные ландшафты, определяющий транспорт наносов и устойчивость экосистем. Он оказывает существенное воздействие на инфраструктуру и условия жизни населения, особенно в прибрежных и дельтовых районах. В условиях глобальных изменений окружающей среды значение данной проблемы возрастает.

Материалы и методы. Обзор основан на синтезе более чем 40-летнего междисциплинарного исследования процессов размыва берегов. Проведен систематический поиск литературы по семи тематическим направлениям: механизмы размыва, методы измерений, моделирование, растительность, климат, антропогенное влияние и социально-экономические последствия. Применялись современные методы, включая дистанционное зондирование высокого разрешения, моделирование (BSTEM) и седиментологический анализ источников наносов.

Результаты. Установлено, что размыв обусловлен взаимодействием гидравлических сил, свойств почвы, характеристик растительности, климатических колебаний и антропогенных вмешательств. Несмотря на достижения в области мониторинга и моделирования, сохраняются проблемы стандартизации и интеграции данных. Социально-экономические последствия, такие как утрата инфраструктуры и переселение, слабо представлены в моделях.

Выводы. Обозначены важнейшие научные пробелы, включая влияние изменения климата, инвазивной растительности и комплексного антропогенного давления. Подчеркивается необходимость системного междисциплинарного подхода для повышения точности прогнозирования и формирования устойчивых стратегий управления речными берегами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: размыв берегов рек, транспорт наносов, растительность, гидравлическое моделирование, дистанционное зондирование, социально-экономические последствия, изменение климата

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Фам Н.Т. Размыв берегов рек: современное состояние исследований // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 964–975. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.964-975

Автор, ответственный за переписку: Фам Нгок Тхинь, thinhtls@tlu.edu.vn.

Riverbank erosion: a state-of-the-art review

Pham Ngoc Thinh
Thuyloi University; Hanoi, Vietnam

ABSTRACT

Introduction. Riverbank erosion is a complex, multidimensional process that influences fluvial landscapes, sediment fluxes, and stability of eco-systems. It has affects infrastructure and livelihoods, particularly in riparian and deltaic regions. This topic has attracted considerable scholarly attention due to its environmental and socio-economic implications under the pressures of global change.

Materials and methods. This review synthesizes more than 40 years of interdisciplinary research on riverbank erosion. A systematic literature search was conducted across major scientific databases, focusing on seven thematic areas including erosion mechanisms, measurement, modeling, vegetation, climate, and socio-economic impacts. Methodologies include high-resolution remote sensing, sediment fingerprinting, and process-based modeling tools such as BSTEM.

Results. The analysis reveals a dynamic interplay between hydraulic forces, soil properties, vegetation traits, climate variability, and human interventions. Key methodological advances have improved monitoring and prediction, yet standardization and integration across spatial and disciplinary scales remain limited. Socio-economic consequences, including displacement and infrastructure loss, are still underrepresented in modeling frameworks.

Conclusions. The review highlights critical knowledge gaps, particularly regarding the impact of climate change, invasive species, and cross-scale human activity. It advocates for a systems-based, interdisciplinary approach to improve erosion modeling and support resilient, equitable river management strategies.

KEYWORDS: riverbank erosion, sediment transport, vegetation dynamics, hydraulic modeling, remote sensing, socio-economic impacts, climate change

FOR CITATION: Pham N.Th. Riverbank erosion: a state-of-the-art review. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):964-975. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.964-975 (rus.).

Corresponding author: Pham Ngoc Thinh, thinhtls@tlu.edu.vn.

ВВЕДЕНИЕ

Размыв берегов рек играет ключевую роль в формировании русловых ландшафтов, управляет транспортом наносов, изменяет морфологию русла и оказывает влияние на качество воды и состояние водных экосистем. В последние десятилетия междисциплинарные исследования значительно продвинулись в понимании сложных взаимодействий между гидродинамическими процессами, геотехническими свойствами грунтов, растительностью и антропогенными воздействиями, определяющими механизмы размыва берегов [1–8].

Размыв берегов рек представляет собой многомерный (многофакторный) процесс, в котором пространственно-временная изменчивость русловых форм, гидравлических параметров потока и свойств берегового материала проявляются на различных масштабах — от локального размыва у подошвы откоса до перестройки русла на участке. Под «многомерностью» в настоящей работе понимается совокупность геометрической сложности русла и откосов; временной нестационарности гидрологического режима; механистического разнообразия механизмов разрушения (сдвиговое размывание, подмыв подошвы, обрушение, суффозия и др.) и материальной неоднородности береговых отложений.

Ранние фундаментальные обзоры подчеркивали двойственную природу данного процесса, связанную с флювиальным захватом частиц и массовыми обрушениями, а также необходимость разработки надежных многоуровневых методов измерений и прогнозных моделей, способных учитывать пространственно-временную изменчивость эрозии [9–13]. С развитием дистанционного зондирования численного моделирования и экспериментальных методов все более явно прослеживается динамическая взаимосвязь между физическими процессами (турбулентность, фильтрация, циклы «промерзания – оттаивания») и биологическими либо антропогенными факторами (видовой состав растительности, агротехнические практики, нарушения прибрежных зон) [1–3, 6, 14–18].

Человеческий фактор, в особенности вызванные эрозией перемещения населения, разрушение инфраструктуры и рост региональной уязвимости, становится более заметным в научных исследованиях и политической повестке [15, 17]. Актуальной задачей является согласование мер обеспечения устойчивости берегов с требованиями экологической устойчивости и климатической адаптивности, что требует комплексного интегрированного подхода. Несмотря на достигнутый прогресс, сохраняются существенные проблемы: количественная оценка эрозии в различных природных условиях, анализ долгосрочной эффективности стабилизационных мер и гармонизация модельных подходов на междисциплинарном и межрегиональном уровнях [19–25].

