



Научная статья

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-48-56

УДК 519.714

Актуальное состояние исследований проблем разрушения берегов водных объектов криолитозоны

Е.К. Синиченко*, Ф.В. Рекач†, С.Л. Шамбина‡

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

История статьи:

Поступила: 14 января 2019

Доработана: 11 февраля 2019

Принята: 27 февраля 2019

Ключевые слова:

анализ работ;
береговые деформации;
криолитозона;
лабораторный эксперимент;
многолетнемерзлые породы

Огромная территория России находится в зоне многолетнемерзлых пород, ввиду чего очень остро стоит вопрос изучения береговых эрозий, происходящих не только во время строительного цикла, но и при последующей работе введенных в эксплуатацию объектов, в частности гидротехнических сооружений. Проведен анализ современных работ зарубежных и отечественных исследователей на предмет изученности разрушения мерзлых берегов водных объектов. Рассмотрено влияние энергии движущегося водного потока на переформирование берегового склона и устойчивость речных русел в целом. Результаты математического и лабораторного моделирования показали, что русловые деформации рек, протекающих в криолитозоне, значительно отличаются от деформаций русел, сложенных грунтами, не подверженных влиянию фазового перехода «вода — лед». Причинами размыва мерзлых берегов в условиях многолетнемерзлых пород является не только механическая, но и термическая составляющие при движении воды, что позволяет говорить о нестабильности мерзлоты как твердого вещества. Все это необходимо учитывать при гидротехническом проектировании.

Введение

Интенсивное гидротехническое строительство в криолитозоне, а также производственная необходимость, связанная с добычей нефти и газа в этих областях, привели к необходимости изучения поведения мерзлых пород, особенно слагающих склоны водных объектов, в изменяющихся сезонных условиях. Глобальные климатические изменения, происходящие в последние десятилетия, существенным образом влияют на гидрологические и

термодинамические процессы в гидросфере Земли и особенно в криолитозоне, так как вынужденные изменения сроков перехода температуры окружающей среды через 0 °С запускают фазовые переходы в системе «вода — лед» в моменты, являющиеся аномальными для конкретных северных территорий. Мерзлые породы, будучи не устойчивыми к смене температуры, способны легко оттаивать и наоборот — переходить из талого в мерзлое состояние, что сопровождается развитием целого ряда

* Доцент департамента строительства, Инженерная академия, к.т.н., доцент; sinichenko_ek@rudn.ru

† Доцент департамента строительства, Инженерная академия, к.т.н., доцент

‡ Доцент департамента строительства, Инженерная академия, к.т.н., доцент

© Синиченко Е.К., Рекач Ф.В., Шамбина С.Л., 2019



неблагоприятных и опасных геокриологических процессов, а также негативными изменениями экологической обстановки. Все это в сочетании с развернувшимся в криолитозоне обширным гидротехническим строительством (ГТС) приводит к нарушениям в гидрологическом балансе сети северных рек. Оттаивание многолетнемерзлых пород (ММП), помимо проблем с гидротехническим и инженерным строительством, оказывает огромное влияние на деструктивные процессы берегов водных объектов, особенно в районах с максимальной льдистостью. Из чрезвычайно стабильной системы мерзлота превращается в уязвимую и неустойчивую.

Появление новых кратеров, обвалов и больших котлованов (например, обнажение Ледяной горы в 120 км южнее Игарки, обнажение Иннокентьевское в устье Енисея, кратер Батагайка неподалеку от бассейна реки Яны, оползень на реке Буря в декабре 2018 года) — это наглядное свидетельство того влияния, которое климатические изменения оказывают на деформационные процессы в водных объектах, расположенных в районах вечной мерзлоты.

Убеждение в том, что мерзлота является цементирующим фактором в случае многолетнемерзлых пород, было весьма распространено до определенного времени. Ранние исследования, основанные на данном убеждении, приводили к спектру противоречивых результатов даже в пределах одного водного объекта. Сравнение абсолютных скоростей боковой эрозии не представляется возможным в случае натурных исследований, но вполне вероятно, что чистый эффект криолитозоны заключается в создании большей стабильности русла в период отрицательных температур, чем в нерегулируемых потоках аналогичного типа в немерзлых средах. Сочетания факторов, особенно тех, которые способствуют высоким темпам термоэрозионного размыва, могут тем не менее вызывать темпы эрозии, требующие осторожности в инженерном проектировании.

