

УДК 556.537

МОДЕЛИРОВАНИЕ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА РЕКАХ КРИОЛИТОЗОНЫ С ЛОКАЛЬНЫМИ ИСКРИВЛЕНИЯМИ РУСЛА¹

© 2023 г. Е. И. Дебольская^{a, *}, В. К. Дебольский^a, И. И. Грицук^{a, b, c}

^aИнститут водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, 117198 Россия

^cМосковский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, 125319 Россия

*e-mail: e_debolskaya@yahoo.com

Поступила в редакцию 21.04.2022 г.

После доработки 06.10.2022 г.

Принята к публикации 10.10.2022 г.

Представлены результаты лабораторного и математического моделирования распространения загрязняющих примесей из оттаявших источников, расположенных в береговых склонах на криволинейных участках рек криолитозоны. Особое внимание уделено изучению влияния русловых деформаций, обусловленных термоэрозией, на скорость и характер распространения пятна примеси. Основной целью лабораторных экспериментов, проведенных в гидравлическом лотке, было определение различия в динамике деформаций и распространения примеси из оттаивающих источников при разных формах искривления русла для дальнейшего использования этих данных в качестве входных параметров в математической модели и ее верификации. На основе анализа серии численных расчетов в масштабах лабораторного эксперимента и реального природного объекта получены выводы о влиянии морфометрических характеристик русла, гидрологических и термических параметров водного потока, характеристик мерзлого руслоформирующего грунта на динамику распространения примеси на криволинейных участках рек криолитозоны.

Ключевые слова: русловые деформации, термоэрозия, криволинейное русло, криолитозона.

DOI: 10.31857/S0321059623020037, **EDN:** IOHXRE

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования последних десятилетий показали, что Арктика нагревается в разы быстрее, чем планета в целом [8, 17]. Это приводит к резкому таянию морского льда, ледников и снежного покрова, а также к деградации вечной мерзлоты [21, 22, 26]. С 1971 по 2019 г. среднегодовая температура в Арктике выросла на 3.1°C по сравнению с 1°C в целом на планете [16]. Изменения свойств мерзлоты могут повлиять на гидрологическую систему через поверхностную инфильтрацию, дренаж почвы и подземный сток, приводя к изменениям динамики подземных вод и поверхностного стока [25]. Деградация мерзлоты вызывает усиление взаимодействия между поверхностными и грунтовыми водами [14]. Ландшафты вечной мерзлоты чувствительны к

глобальному повышению температуры и могут подвергнуться широкомасштабной деградации [7, 12]. Побережья и берега рек в Арктике подвержены термоэрозионным процессам, вызванным морской или речной водой, в сочетании с механической эрозией от волн, течений и подвижного льда [6, 13]. Сильный размыв берегов рек и прибрежных участков приводит к большим поступлениям наносов и органических веществ в арктические реки и Северный Ледовитый океан [9, 18, 20].

Загрязнение окружающей среды стойкими органическими соединениями и другими веществами, которые годами накапливались на территориях арктического региона, становится все более острой проблемой. При деградации мерзлоты возрастает опасность поступления токсичных веществ из мест захоронения химических и радиоактивных отходов. Элементы сооружений для захоронения мусора и загрязняющих веществ зачастую были рассчитаны на непроницаемую структуру слоев вечной мерзлоты, и таяние в этих

¹ Часть работы, связанная с математическим моделированием, выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (тема FMWZ-2022-0001). Часть работы, связанная с проведением лабораторных экспериментов, выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-08-00807 А).

районах может привести к существенному загрязнению водных ресурсов. Задача расчета распространения загрязнений в руслах рек криолитозоны усложняется необходимостью учета деформаций берегов, сложенных тающими породами. Лабораторные эксперименты и натурные наблюдения показали, что термоэрозия играет существенную, а подчас и более значительную роль, чем механическая эрозия в процессе деформирования русел, сложенных многолетнемерзлыми породами [10, 19]. Деграция богатых льдом отложений вечной мерзлоты может привести к высвобождению ранее замороженного углерода и азота и иметь как локальные воздействия на речные и прибрежные экосистемы, так и глобальные в виде выброса парниковых газов в атмосферу. В работе [11] для утеса на о. Собо-Сисе в дельте Лены, одного из самых быстро разрушающихся объектов вечной мерзлоты в Арктике, проведено исследование флювиальной термоэрозии с использованием анализа временных рядов на основе дистанционного зондирования, охватывающего 53 года. Изучение динамики процесса термоэрозии позволяет проследить его ускорение, связанное с климатическими изменениями последних десятилетий, а полученные авторами оценки скорости эрозии до 22 м в год и средних потерь углерода 5.2×10^6 кг и азота 0.4×10^6 кг в год (2015–2018 гг.) дают представление как о существенных деформационных процессах, так и о значительных величинах биогеохимических потоков, ими обусловленных.