Настоящий обзор систематизирует новейшие и наиболее влиятельные исследования, формируя целостное представление о современном состоянии науки о размыве берегов рек. Особое внимание уделено механизмам и факторам, методам наблюдений и моделирования, влиянию человеческой деятельности и мерам управления. Подчеркивается роль методологических инноваций, междисциплинарных связей и новых научных направлений, необходимых для разработки устойчивых стратегий управления речными берегами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В обзоре применен систематический подход, направленный на всесторонний охват современных исследований по проблеме размыва берегов рек. Основными источниками данных выступали ведущие научные базы Semantic Scholar, Crossref, Scopus, PubMed. Поиск охватывал публикации, доступные до июля 2025 г., без географических ограничений. Для структурирования обзора было выделено семь тематических направлений, соответствующих основным научным трендам (табл. 1).

Критерии включения:

- статьи из рецензируемых журналов, систематические обзоры, материалы ведущих конференций;
- публикации на английском языке;
- исследования, прямо рассматривающие механизмы, моделирование, измерения или управление процессами размыва берегов.

Исключались:

- «серая» литература (отчеты ведомств, диссертации, блогговые публикации);
- работы, посвященные исключительно склоновым или овражным эрозионным процессам без связи с размывом берегов;
- статьи без достаточной методологической прозрачности или эмпирической основы.

По результатам начального поиска было найдено 1046 публикаций. Отбор выполнялся в несколько этапов в соответствии с рекомендациями протокола PRISMA:

- первичный скрининг названий и аннотаций — отобрана 421 работа;
- анализ полнотекстовых материалов — 332 статьи;
- финальный набор включил 41 наиболее значимую публикацию, отобранную по критериям тематической релевантности, научной значимости (цитируемости), методологической ясности и междисциплинарного охвата.

Для систематизации литературного поиска по теме размыва берегов рек разработан набор тематических групп, отражающих основные направления современных исследований. Каждая группа включает примерные ключевые слова и поисковые запросы, использованные при анализе научных публикаций. Рис. 1 демонстрирует данную классификацию и при-

Табл. 1. Тематическая классификация поисковых запросов

Тематическая группа / Thematic group	Поисковые запросы / Queries
Механизмы и факторы размыва / Mechanisms and drivers	Турбулентность и размыв берегов; геотехнические обрушения / Turbulence and bank erosion; geotechnical failures
Методы измерений / Measurement techniques	Точность эрозионных шпилек; дистанционное зондирование и миграция русла / Erosion pin accuracy; remote sensing and channel migration
Подходы к моделированию / Modeling approaches	BSTEM-моделирование; симуляция транспорта наносов / BSTEM modeling; sediment transport simulation
Методы управления и стабилизации / Management practices	Методы укрепления берегов; биоинженерные конструкции / Bank stabilization methods; bioengineering structures
Растительность и землепользование / Vegetation and land use	Прибрежная растительность и эрозия; изменения землепользования и наносы / Riparian vegetation and erosion; land-use change and sediment
Климатические воздействия / Climate change impacts	Промерзание — оттаивание и эрозия; климатическая нестабильность берегов / Freeze — thaw and erosion; climate-driven bank instability

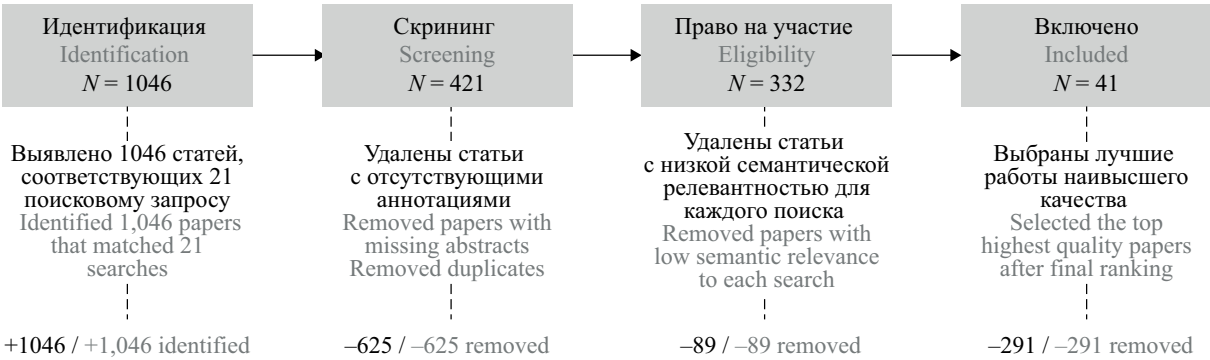


Рис. 1. Схема выбора публикаций на основе протокола PRISMA (составлена автором)

Fig. 1. PRISMA-based literature selection workflow (compiled by the author)

мененные запросы, что позволяет обеспечить прозрачность и воспроизводимость методологии поиска.

Для каждой из выбранных статей фиксировались:

- цели и задачи исследования (например, турбулентность, моделирование, влияние растительности);
- географический и экологический контекст (холодные регионы, дельтовые системы, сельскохозяйственные бассейны);
- используемые методы (экспериментальные русловые установки, дистанционное зондирование, численное моделирование);
- основные выводы и выявленные ограничения;
- практическая и управленческая значимость результатов.

Синтез информации выполнялся с использованием матричного подхода к тематическому кодированию, что позволило выявить новые закономерности, слабоизученные взаимосвязи и методологические тенденции в междисциплинарных исследованиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Физические факторы размыва берегов рек. Размыв берегов рек обусловлен сложным взаимодействием гидродинамических сил, механических свойств грунтов, климатических колебаний, динамики прибрежной растительности и антропогенных изменений пойменных экосистем. Эти факторы могут действовать как по отдельности, так и совместно, вызывая постепенные либо эпизодические обвалы, что усложняет прогнозирование и управление эрозионными процессами.

Гидродинамические силы. Целесообразно различать: 1) касательные (сдвиговые) напряжения на границе поток – грунт (τ); 2) силы сопротивления (drag) и подъемные силы (lift), действующие на частицы и элементы берегового материала; 3) пульсации давления и турбулентные выбросы (burst/sweep); 4) влияние вторичных течений и кривизны русла, приводящее к перераспределению скоростей и напряжений у берега; 5) эффекты подмыва у подошвы

откоса и локального вихреобразования. Такое разграничение позволяет корректно интерпретировать механизмы инициирования размыва и последующей деформации откоса.