1. Влияние мерзлоты на устойчивость речных русел

Предметом внимания многих авторов стало исследование поведения мерзлых русел и воздействия на них движущегося потока, что было продиктовано производственной необходимостью — интенсивным гидротехническим строительством в зоне вечной мерзлоты. Воздействие гидротехнических сооружений на русла в криолитозоне — проблема,

для решения которой необходимо не только проведение изыскательских работ, но и привлечение современных возможностей математического моделирования. В каждом конкретном случае, в соответствии с особенностями мерзлотно-геологических, геоморфологических и гидрологических условий, проявляются те или иные реакции речной системы на гидротехнические сооружения. Главные из них — это русловые деформации на участке нижнего бьефа, изменения термического, ледового и паводкового режимов, а также изменения естественного хода уровня водной поверхности и твердого расхода в различных временных масштабах (суточном, сезонном, многолетнем). Систематические натурные исследования с получением кондиционного фактического материала по этой проблематике в криолитозоне практически не проводились. Трудности с прогнозированием деформаций русел, сложенных ММП, связаны с невозможностью проведения натурных наблюдений в период развития наводнений. Исследование этого сложного и многофакторного процесса может быть выполнено с достаточной степенью адекватности лишь с помощью математического моделирования.

Основные вопросы, которые стояли перед исследователями:

- 1) Как влияет мерзлота на скорости эрозии берегов?
- 2) Какую роль играют весенние наводнения в сравнении с движением потока большую часть года при прочих равных характеристиках русла?

При рассмотрении первого вопроса многие авторы согласились с заключением Леффингвелла [1] о том, что боковая эрозия обычно замедляется в случае мерзлых пород. Купер и Холлингсхед [2] отмечают, что вечная мерзлота стабилизирует породы, которые в немерзлом состоянии сопротивлялись бы размыву гораздо меньше.

Макдональд и Льюис [3] обнаружили, что мерзлота может замедлять эрозию в течение определенных промежутков времени. Было также высказано предположение о том, что, поскольку определенные регулярные течения некоторых объектов (на примере рек Аляски) могут возникать только при наличии мерзлоты, их масштаб значительно меньше по сравнению с масштабами наводнений [4] на тех же объектах.

С другой стороны, Уокер, Арнборг и Ричи [5; 6] подчеркнули роль вечной мерзлоты в продвижении заметной боковой эрозии (в среднем 10 м в одной области) путем бокового подрезания во время раз-

лива реки Колвилл на севере Аляски. Уокер [7] выражает общее убеждение, что боковая эрозия «особенно выражена» в арктической Аляске из-за вечной мерзлоты. Высокие темпы эрозии горной вечной мерзлоты ручьями объясняются «ледяной коркой», легко эродированной поверхностной зоной, которая была разрушена подземным льдом [8].

Какое мнение справедливо, являются ли водные потоки криолитозоны чрезвычайно стабильными или действительно они имеют более чем средние показатели боковой миграции? Очевидно, нужны более детальные исследования.

Исследования по второму вопросу — роли регулярно происходящих наводнений, являющихся причиной размыва склонов и берегов рек — столь же разнообразны. Уокер и Арнборг [5] обнаружили, что во время или вскоре после разлива на реке Колвилл наблюдается значительный размыв, то же наблюдал и Уэйтт [9] для любого из пяти типов формы русла в дельте Маккензи.

Майлз [10] определил, что разлив на острове Банкс в канадской Арктике играл несущественную роль, а значительные изменения в руслах не происходили до летних штормов на острове несколько недель спустя. Наконец, Абрамов [11] отметил тот факт, что размыв в нижнем течении реки Лены в Сибири достигает максимальных значений только к концу лета.

2. Размыв сезонноталого слоя берега водного объекта в условиях ММП

Изучением размыва берегов на территории криолитозоны в значительной мере занимались отечественные исследователи, например Дебольский и др. [12]. В лаборатории динамики русловых процессов и ледотермики ИВП РАН для описания природы деструктивных криогенных береговых процессов и влияния этих процессов на экологию окружающей среды была разработана модель разрушения берегов северных водоемов под действием таких факторов, как повышение температуры окружающей среды, солнечная радиация и связанное с ней снеготаяние.

Коллектив авторов под руководством В.К. Дебольского в рамках исследований разрушения мерзлых берегов на склонах различной направленности [13; 14] предложил методику прогноза процесса термоэрозии с учетом воздействия естественных сезонных условий на многолетнемерзлые породы. Была исследована скорость оттаивания почв под

воздействием солнечной радиации с учетом направления берегового уклона, что показано экспериментально. Описано различие влияния ультрафиолетовых (УФ) и инфракрасных (ИК) лучей на снеготаяние, так как первые имеют способность проникать вглубь непрозрачных веществ и преобразовываться в тепловые потоки внутри снежной толщи, а вторые интенсивно воздействуют только на поверхности вещества (снега, льда). При этом облачность является задерживающим фактором только для ИК участка спектра. В солнечные дни даже в тени присутствует ультрафиолетовая составляющая солнечной радиации. В работах авторов приведены результаты экспериментов по исследованию действия ультрафиолетовой и инфракрасной составляющих на снежный покров. Очевидно, что разные склоны одновременно могут испытывать различные воздействия: склон, обращенный к солнцу, будет подвергаться практически фронтальному инфракрасному влиянию и, таким образом, протаивать гораздо быстрее. Через некоторое время, пропорциональное мощности солнечного излучения, он будет свободен от снега и уже размывает (так как интенсивно тающие снежные пласты генерируют довольно мощные талые потоки, которые деформируют склон), в то время как на противоположном склоне, теневом, еще будет лежать снег. При этом ультрафиолетовые лучи, для которых облачность не является задерживающим фактором, присутствуют даже в пасмурные дни и будут воздействовать на оба склона.

Исследование воздействия солнечной радиации на весенний размыв берегового уклона также отражено в [15], а влияние осадков в виде дождя — в [16]. Роль солнечной радиации в процессе разрушения мерзлых берегов рек ранее не была изучена, хотя резкое увеличение ее интенсивности в весенний период плюс сезонное повышение температуры воздуха вместе играют колоссальную роль в процессах таяния снега. В это время образуются мощные талые потоки воды, которые вызывают не только наводнения, но и служат причиной интенсивного смыва оттаявшего материала со склонов рек. Зачастую данные потоки бывают мощнее, чем сезонные ливни, поэтому пренебрегать этим явлением было бы неправильно. Практически процесс весеннего оттаивания происходит в течение нескольких суток, и весь снег толщиной до нескольких метров, накопившийся за зимний период, резко превращается в потоки воды, провоцируя интенсивные береговые процессы. В работе было

приведено исследование снеготаяния в зависимости от интенсивности солнечного излучения и угла падения солнечных лучей. Различная интенсивность снеготаяния генерирует соответствующие склоновые потоки, которые вызывают размыв и служат вторичным источником протаивания. Так как склоны в период снеготаяния оказываются в неравных условиях, то и разрушения их проходят по-разному. Теневой склон из-за наличия снега оказывается более заморожен, сцементирован. Его протаивание в связи с этим задерживается на многие недели.

Лабораторным исследованием транспорта наносов при движении потока в мерзлых породах занимались Ионов и Грицук [17; 18]. Было рассмотрено влияние волн с различными характеристиками на темпы береговой эрозии. Экспериментальные исследования динамики протаивания как надводной, так и подводной частей берегового склона при различных внешних и внутренних условиях, проведенные в гидравлической лаборатории, отражены в [19; 20].

3. Исследования ледовых процессов

Для решения проблем, связанных с использованием водных ресурсов поверхностных водных объектов, особенно в зимних условиях, в силу особенностей географического расположения Российской Федерации необходимо наличие возможно более полной информации о ледовых процессах в реках и водоемах, ведь большая часть из них значительный период года (иногда до 9 месяцев, например, Обская губа) покрыта льдом. Начальная стадия формирования ледяного покрова и его разрушение в период ледохода часто вызывают катастрофические подъемы уровней воды. На территории России в целом ряде регионов (Архангельская и Вологодская области, Якутия, Иркутская область и др.) зимние наводнения, спровоцированные ледовыми заторами, происходят ежегодно, а наносимый ими ущерб весьма ощутим не только для местных, но и для федерального бюджетов. Исследования ледовых процессов постоянно развиваются на базе Института водных проблем РАН. Были обобщены данные по ледовым затруднениям на территории Российской Федерации, разработаны методики прогнозирования возможных катастрофических ситуаций в зимний период, связанных с распространением загрязняющих веществ в водотоке при активных ледовых явлениях [21]. Особое внимание уделялось

измерениям на натуральных объектах гидродинамических характеристик подледных потоков, что явилось основой для параметризации турбулентности этих потоков и создания математических моделей взаимодействия потока с ледяным покровом.

При решении гидравлических или одномерных задач, в которых для описания открытых и подледных потоков необходимо наличие дополнительного сопротивления, можно получить изменение интегральных характеристик, таких как расходы или средние по сечению скорости и глубины потоков. Именно этот класс задач позволяет делать прогнозы о динамике ледяного покрова (его деформациях и возможных разрушениях), поскольку временные и пространственные масштабы механических изменений льда соответствуют масштабам изменения интегральных характеристик потока [22].