Турбулентные потоки и локальные касательные напряжения являются одними из главных факторов отступления берегов. Когерентные структуры течения, включая вихри, циклы всплесков и вторичные течения, вызывают колебания касательных напряжений на поверхности откосов, способствуя срыву частиц, подмыву подошвы склона и последующему массовому обрушению [1, 2, 6]. Эти процессы особенно интенсивны в излучинах и около гидротехнических сооружений, где наблюдаются повышенные градиенты скорости [7]. Согласно результатам Das и Debnath (2025), турбулентные всплески значительно снижают критическое напряжение для начала размыва в связных грунтах, особенно в сложных и меандрирующих руслах [1]. Примером может быть размыв берега в зоне излучины на реке в условиях тропического климата. Турбулентные потоки и локальные касательные напряжения способствуют подмыву подошвы откоса и последующему обрушению, что хорошо видно на приведенной фотографии (рис. 2). Такой тип обрушений особенно распространен в излучинах рек тропических регионов, где интенсивные потоки подмывают подошву склона.

Геотехнические факторы. Свойства грунта когезия, прочность на сдвиг, плотность, слоистость существенно влияют на устойчивость берегов. Быстрая сработка уровня воды или насыщение пород могут приводить к вращательным сдвигам, опрокидыванию или плоскостному обрушению откоса, в зависимости

от внутренней структуры и динамики порового давления [10–12]. Подповерхностные гидрологические процессы (например, фильтрация, межпластовый сток) часто недооцениваются, но способны значительно ослаблять откосы изнутри. Так, Fox и Wilson (2010) выявили, что в лёссовых и глинистых берегах влажного климата именно подпочвенный сток становится главным триггером обрушений [12].

Климатические и криогенные процессы. В холодных и приполярных регионах циклы промерзания – оттаивания вызывают расширение поровой воды при замерзании и ослабление структуры грунта при оттаивании, что приводит к резким эпизодам обрушений [3, 26, 27]. Деградация многолетней мерзлоты и ледовые воздействия дополнительно увеличивают риск эрозии. Chassiot и соавт. (2020) подчеркнули необходимость явного учета тепловых процессов в моделях, применяемых для арктических и субарктических экосистем [3].

Роль растительности. Прибрежная растительность может как стабилизировать, так и дестабилизировать берега. Корневая система растений укрепляет грунт, увеличивает его когезию и снижает эрозионную восприимчивость, повышая долговременную устойчивость откосов [6, 7, 14]. Однако при определенных гидрологических и геоморфологических условиях растительность способна усугублять неустойчивость, например, из-за увеличения массы откоса, локального перенаправления потоков или распространения неглубококорневых инвазивных видов. Ahmed и Mohanadhas (2025) показали, что влияние растительности строго видоспецифично и не может рассматриваться как однозначно положительное [6].



Рис. 2. Размыв берега в излучине р. Меконг, Вьетнам (дельта Меконга) (фото Google)

Fig. 2. Bank erosion at a meander bend of the Mekong River in the Mekong Delta, Vietnam (Google image)

Антропогенные изменения. Преобразование земель, вырубка лесов, развитие сельского хозяйства и урбанизация, а также гидротехнические вмешательства усиливают процессы размыва. Удаление коренных растений и уплотнение почв повышают поверхностный сток и снижают корневое армирование, тогда как дамбы, шпоры и плотины изменяют режимы наносов и гидравлику русла [5, 16]. Например, Zaimes и соавт. (2019) выявили, что расширение сельскохозяйственных угодий на поймах Среднего Запада США ускоряет отступление берегов и образование оврагов [5]. Незаконная добыча песка вызывает углубление русла и подмыв подошвы откосов, дополнительно снижая их устойчивость [17, 18].

Методы наблюдения и моделирования. Точное понимание и прогнозирование размыва берегов требует комплексного применения полевых измерений, технологий дистанционного зондирования и численного моделирования. Несмотря на существенный прогресс, сохраняются проблемы масштабной сопоставимости данных, параметрической неопределенности и методологической фрагментации.

Полевые методы. Простейшие способы мониторинга — эрозионные шпильки, маркеры, повторные поперечные профили позволяют фиксировать отступление откосов во времени [9, 13]. Дополнительно применяются фотосъемка с временным интервалом, фотограмметрия и приборы для измерения прочности грунта (например, jet erosion device). Однако высокая трудоемкость, локальный характер и зависимость от сезонной влажности ограничивают их использование.

Дистанционное зондирование. Технологии LiDAR обеспечивают высокоточные цифровые модели ре-

льефа (DEM), позволяя выявлять малые изменения береговой линии [28, 29]. Беспилотные летательные аппараты (UAV) обеспечивают гибкий и высокочастотный мониторинг отдельных участков, а спутниковые системы (Landsat, Sentinel) дают возможность отслеживать миграцию русла и трансформацию землепользования на протяжении десятилетий [30]. Однако такие методы не дают информации о подповерхностных процессах и требуют наземной калибровки. Данные аэрофотосъемки и LiDAR позволяют отслеживать пространственно-временную динамику береговой линии. На примере участка через коммуна Лонг Хау видно значительное отступление берега за определенный период времени (рис. 3).

Моделирование. Эмпирические модели используют статистические зависимости между скоростью размыва и параметрами окружающей среды (расход, уклон, текстура грунта), но часто ограничены локальной применимостью [10]. Такие модели, как BSTEM и SRH-2D, позволяют учитывать сложные гидрогеотехнические взаимодействия в динамической среде [19, 31]. Двумерные модели типа SRH-2D решают уравнения мелкой воды с учетом транспорта наносов и поперечного отступления берегов.

Идентификация источников наносов. Методы идентификации источников наносов с использованием радионуклидов и геохимических индикаторов (^{137}Cs , ^{210}Pb) помогают оценить вклад размыва берегов в общий сток наносов в бассейне [32]. Ограничениями являются высокая стоимость лабораторных анализов и недостаточное временное разрешение для регистрации кратковременных событий.