Зимние наводнения в условиях криолитозоны описаны в статьях Дебольской [23] и Масликовой [24]. В целях изучения природы деструктивных криогенных береговых процессов и влияния этих процессов на экологию окружающей среды лабораторией динамики русловых процессов и ледотермики разработана модель разрушения берегов северных водоемов под действием таких факторов, как повышение температуры окружающей среды, солнечная радиация и связанное с ней снеготаяние. Основой математической модели послужили данные лабораторных экспериментов [16]. Существенной особенностью формирования поверхностного стока, ответственного за переформирование русла в условиях криолитозоны и в период сезонных изменений температур, является тот факт, что в почве присутствуют потоки воды, образованные при оттаивании мерзлой породы. В связи с этим гидравлическая проводимость почвы изменяется. В процессе работы были получены важные выводы о том, что русло реки в условиях криолитозоны можно моделировать как трехслойную систему — сезонноталый слой, ММП и талик. Для каждого слоя могут быть записаны соответствующие системы уравнений термо- и гидродинамики, адекватно отражающие состояние изменения грунта и внешних условий. Наиболее сильно размывается верхний, сезонноталый слой, что объясняется большей рыхлостью и подвижностью его грунта, который подвергается воздействию не только максимальных скоростей потока на поверхности, но и влиянию внутрисклоновых, фильтрационных и дождевых потоков. Слой ММП за счет его высокой цементности разрушается гораздо медленнее, для

него характерны другие временные интервалы (десятки и сотни лет). Слой талика часто не размывается из-за небольших придонных скоростей. Предложена система уравнений, описывающая движение породы по склонам в условиях криолитозоны с учетом интенсивности дождя и изменяющейся во времени льдистости грунта [16; 25]. При неразмывающих скоростях потока деформации склона обусловлены исключительно проседанием оттаявшего грунта и его выдвиганием к центру потока [15].

Развивая дальше эту тему, в [25] отмечено, что отклик многолетней мерзлоты на изменение климата существенно зависит от исходного термического состояния многолетнемерзлых пород и местного разнообразия ландшафтов. При потеплении климата начинается таяние верхнего льдистого горизонта многолетнемерзлых пород, в связи с чем активизируются деструктивные криогенные процессы: термокарст, термоэрозия, термоабразия, солифлюкция. Предложена математическая модель динамики берегового склона при различных внешних факторах, включающих изменения физических свойств мерзлого грунта, льда и снега от температуры во времени.

В работе Дебольской [26] представлена математическая модель деформаций русла рек в районах вечной мерзлоты. Деформации вызваны влиянием волн различного происхождения при увеличении температуры окружающей среды. Модельная система состоит из нестационарного гидродинамического модуля, теплового модуля и модуля деформации слоя. Гидродинамический модуль основан на двумерных уравнениях мелкой воды.

4. Особенности распространения примеси в деформируемых руслах рек криолитозоны

Речной сток является одним из основных источников поступления растворенных веществ в моря, поэтому проблема выноса реками органических соединений с каждым годом становится все более актуальной. В литературе в последнее время широко обсуждается отмечаемое увеличение количества органики в Северном Ледовитом океане, причиной которого может быть таяние вечной мерзлоты в Сибири и рост выноса органических веществ реками. Также на берегах рек традиционно располагаются населенные пункты и объекты промышленного назначения, являющиеся источниками загрязнения окружающей среды, но в случае криолитозоны от-

ходы и продукты деятельности годами накапливались и существовали в мерзлом состоянии. При потеплении климата и оттаивании мерзлоты возрастает опасность, помимо разрушения берегов, поступления токсичных веществ из мест захоронения промышленных, бытовых, химических и радиоактивных отходов в речные воды и их дальнейшего распространения в океане.

Построение математических моделей должно стать главным инструментом не только для прогноза русловых процессов в условиях криолитозоны, но и для углубленного исследования многочисленных взаимосвязей, которые необходимо учитывать при этом. В лаборатории ИВП РАН разработаны математические модели, объединяющие процессы переноса примеси, русловые деформации и различные виды таяния берегового склона [23] в условиях нестационарности водного потока. Модели могут быть использованы для прогнозирования распространения и накопления загрязнений в реках криолитозоны, берега которых подвергаются термоэрозии. Для валидации моделей проведены лабораторные эксперименты по распространению примеси в гидравлическом лотке с полностью замороженным склоном (гомогенная модель) и с ледяными включениями (гетерогенная модель). Получены зависимости начала таяния берегового склона от его начальной температуры при разных температурах водного потока, подтвержденные данными лабораторного эксперимента. В результате проведения лабораторных и численных экспериментов сделаны новые, практически важные выводы об особенностях распространения примесей в деформируемых и недеформируемых руслах. Показано влияние формы поперечного сечения деформируемого русла на распространение примеси. Выдвинуто предположение, что существует такая форма сечения, при которой его деформации приводят к более интенсивному переносу примеси, чем в недеформируемом потоке. Подробно исследовано влияние расположения источника загрязнения в потоке на распространение примеси. Проведена оценка вклада различных частей потока в перенос примеси. Исследование воздействия термической и механической эрозии, вызванной таянием ледяных пластов, включенных в береговой откос, на распространение примеси позволило сделать вывод о том, что в результате формирования таликов, заполняемых потоком, переносящим примесь, условия равномерности потока нарушаются, приводя к нестационарности распространения примеси. При