Антропогенные воздействия и меры управления. Размыв берегов следует рассматривать не только



Рис. 3. Изменение линии берега в районе коммуны Лонг Хау (дельта Меконга) (составлено автором)

Fig. 3. Riverbank changes in the Long Hau commune area (Mekong Delta) (compiled by the author)



Рис. 4. Биоинженерное укрепление берега в районе Чау Тхань (дельта Меконга) (фото Google)

Fig. 4. Bioengineered bank stabilization near Chau Thanh in the Mekong Delta, Vietnam (Google image)

как гидроморфологический процесс, но и как социально опосредованное явление, определяемое решениями в области землепользования, инженерными вмешательствами и институциональной организацией управления.

Использование земель. Превращение пойменных лесов и болот в сельхозугодья или городскую застройку снижает корневое армирование и увеличивает поверхностный сток [5, 33]. Урбанизация увеличивает долю водонепроницаемых покрытий и ограничивает естественную миграцию русла.

Гидротехнические сооружения. Дамбы, шпоры, плотины и спрямление русла, предназначенные для защиты берегов или борьбы с паводками, нередко перераспределяют эрозионные процессы вниз по течению, нарушая естественные гидравлические и наносные режимы [24, 25].

Добыча песка. Эти процессы особенно ярко проявляются в дельтовых системах, включая Меконг и другие бассейны, где рост добычи песка вызывает серьезные геоморфологические и экологические последствия [17, 18, 34].

Социально-экономические последствия. Эти последствия подтверждаются в долгосрочных исследованиях бассейна Чесапик, где потеря земель и инфраструктуры прямо связана с динамикой осадков и береговой эрозией [15, 35]. В большинстве моделей и оценок риска эти последствия до сих пор недостаточно учтены.

Меры стабилизации. Инженерные конструкции (ряжи, габионы, бетонные стенки) обеспечивают быстрый эффект, но нарушают экосистемные связи и часто усиливают эрозию ниже по течению [24, 36]. Эффективность таких подходов подтверждена в ряде работ, сравнивающих традиционные и биотехнические методы стабилизации [23, 24, 37]. На примере (рис. 4) показано биоинженерное укрепление откоса с использованием геотекстиля и кустарников.

Для систематизации обзора и выделения наиболее значимых исследований составлена сводная таблица (табл. 2), содержащая основные направления, географический охват, ключевые результаты и выявленные научные пробелы в выбранных обзорных публикациях по теме размыва берегов рек.

Табл. 2. Обобщение выбранных обзорных статей и исследовательских пробелов

Table 2. Summarized selected review papers and research gaps

Статья / Paper	Основной фокус Focus	Регион / Region	Ключевые результаты Key results	Выявленные пробелы Identified research gaps
Понимание эрозии берегов рек через призму турбулентности: обзор / Understanding riverbank erosion through the lens of turbulence: A review	Турбулентность и методы измерений Turbulence and measurement techniques	Глобальный (лабораторные и полевые исследования) Global (laboratory and field studies)	Турбулентность — ключевой фактор (драйвер) размыва; необходима стандартизация методов / Turbulence is a key driver of erosion; Standardization of methods is needed	Недостаточная сопоставимость результатов различных исследований Limited comparability across studies

Статья / Paper	Основной фокус Focus	Регион / Region	Ключевые результаты Key results	Выявленные проблемы Identified research gaps
Обзор отступления берегов: механизмы, наблюдения и моделирование A review of bank retreat: mechanisms, observations, and modeling	Механизмы, наблюдения и моделирование Mechanisms, observations, and modeling	Реки и приливные каналы / Rivers and tidal channels	Важность гидравлических и геотехнических факторов; предложена иерархия новых моделей / Importance of hydraulic and geotechnical factors; hierarchy of new models proposed	Недостаток исследований обратных связей и многофакторных взаимодействий Lack of studies on feedbacks and multifactor interactions
Измерение эрозии берегов рек и бокового смещения русла: обзор The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review	Методы измерения Measurement methods	Глобальный Global	Хронологический обзор полевых и дистанционных методов / Chronological review of field and remote sensing methods	Проблемы точности, повторяемости и масштабируемости Problems of accuracy, repeatability, and scalability
Оценка процессно-ориентированной модели для стабилизации берегов: модель BSTEM Evaluating the BSTEM process-based model for Riverbank Stabilization	Анализ модели BSTEM BSTEM model analysis	Центральные США, глобальная значимость Central USA, global relevance	Модель требует дополнительного тестирования и уточнения параметров / The model needs further testing and parameter refinement	Недостаточная интеграция данных о растительности и субаэральных процессах Insufficient integration of vegetation and subaerial processes
Берега рек как источник наносов и фосфора Riverbanks as a source of sediment and phosphorus	Вклад размыва в транспорт наносов и фосфора Contribution of bank erosion to sediment and phosphorus transport	Водосборные бассейны США U. S. watersheds	Берега — главный источник фосфора и осадков; высокая неопределенность оценок / Riverbanks as a major source of phosphorus and sediment; high uncertainty in estimates	Необходимы расширенные методы мониторинга и анализа неопределенностей Need for advanced monitoring and uncertainty analysis

Обсуждение и выявленные научные проблемы

Систематизация результатов обзора показывает, что размыв берегов рек является многофакторным и многоуровневым процессом, формируемым взаимозависимыми физическими, биологическими и антропогенными воздействиями. Несмотря на значительный прогресс в выявлении отдельных факторов турбулентности, геотехнической неустойчивости, влияния растительности, главной научной задачей остается понимание их комплексного взаимодействия в реальных динамических системах.

Нелинейные связи и управленческие вызовы. Один из ключевых аспектов — нелинейная взаимосвязь между физическими драйверами и человеческой деятельностью. Например, изменение землепользования одновременно модифицирует гидрологические характеристики (усиление поверхностного стока), растительный покров (вырубка лесов или за-

мена культур), а также механические свойства почв (уплотнение), что в совокупности увеличивает подверженность берегов размыву [5, 8, 33]. Аналогично, гидротехнические сооружения (дамбы, шпоры) способны стабилизировать отдельные участки, но перенаправляют энергию потока вниз по течению, создавая новые очаги эрозии [16, 24, 25]. Это демонстрирует ограниченность локальных мер стабилизации и необходимость бассейнового подхода к управлению речными системами.