этом увеличение объема исследуемого участка за счет появления полостей в береговом откосе приводит к увеличению концентрации примеси.

Заключение

На данный момент тема разрушения берегов криолитозоны изучена не в полной мере и требует дальнейшего внимания. Разными исследователями был разработан комплекс математических моделей: одномерная и двухмерная модели взаимодействия волны попуска с ледяным покровом; модель образования затора торошения и подъема заторного уровня; модели деформаций дна аллювиального потока под действием волн попусков при регулировании стока и в условиях заторообразования. Созданы оригинальные методики: расчета взаимодействия длинноволновых возмущений с ледяным покровом; прогнозирования разрушения ледяного покрова, возникновения заторов; расчета подъемов заторных уровней и скорости затопления поймы; расчета переноса примеси в стационарных и приливных потоках. Проведены лабораторные эксперименты для изучения воздействия гидравлических нагрузок на русла, сложенные многолетнемерзлыми породами, в гидравлическом лотке с размываемым дном, с использованием частично замороженного грунта и пластин льда, внедренных в береговой откос. Разработана математическая модель деформаций русел, сложенных многолетнемерзлыми породами, под воздействием волн попуска и наводнений, вызванных ледовыми затруднениями. Полученные при проведении лабораторных экспериментов и на основании математического моделирования результаты и выводы об особенностях деформации русел, сложенных многолетнемерзлыми грунтами, являются актуальными. Анализ результатов математического и лабораторного моделирования показал, что русловые деформации рек, протекающих в криолитозоне, значительно отличаются от деформаций русел, сложенных грунтами, не подверженными влиянию фазового перехода «вода — лед», и могут наблюдаться даже при неразмывающих скоростях водного потока, причиной чего является нестабильность мерзлоты как твердого вещества.

Список литературы

- [1] *De Koven Leffingwell E.* The Canning River region, northern Alaska // U.S. Geol. Survey Prof. Paper. 1919. No. 109. 251 p.
- [2] *Cooper R.H., Hollingshead A.B.* River bank erosion in regions of permafrost // *Fluvial processes and sedimentation: Proc. Hydrology Symposium, Univ. of Alberta, Edmonton.* 1973. No. 9. Pp. 272–283.
- [3] *McDonald B.C., Lewis C.P.* Geomorphical and sedimentologic processes of rivers and coast, Yukon coastal plain: Environmental-Social Comm. Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Devel., Rept. 1973. No. 73–79. 245 p.
- [4] *Kane D.L., Slaughter C.W.* Seasonal regime and hydrological significance of stream icings in central Alaska // *The role of snow and ice in hydrology: Proc. Banff Symposia, Sept. 1972, Internat. Assoc. Sci. Hydrology Publ.* 1972. Vol. 1. Pp. 528–540.
- [5] *Walker H.J., Arnborg L.* Permafrost and ice-wedge effects on riverbank erosion // *Permafrost: Internat. Conf., Lafayette, Indiana, Proc., Natl. Research Council Publ.* 1966. No. 1287. Pp. 164–171.
- [6] *Ritchie W., Walker H.J.* Riverbank forms of the Colville River delta // *Reed J.C.Jr., Sater J.E. (eds.). The coast and shelf of the Beaufort Sea. Arctic Inst. North America.* 1974, Pp. 545–562.
- [7] *Walker H.J.* Morphology of the North Slope // *Britton M.E. (ed.). Alaskan arctic tundra. Tech. Paper 25. Arctic Inst. North America.* 1973. Pp. 49–92.
- [8] *Bvidel J.* Typen der Talbildung in verschiedenen klimamorphologischen Zonen // *Zeitschr. Geomorph., Suppl.* 1972. Bd. 14. Pp. 1–20.
- [9] *Outhet D.N.* Progress report on bank erosion studies in the Mackenzie River delta, N.W.T. // *Hydrologic aspects of northern pipeline development, 1974. Environmental-Social Comm. Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Devel., Rept.* 1974. No. 74–12. Pp. 297–345.
- [10] *Miles M.* An investigation of riverbank and coastal erosion, Banks Island, District of Franklin // *Geol. Survey Canada Paper 76-1A.* 1976. 76-1A. Pp. 195–200.
- [11] *Абрамов P.B.* Ниши вытаявания // *Природа.* 1957. Т. 46. № 7. С. 112–113.
- [12] *Дебольский В.К., Дебольская Е.И., Долгополова Е.Н., Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н.* Проблемы и современные исследования гидродинамики и ледотермики русловых потоков // *Избранные труды Института водных проблем РАН 1967–2017.* Т. 2. М.: КУРС, 2017. С. 101–124.
- [13] *Дебольский В.К., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Масликова О.Я.* Размытие мерзлых берегов северных рек в зависимости от направления берегового уклона // *Вестник МГСУ.* 2018. Т. 13. Вып. 9. С. 1112–1124. doi: 10.22227/1997-0935
- [14] *Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н.* Моделирование деформаций русел, сложенных мерзлыми породами, при повышении температуры окружающей среды // *Лед и снег.* 2013. № 1 (121). С. 104–110.
- [15] *Масликова О.Я.* Экспериментальное исследование интенсивности снеготаяния на лабораторной модели // *Природообустройство.* 2016. № 1. С. 28–33.
- [16] *Грицук И.И., Дебольская Е.И., Дебольский В.К., Масликова О.Я., Пономарев Н.К.* Влияние осадков в виде дождя на деформации берегового склона русел рек в условиях многолетнемерзлых пород // *Лед и снег.* 2012. № 3 (119). С. 73–78.
- [17] *Ионов Д.Н., Грицук И.И.* Исследование транспорта наносов как результата деформации берегового склона,

- включающего мерзлый грунт, на лабораторной модели // *Природообустройство*. 2016. № 4. С. 32–38.
- [18] Грицук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К., Масликова О.Я. Лабораторное исследование деформаций в нижнем бьефе на примере Рыбинского гидроузла // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2017. № 1. С. 70–78.
- [19] Дебольский В.К., Масликова О.Я., Ионов Д.Н., Грицук И.И., Джумагулова Н.Т. Лабораторное исследование влияния потока на протаивание подводного склона и темпы береговой эрозии в условиях криолитозоны // *Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования*. 2017. № 2. С. 182–192.
- [20] Котляков А.В., Грицук И.И., Масликова О.Я., Пономарев Н.К. Экспериментальное исследование влияния льдистости грунтов, слагающих русло рек, на динамику берегового склона // *Лед и снег*. 2011. № 2 (114). С. 92–98.
- [21] Дебольский В.К., Дебольская Е.И., Котляков А.В., Дербенев М.В., Замятина Э.В. Современная пространственно-временная изменчивость ледовых явлений в устьевых областях рек российской Западной Арктики // *Известия РАН. Серия географическая*. 2008. № 2. С. 36–42.
- [22] Дебольская Е.И. Динамика водных покровов под ледяным покровом. М.: Изд-во ИВП РАН; Изд-во МГУП, 2003. 279 с.
- [23] Debol'skaya E.I., Gritsuk I.I., Debol'skii V.K., Ionov D.N., Maslikova O.Ya. Effect of Bank Deformations on Pollutant Transport in Rivers in Cryolithozone: Laboratory and Mathematical Modeling // *Water Resources*. 2018. Vol. 45 (2). No. 4. Pp. 542–552. doi: 10.1134/S0097807818040073
- [24] Масликова О.Я. Зимние наводнения в условиях криолитозоны, вызванные ледовыми явлениями на реках // *Природообустройство*. 2013. № 2. С. 60–65.
- [25] Масликова О.Я., Козлов Д.В. Влияние зимних и весенних условий на размыв рек в криолитозоне // *Природообустройство*. 2014. № 1. С. 54–59.
- [26] Debol'skaya E.I. A model of river bank deformations under the simultaneous effect of waves from a hydropower plant and warming // *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water — Society Interactions: Proceedings of ICWRS-2014, Bologna, Italy, June 2014*. IAHS Publ., 2014.