Проблемы наблюдения и моделирования. Технологические достижения в мониторинге (LiDAR, UAV, спутниковая съемка) и процессном моделировании (BSTEM, SRH-2D) существенно расширили возможности наблюдения и анализа эрозионных процессов. Однако сохраняются проблемы:

- отсутствие унифицированных стандартов полевых измерений и совместимых форматов данных;

- высокая чувствительность моделей к параметрам грунтов и гидрологических условий, которые трудно точно определить;
- недостаточное представление динамики растительности и взаимодействия гидравлических и геотехнических процессов в существующих моделях [9, 19, 31].

Методы идентификации источников наносов полезны для масштабных оценок, но страдают от высокой вариабельности трассеров и низкого временного разрешения [32]. Все это затрудняет сравнение результатов различных исследований и ограничивает развитие кумулятивных знаний.

Роль растительности и инвазивных видов. Хотя роль растительности в укреплении берегов широко признана, факторы видовой специфичности и конкурентные взаимодействия между местными и инвазивными видами до сих пор недостаточно изучены. Новые исследования показывают, что глубина укоренения и прочностные характеристики корневых систем более точно предсказывают устойчивость откосов, чем общая биомасса [14]. Однако динамические модели, учитывающие сезонные изменения и инвазию чужеродных растений, практически отсутствуют.

Кумулятивные антропогенные воздействия. Особенно это касается развитых дельт, где совокупное воздействие инженерных вмешательств поднимает вопрос устойчивости всей системы [8, 34, 38]. Интеграция данных о землепользовании, инфраструктуре и режиме наносов в кросс-масштабные модели необходима для понимания пространственного перераспределения эрозионных рисков и долгосрочных последствий инженерных вмешательств [8, 34, 39].

Воздействие климатических изменений. Климатическая нестабильность и изменения гидрологического режима (усиление экстремальных паводков, смещение сезонного стока, деградация мерзлоты) фундаментально трансформируют динамику размыва берегов. Однако большинство существующих

моделей основываются на стационарных предположениях, что приводит к систематическому недооцениванию эрозионных рисков в будущем [3, 6, 40]. Особенно недооценена роль циклов промерзания – оттаивания в высокоширотных и высокогорных реках, где термальные процессы усиливают механизмы разрушения [3, 26].

Социально-экономические последствия. Наиболее серьезным пробелом остается недооценка социальных аспектов эрозии. Вынужденное переселение, потеря земель и инфраструктуры часто рассматриваются как внешние последствия, а не как часть системы «берег – человек». Отсутствие моделей, учитывающих социальную уязвимость, может приводить к неэффективным или несправедливым управленческим решениям [15, 38]. Необходимо интегрировать показатели плотности населения, прав собственности и адаптивного потенциала в сопряженные модели природных и социальных систем.

Таким образом, для развития науки о размыве берегов требуются междисциплинарный, динамический и инклюзивный подходы, основанные на:

- создании долгосрочных систем мониторинга и открытых баз данных;
- стандартизации методов измерений и моделирования;
- разработке динамических моделей с учетом климата, растительности и человеческой деятельности;
- совместной выработке решений с участием заинтересованных сторон.

Для оценки надежности основных утверждений, встречающихся в литературе по размыву берегов рек, был проведен анализ степени доказательной базы. В табл. 3 представлены ключевые тезисы, сила их подтверждения и основные источники.

Под «силой доказательной базы» в табл. 3 понимается качественная оценка уровня подтвержденности выводов по каждому механизму размыва на ос-

Табл. 3. Основные научные утверждения, степень их доказанности и поддерживающая литература
Table 3. Key scientific claims, evidence strength, and supporting literature

Утверждение / Claim	Сила доказательной базы / Evidence strength	Обоснование / Reasoning	Поддерживающие публикации / Papers
Турбулентность и гидравлические силы являются главными драйверами размыва берегов рек / Turbulence and hydraulic forces are the main drivers of riverbank erosion	Сильная (9/10) Strong (9/10)	Многочисленные исследования подтверждают ключевую роль турбулентности и касательных напряжений / Numerous studies confirm the dominant role of turbulence and shear stress	[1], [2], [6], [7], [9], [25]
Размыв берегов — значительный источник наносов и фосфора Riverbank erosion is a significant source of sediment and phosphorus	Сильная (8/10) Strong (8/10)	Высокий вклад береговой эрозии подтвержден эмпирически Empirical studies indicate major contributions of the riverbank erosion	[4], [5], [32], [35]

Утверждение / Claim	Сила доказательной базы / Evidence strength	Обоснование / Reasoning	Поддерживающие публикации / Papers
Методы моделирования и измерений улучшились, но остается недостаток стандартизации / Modeling and measurement methods are improved but lack standardization	Средняя (7/10) Moderate (7/10)	Существуют разнообразные методики без единых протоколов Diverse methods without unified protocols	[1], [9], [13], [19], [28], [31]
Антропогенные факторы усиливают эрозию / Anthropogenic factors intensify erosion	Средняя (7/10) Moderate (7/10)	Изменения землепользования связаны с ростом эрозии / Land-use change linked to increased erosion	[5], [8], [17], [18], [33], [34]
Биоинженерные методы эффективны при комбинировании / Bioengineering methods are effective if combined	Средняя (6/10) Moderate (6/10)	Эффективность зависит от условий участка / Effectiveness depends on site conditions	[16], [23–25], [36], [37]
Роль инвазивных видов и климата недостаточно изучена / Role of invasive species and climate change understudied	Слабая (3/10) Weak (3/10)	Имеются значительные научные пробелы / Substantial knowledge gaps remain	[3], [6], [14], [41]

нове типа и количества источников: 0 — единичные наблюдения/гипотезы; 1 — ограниченные лабораторные/полевые данные без независимой валидации; 2 — воспроизводимые результаты и согласование нескольких исследований; 3 — конвергенция полевых данных, лабораторных экспериментов и численного моделирования. Такая шкала введена для сопоставимости разнородных публикаций и не является «силой» в физическом смысле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Размыв берегов рек представляет собой многогранную экологическую и инженерную задачу, формируемую динамичным взаимодействием гидравлических сил, геотехнических свойств грунтов, растительности, изменений землепользования и климатической изменчивости. За последние десятилетия научное понимание этих процессов существенно углубилось благодаря развитию полевых методов, технологий дистанционного зондирования, процессно-ориентированных моделей и междисциплинарных подходов.

Обзор показал, что ни один из факторов или методов сам по себе не способен адекватно отразить всю сложность процессов размыва. Для точной диагностики и эффективного управления необходим системный подход, интегрирующий физические, биологические и социально-экономические аспекты.

Основными физическими драйверами остаются:

- турбулентные потоки и гидравлические напряжения;

- геотехническая неустойчивость откосов;
- взаимодействие с прибрежной растительностью.

Антропогенные факторы (землепользование, добыча песка, строительство дамб и шпор) все больше усиливают риски эрозии и усложняют ее прогнозирование.

Несмотря на прогресс, сохраняются существенные научные пробелы:

- отсутствие единых стандартов мониторинга и методик моделирования;
- недостаточный учет климатически обусловленной нестационарности гидрологии;
- слабая интеграция данных о растительности и инвазивных видах в модели;
- нехватка исследований социально-экономических последствий эрозии.

Для интеграции существующих знаний предлагается концептуальная модель, связывающая физические, экологические и социальные драйверы с методологическими достижениями и научными пробелами (рис. 5).

Предлагаемая концептуальная модель обобщает причинно-следственные связи между гидравлическими воздействиями потока, характеристиками берегового материала и наблюдаемыми формами деформаций. Числовые значения на рис. 5 интерпретируются как нормированные индексы (0–1) относительной выраженности факторов/механизмов (например, доля вклада или балльная оценка), вычисляемые на основе: диапазонов параметров из литературы; со-

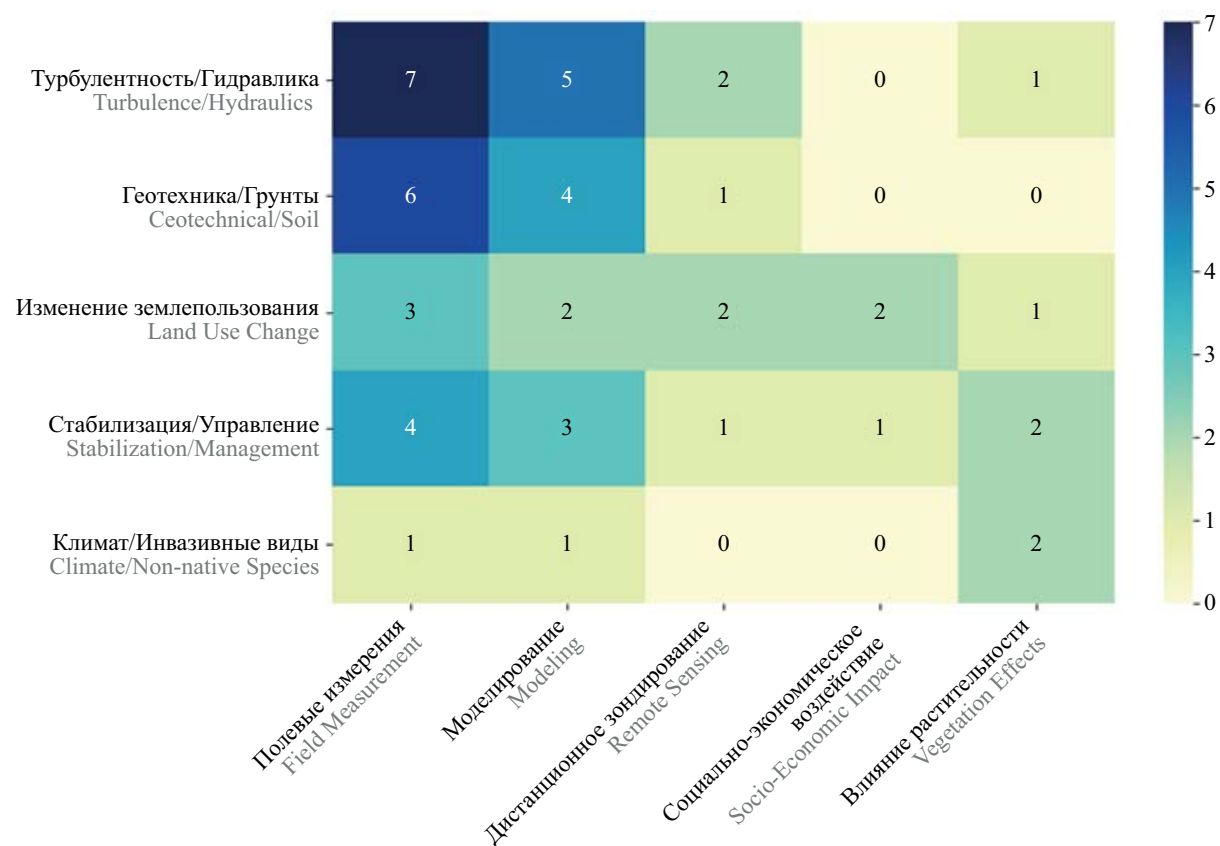


Рис. 5. Концептуальный синтез факторов размыва берегов рек и научные пробелы (составлено автором)
Fig. 5. Conceptual synthesis of riverbank erosion drivers and research gaps (compiled by the author)

Табл. 4. Ключевые исследовательские вопросы для будущих исследований
Table 4. Key research questions for future investigation

Вопрос исследования / Research question	Почему этот вопрос важен Why is this question important
Как взаимодействуют инвазивные виды растительности и климатические изменения, влияя на эрозию берегов How do invasive plant species interact with climate change to affect riverbank erosion?	Понимание этих процессов позволит уточнить механизмы размыва берегов и повысить эффективность адаптивного управления речными экосистемами в условиях изменения климата / Understanding these processes will help refine the mechanisms of riverbank erosion and improve the effectiveness of adaptive management of river ecosystems under climate change
Каковы долгосрочные социально-экономические последствия переселения из-за эрозии / What are the long-term socio-economic consequences of erosion-induced displacement?	Анализ этих последствий необходим для разработки научно обоснованных стратегий управления рисками и социальной адаптации населения в районах, подверженных эрозии берегов / An analysis of these consequences is essential for developing evidence-based strategies for risk management and social adaptation among populations living in areas prone to riverbank erosion.
Как стандартизировать методы измерения и моделирования эрозии / How can erosion measurement and modeling methods be standardized	Повысит сопоставимость исследований и точность моделей / This will enhance cross-study comparability and improve model accuracy

гласованности результатов разных типов исследований; условий применимости (тип русла, грансостав, гидрологический режим).