Для цитирования:

Синиченко Е.К., Рекач Ф.В., Шамбина С.Л. Актуальное состояние исследований проблем разрушения берегов водных объектов криолитозоны // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 1. С. 48–56. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-48-56

Research paper

Current state of knowledge on the problem of water objects' frozen watersides destruction

Evgeniy K. Sinichenko*, Fedor V. Rekach†, Svetlana L. Shambina‡

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Article history:

Received: January 14, 2019

Revised: February 11, 2019

Accepted: February 27, 2019

Keywords:

analysis of works;
coastal deformation;
cryolithozone;
laboratory experiments;
permafrost

Due to the fact that the vast territory of Russia is located in the zone of permafrost, there is an urgent need to study coastal erosion, taking place not only during the construction cycle, but also during the subsequent operation of commissioned facilities, in particular hydrotechnical ones. The analysis of recent papers of foreign and domestic researchers who work in the field of knowledge of water objects' frozen coasts destruction was made. The influence of the energy of a moving water flow on the reformation of the coastal slope and on the stability of river channels as a whole was considered. Analysis of the results of mathematical and laboratory modeling showed that the channel deformations of the rivers flowing in the cryolithozone differ significantly from the deformations of the channels laid in soils which are not affected by the water-ice phase transition. The causes of the erosion of the frozen shores in the under permafrost conditions are not only mechanical, but also thermic components during the movement of water, which indicates the instability of the permafrost as a solid. All this should be considered when designing hydraulic engineering objects.

* Associate Professor of Department of Construction, Engineering Academy, Candidate of Technical Sciences; sinichenko_ek@rudn.ru

† Associate Professor of Department of Construction, Engineering Academy, Candidate of Technical Science

‡ Associate Professor of Department of Construction, Engineering Academy, Candidate of Technical Sciences