Практическое использование модели предполагает следующий порядок: 1) классификация участка (тип русла, кривизна, режим паводков); 2) сбор характеристик грунта (гранулометрия, связность, водонасыщение); 3) идентификация доминирующих гидродинамических воздействий (τ , вторичные течения, подмыв подошвы); 4) выбор вероятных механизмов

размыва и ожидаемых форм деформаций; 5) подбор методов мониторинга/расчета и мер защиты берега.

Открытые научные вопросы. Для определения направлений будущих исследований в области размыва берегов рек автор выделил ряд ключевых научных вопросов, требующих дальнейшего изучения.

Эти вопросы охватывают взаимодействие климатических изменений, динамику прибрежной растительности, социально-экономические последствия и необходимость стандартизации методов моделирования. В табл. 4 представлены ключевые исследовательские вопросы и обоснование их научной значимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Das V.K., Debnath K. Understanding riverbank erosion through the lens of turbulence : a review. *Journal of Hydrology*. 2025; 649:132484. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.132484. EDN KGOOXZ.
2. Zhao K., Coco G., Gong Zh., Darby S.E., Lanzoni S., Xu F. et al. A review on bank retreat: mechanisms, observations, and modeling. *Reviews of Geophysics*. 2022; 60(2). DOI: 10.1029/2021RG000761. EDN HVIACY.
3. Chassiot L., Lajeunesse P., Bernier J.-F. Riverbank erosion in cold environments : review and outlook. *Earth-Science Reviews*. 2020; 207:103231. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103231. EDN NSMKVU.
4. Fox G.A., Purvis R.A., Penn C.J. Streambanks: A net source of sediment and phosphorus to streams and rivers. *Journal of Environmental Management*. 2016; 181:602-614. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.06.071
5. Zaimes G.N., Tufekcioglu M., Schultz R.C. Riparian Land-Use Impacts on Stream Bank and Gully Erosion in Agricultural Watersheds: What We Have Learned. *Water*. 2019; 11(7):1343. DOI: 10.3390/W11071343
6. Ahmed M.N., Mohanadhas B. Review of the effect of river vegetation on sediment transport and river morphology and erosion prevention. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*. 2025; 31(2):398-408. DOI: 10.1080/09715010.2025.2471362. EDN YQPAQI.
7. Huai W.-X., Liu M.-Y., Yang Z.-H., Li S., Katul G.G. Flow dynamics and sediment transport in vegetated rivers : a review. *Journal of Hydrodynamics*. 2021; 33(3):400-420. DOI: 10.1007/s42241-021-0043-7. EDN GCLFTN.
8. Refat Faisal B.M., Hayakawa Y.S. Geomorphological processes and their connectivity in hillslope, fluvial, and coastal areas in Bangladesh : a review. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2022; 9(1). DOI: 10.1186/s40645-022-00500-8. EDN NAQWHM.
9. Lawler D.M. The measurement of river bank erosion and lateral channel change : a review. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1993; 18(9):777-821. DOI: 10.1002/ESP.3290180905
10. Aldefae A.H., Al-Khafaji R.A., Shamkhi M.S., Kumar H.Q. Erosion, sediments transport and riverbank stability : a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020; 901(1):012014. DOI: 10.1088/1757-899X/901/1/012014. EDN UVTNQY.
11. Rinaldi M., Darby S.E. 9 Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: Progress towards fully coupled simulations. *Developments in Earth Surface Processes*. 2007; 213-239. DOI: 10.1016/s0928-2025(07)11126-3
12. Fox G.A., Wilson G.V. The Role of Subsurface Flow in Hillslope and Stream Bank Erosion : a Review. *Soil Science Society of America Journal*. 2010; 74(3):717-733. DOI: 10.2136/SSSAJ2009.0319
13. Sutarto T.E. A Short Review on Various Techniques for Measuring Stream Bank Soil Erosion Strength. *2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST)*. 2018; 252-258. DOI: 10.1109/ICAST1.2018.8751560
14. Hardwick Ja., Hackney Ch., Keen L., Fitzsimmons C., Willby N., Pattison Z. The role of non-native plant species in modulating riverbank erosion : a systematic review. *River Research and Applications*. 2025. DOI: 10.1002/rra.4420. EDN JCYNJG.
15. Das T.K., Halder S.K., Gupta I.D., Sen S. River Bank Erosion Induced Human Displacement and Its Consequences. *Living Reviews in Landscape Research*. 2014; 8. DOI: 10.12942/LRLR-2014-3
16. Hasan Md.Z., Toda Yu. Enhancing riverbank protection along the Jamuna river, Bangladesh: review of previous countermeasures and morphological assessment through groyne-based solutions using numerical modeling. *Water*. 2024; 16(2):297. DOI: 10.3390/w16020297. EDN RFPOBJ.
17. Park E. Sand mining in the Mekong delta: extent and compounded impacts. *Science of the Total Environment*. 2024; 924:171620. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171620. EDN LHDEFB.
18. Rentier E.S., Cammeraat L.H. The environmental impacts of river sand mining. *Science of the Total Environment*. 2022; 838:155877. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155877. EDN UGXTSH.
19. Klavon K., Fox G., Guertault L., Enlow H., Miller R., Khanal A., Langendoen E. Evaluating a process-based model for use in streambank stabilization: insights on the bank stability and toe erosion model (BSTEM). *Earth Surface Processes and Landforms*. 2017; 42(1):191-213. DOI: 10.1002/esp.4073. EDN YXCKKP.
20. Bolinaga C.C., Mittelstet A., Mankin K. Streambank erosion phenomena and understanding: current research and future directions. *Journal of the ASABE*. 2023; 66(5):1223-1228. DOI: 10.13031/ja.15613. EDN QKRGZO.
21. Calixto N., Castaño A., Contreras-Ropero J. Bibliometric analysis of river erosion control measures:

examination of practices and barriers in Colombia. *Hydrology*. 2024; 11(9):139. DOI: 10.3390/hydrology11090139. EDN RYEUZY.