References

- [1] De Koven Leffingwell E. The Canning River region, northern Alaska. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*. 1919;(109).
- [2] Cooper RH, Hollingshead AB. River bank erosion in regions of permafrost. *Fluvial processes and sedimentation: Proc. Hydrology Symposium, Univ. of Alberta, Edmonton*. 1973;(9): 272–283.
- [3] McDonald BC, Lewis CP. *Geomorphical and sedimentologic processes of rivers and coast, Yukon coastal plain: Environmental-Social Comm. Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Devel., Rept.* 1973;(73–79).
- [4] Kane DL, Slaughter CW. Seasonal regime and hydrological significance of stream icings in central Alaska. *The role of snow and ice in hydrology: Proc. Banff Symposia, Sept.* 1972. 1972;(1): 528–540.
- [5] Walker HJ, Arnborg L. Permafrost and ice-wedge effects on riverbank erosion. *Permafrost: Internat. Conf., Lafayette, Indiana, Proc.* 1966;(1287): 164–171.
- [6] Ritchie W, Walker HJ. Riverbank forms of the Colville River delta. In: Reed JC Jr., Sater JE (eds.). *The coast and shelf of the Beaufort Sea: Arctic Inst. North America*. 1974: 545–562.
- [7] Walker HJ. Morphology of the North Slope. In: Britton ME (ed.). *Alaskan arctic tundra: Arctic Inst. North America Tech. Paper 25*. 1973: 49–92.
- [8] Bvidel J. Typen der Talbildung in verschiedenen klimamorphologischen Zonen. *Zeitschr. Geomorph., Suppl.* 1972;14: 1–20.
- [9] Outhet DN. Progress report on bank erosion studies in the Mackenzie River delta, N.W.T. *Hydrologic aspects of northern pipeline development, 1974: Environmental-Social Comm. Northern Pipelines, Task Force on Northern Oil Devel., Rept.* 1974;(74–12): 297–345.
- [10] Miles M. An investigation of riverbank and coastal erosion, Banks Island, District of Franklin. *Geol. Survey Canada Paper 76-1A*. 1976: 195–200.
- [11] Abramov RV. Nishi vytaivaniya [Thaw-out niches]. *Priroda*. 1957;46(7): 112–113.
- [12] Debolskiy V.K., Debolskaya Ye.I., Dolgopolova Ye.N., Maslikova O.Ya., Gritsuk I.I., Ionov D.N. Problemy i sovremennye issledovaniya gidrodinamiki i ledotermiki ruslovykh potokov [Problems and modern studies of hydrodynamics and ice-thermals of channel flows]. *Izbrannyye trudy Instituta vodnykh problem RAN 1967–2017*. Vol. 2. Moscow: KURS Publ.; 2017. p. 101–124.
- [13] Debolskiy VK, Gritsuk II, Ionov DN, Maslikova OYa. Razmytie merzlykh beregov severnykh rek v zavisimosti ot napravleniya beregovogo uklona [Blurring the frozen banks of the northern rivers depending on the direction of the coastal slope]. *Vestnik MGSU*. 2018;13(9): 1112–1124. doi: 10.22227/1997-0935
- [14] Debolskaya YeI, Debolskiy VK, Maslikova OYa, Gritsuk II, Ionov DN. Modelirovanie deformatsiy rusel, slozhennykh merzlymi porodami, pri povyshenii temperatury okruzhayushchey sredy [Modeling deformations of channels formed by frozen rocks with increasing ambient temperature]. *Led i sneg [Ice and Snow]*. 2013;1(121): 104–110. (In Russ.)
- [15] Maslikova OYa. Eksperimentalnoe issledovanie intensivnosti snegotayaniya na laboratornoy modeli [Experimental study of the intensity of snow melting in a laboratory model]. *Prirodoobustroystvo [Environmental engineering]*. 2016;(1): 28–33. (In Russ.)
- [16] Gritsuk II, Debolskaya YeI, Debolskiy VK, Maslikova OYa, Ponomarev NK. Vliyaniye osadkov v vide dozhdya na deformatsii beregovogo sklona rusel rek v usloviyakh mnogoletnemerzlykh porod [The effect of precipitation in the form of rain on the deformation of the coastal slope of the river beds in permafrost conditions]. *Led i sneg [Ice and Snow]*. 2012;3(119): 73–78. (In Russ.)
- [17] Ionov DN, Gritsuk II. Issledovanie transporta nanosov kak rezultata deformatsii beregovogo sklona, vklyuchayushchego merzlyy grunt, na laboratornoy modeli [Investigation of sediment transport as a result of deformation of the coastal slope, including frozen soil, on a laboratory model]. *Prirodoobustroystvo [Environmental engineering]*. 2016;(4): 32–38. (In Russ.)
- [18] Gritsuk II, Ionov DN, Debolskiy VK, Maslikova OYa. Laboratornoe issledovanie deformatsiy v nizhnem befe na primere Rybinskogo gidrouzla [Laboratory investigation of deformations in the downstream by the example of the Rybinsk hydroelectric complex]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstrukttsii i sooruzhenii [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]*. 2017;(1): 70–78. (In Russ.)
- [19] Debolskiy VK, Maslikova OYa, Ionov DN, Gritsuk II, Dzhumagulova NT. Laboratornoe issledovanie vliyaniya potoka na protaivaniye podvodnogo sklona i tempy beregovoy erozii v usloviyakh kriolitozony [Laboratory study of the effect of flow on the thawing of the submerged slope and the rate of coastal erosion under cryolithozone conditions]. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017;(2): 182–192. (In Russ.)
- [20] Kotlyakov AV, Gritsuk II, Maslikova OYa, Ponomarev NK. Eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya ldistosti gruntov, slagayushchikh ruslo rek, na dinamiku beregovogo sklona [Experimental study of the effect of ice content in the soils that form the river bed on the dynamics of the coastal slope]. *Led i sneg [Ice and Snow]*. 2011;2(114): 92–98. (In Russ.)
- [21] Debolskiy VK, Debolskaya YeI, Kotlyakov AV, Derbenev MV, Zamyatina EV. Sovremennaya prostranstvenno-vremennaya izmenchivost ledovykh yavleniy v ustevykh oblastiakh rek rossiyskoy Zapadnoy Arktiki [Modern spatial-temporal variability of ice phenomena in the estuarine regions of the rivers of the Russian Western Arctic News of the Russian Academy of Sciences]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2008;(2): 36–42. (In Russ.)
- [22] Debolskaya YeI. Dinamika vodnykh pokrovov pod ledyanym pokrovom [Dynamics of water under the ice cover]. Moscow: IVP RAN Publ.; MGUP Publ., 2003. (In Russ.)
- [23] Debol'skaya EI, Gritsuk II, Debol'skii VK, Ionov DN, Maslikova OYa. Effect of Bank Deformations on Pollutant Transport in Rivers in Cryolithozone: Laboratory and Mathematical Modeling. *Water Resources*. 2018;45–2(4): 542–552. doi: 10.1134/S0097807818040073
- [24] Maslikova OYa. Zimnie navodneniya v usloviyakh kriolitozony, vyzvannyye ledovymi yavleniyami na rekakh [Winter floods in the conditions of cryolithozone caused by ice phenomena on the rivers]. *Prirodoobustroystvo*. 2013;(2): 60–65. (In Russ.)

- [25] Maslikova OYa, Kozlov DV. Vliyanie zimnikh i vesennikh usloviy na razmyv rek v kriolitozone [Impact of winter and spring conditions on river erosion in the cryolithozone]. *Prirodoobustroystvo*. 2014;(1): 54–59. (In Russ.)
- [26] Debol'skaya EI. A model of river bank deformations under the simultaneous effect of waves from a hydropower plant and warming. *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water — Society*

Interactions: Proceedings of ICWRS-2014, Bologna, Italy, June 2014. IAHS Publ.; 2014.

For citation:

Sinichenko EK, Rekach FV, Shambina SL. Current state of knowledge on the problem of water objects' frozen watersides destruction. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 48–56. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-48-56 (In Russ.)