22. Piégay H., Darby S.E., Mosselman E., Surian N. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River Research and Applications*. 2005; 21(7):773-789. DOI: 10.1002/rra.881. EDN XSRMJS.

23. Bigham K.A. Streambank Stabilization Design, Research, and Monitoring: The Current State and Future Needs. *Transactions of the ASABE*. 2020; 63(2):351-387. DOI: 10.13031/trans.13647

24. Mandal A., Gautam H., Ahmad Z. Sediment control and flow redistribution with submerged vanes : a review. *Water Practice and Technology*. 2024; 19(5). DOI: 10.2166/wpt.2024.131. EDN SAKJGR.

25. Patel H.K., Arora S., Lade A.D., Kumar B., Azamathulla H.Md. Flow behaviour concerning bank stability in the presence of spur dike : a review. *Water Science and Technology: Water Supply*. 2023; 23(1):237-258. DOI: 10.2166/ws.2022.418. EDN SJNRZI.

26. Lawson D.E. *Erosion of perennially frozen streambanks*. 1983.

27. Chassiot L., Bernier J.F., Lajeunesse P. *Bank erosion processes within the fluvial corridor of the St. Lawrence River: causes, drivers and future challenges*. 2020. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-10061

28. Piégay H., Arnaud F., Belletti B., Bertrand M., Bizzi S., Carbonneau P. et al. Remotely sensed rivers in the anthropocene: state of the art and prospects. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020; 45(1):157-188. DOI: 10.1002/esp.4787. EDN MZMKXV.

29. Lai Y.G. Advances in Geofluvial Modeling: Methodologies and Applications. *Advances in Water Resources Engineering*. 2015; 407-470. DOI: 10.1007/978-3-319-11023-3_9

30. Karydas C.G., Panagos P., Gitas I.Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. *International Journal of Digital Earth*. 2012; 7(3):229-250. DOI: 10.1080/17538947.2012.671380

31. Andualet T.G., Hewa G.A., Myers B.R., Peters S., Boland J. Erosion and Sediment Transport Modeling : a Systematic Review. *Land*. 2023; 12(7):1396. DOI: 10.3390/land12071396. EDN ENNRGI.

32. Abbas G., Jomaa S., Rode M. *A review on share of river bank erosion to the total sediment load with increasing catchment size*. 2021. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-14536

33. Razali A., Syed ismail Sh.N., Awang S., Praveena S.M., Zainal abidin E. Land use change in highland area and its impact on river water quality : a review of case studies in Malaysia. *Ecological Processes*. 2018; 7(1):1-17. DOI: 10.1186/s13717-018-0126-8. EDN ZEOQAQ.

34. Islam Sk.R., Uddin R., Zannat M., Alam Ja. Ecological and geomorphic fallout of escalating river mining activities : a review. *Economic and Environmental Geology*. 2024; 57(3):293-303. DOI: 10.9719/eeg.2024.57.3.293. EDN AWKCRT.

35. Noe G.B., Cashman M.J., Skalak K., Gellis A., Hopkins K.G., Moyer D. et al. Sediment dynamics and implications for management: state of the science from long-term research in the Chesapeake bay watershed, USA. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2020; 7(4). DOI: 10.1002/wat2.1454. EDN OXTSFL.

36. Li M.H., Eddleman K.E. Biotechnical engineering as an alternative to traditional engineering methods. *Landscape and Urban Planning*. 2002; 60(4):225-242. DOI: 10.1016/S0169-2046(02)00057-9

37. Admiraal D. *Streambank stabilization using traditional and bioengineering methods : a literature review*. 2007.

38. Loucks D. Developed river deltas: Are they sustainable? *Environmental Research Letters*. 2019; 14(11):113004. DOI: 10.1088/1748-9326/ab4165

39. Chalov S., Moreido V., Urošev M., Golosov V., Zlatić M., Kasimov N. Advances in catchment and river erosion and pollutants' transport studies: From monitoring to modelling to management. *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*. 2025; 17(4):6-9. DOI: 10.24057/2071-9388-2024-0608

40. Owens P. Soil erosion and sediment dynamics in the Anthropocene: A review of human impacts during a period of rapid global environmental change. *Journal of Soils and Sediments*. 2020; 20(12):4115-4143. DOI: 10.1007/s11368-020-02815-9

41. Castello L., Macedo M. Large-scale degradation of Amazonian freshwater ecosystems. *Global Change Biology*. 2016; 22(3):990-1007. DOI: 10.1111/gcb.13173

Поступила в редакцию 7 августа 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 марта 2026 г.

Одобрена для публикации 6 марта 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Фам Нгок Тхинь** — кандидат технических наук, преподаватель; **Университет Туйлой**; г. Ханой, Вьетнам; SPIN-код: 5680-1089, Scopus: 57200407722, ORCID: 0000-0002-4928-6236; thinhtls@tlu.edu.vn.

Received August 7, 2025.

Adopted in revised form on March 5, 2026.

Approved for publication on March 6, 2026.

B I O N O T E S : **Pham Ngoc Thinh** — Candidate of Technical Sciences, lecturer; **Thuyloi University**; Hanoi, Vietnam; SPIN-code: 5680-1089, Scopus: 57200407722, ORCID: 0000-0002-4928-6236; thinhtls@tlu.edu.vn.