Дополнительным источником загрязняющих веществ становятся грунтовые воды. Прогнозы показывают, что вклад расхода грунтовых вод в водоток из-за таяния мерзлоты продолжит увеличиваться с развитием глобального потепления. Это означает, что речные бассейны со значительным содержанием мерзлоты более чувствительны к потеплению климата [15]. В настоящее время повышение температуры на 1°C приводит к увеличению расхода подземных вод на 6.1–10.5% в зависимости от состояния вечной мерзлоты [24].

Гидравлические исследования традиционно проводились с использованием физических моделей, которые воспроизводят явления потока в уменьшенном масштабе с динамическим подобием. Сегодня численные модели все чаще используются вместо физических. Эти модели основаны на математическом описании сложных турбулентных процессов и граничных условий, но могут быть дешевыми и универсальными. У физических и численных моделей есть свои сильные и слабые стороны [23], и их достоинства следует сравнивать с преимуществами теоретического анализа и измерений, проводимых в полевых условиях. Один инструмент не может адекватно воспроизвести сложные процессы и заменить все остальные.

Проведение натурных исследований в бассейнах рек криолитозоны представляет собой большую, трудноразрешимую и крайне дорогостоящую проблему в виду технических, организационных и объективных сложностей, обусловленных суровыми климатическими условиями. Цель работы – изучение процесса переноса примесей на криволинейных участках речных русел, находящихся под воздействием механической и термической эрозии, на основе лабораторного и математического моделирования.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Цель лабораторных экспериментов, проведенных в гидравлическом лотке, заключалась в оценке характера русловых деформаций, вызванных термоэрозией, и скорости распространения примеси при разных формах искривления русла и дальнейшего использования полученных данных для верификации математической модели. При постановке задачи подразумевалось, что процесс термоэрозии, обусловленный таянием, протекает в основном при положительной температуре окружающей среды, например при прохождении волны весеннего половодья. Источниками примеси служили пластинки, полученные заморозкой при температуре -18°C разбавленного красителя. Размеры пластинок $0.24 \times 0.14 \times 0.025$ м. Проведено две серии экспериментов (по три эксперимента в каждой серии) с заложением пластинки из замороженной примеси в центральную часть прямолинейного (условный фактор формы $kg = 0$), выпуклого ($kg = 1$) и вогнутого ($kg = -1$) берегового склона. В каждой серии на прямолинейном участке ширина поперечного сечения по дну и по урезу была $B_d = 0.16$ м и $B_y = 0.39$ м соответственно, так что угол берегового склона был постоянным. В случае расширяющегося русла ($kg = 1$) ширина по урезу $B_y = 0.52$ м, при сужающемся русле ($kg = -1$) $B_y = 0.25$ м. Длина искривленного участка при $kg \neq 0$ в обоих случаях равна 0.65 м. Глубина потока во всех экспериментах была 0.11 м. Расход воды подбирался таким образом, чтобы средняя скорость потоков во всех экспериментах была примерно одинаковой и равной 0.14 м/с. Все вышеперечисленные характеристики водного потока, русла и ледяных включений использовались как входные параметры в математической модели. Схема эксперимента представлена на рис. 1. На рис. 2 приведены фото начального состояния русел с разными типами искривлений, береговых деформаций и пятен примеси в потоках через 25 мин после начала двух серий экспериментов.

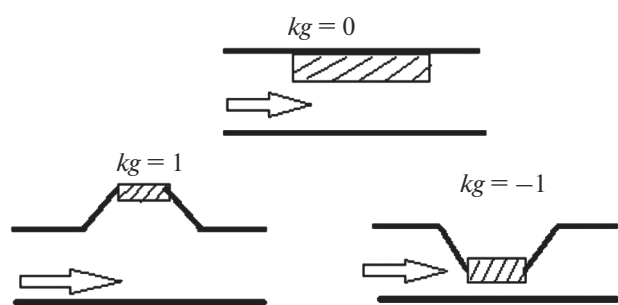


Рис. 1. Схема экспериментов в плане.

Различия динамики таяния, деформаций и распространения примеси при разных формах русла по данным лабораторных наблюдений

Прямое русло ($kg = 0$)

В прямом русле в первой серии через несколько минут после начала эксперимента под ледяной пластиной начала образовываться ниша вытаивания. Через 25 мин льдина опустилась на дно ниши. Деформации и распространение примеси происходят неравномерно по длине пластины. Наи-

большие деформации наблюдаются у нижнего по течению края пластины, но примесь наиболее интенсивно распространяется из-под верхнего края пластины. После окончания процесса таяния характер деформаций изменился с эрозионного на аккумулятивный: образовавшиеся пустоты в береговом склоне затянулись песком. Этот эффект воспроизводился и в численных экспериментах.

Во второй серии экспериментов процессы образования ниши вытаивания, дальнейшего опускания льдины и характер распространения примеси были аналогичными, деформации имели более равномерный характер.

Русло с расширением ($kg = +1$)

Как в первой, так и во второй сериях экспериментов ниша начала образовываться, но ее быстро занесло песком, переносимым обратным течением. В первой серии, в отличие от случая с прямым руслом, более интенсивно идет процесс обрушения. Во второй серии образующаяся в процессе таяния полость быстрее заносится песком, обрушения практически не происходит, деформации более симметричны относительно се-

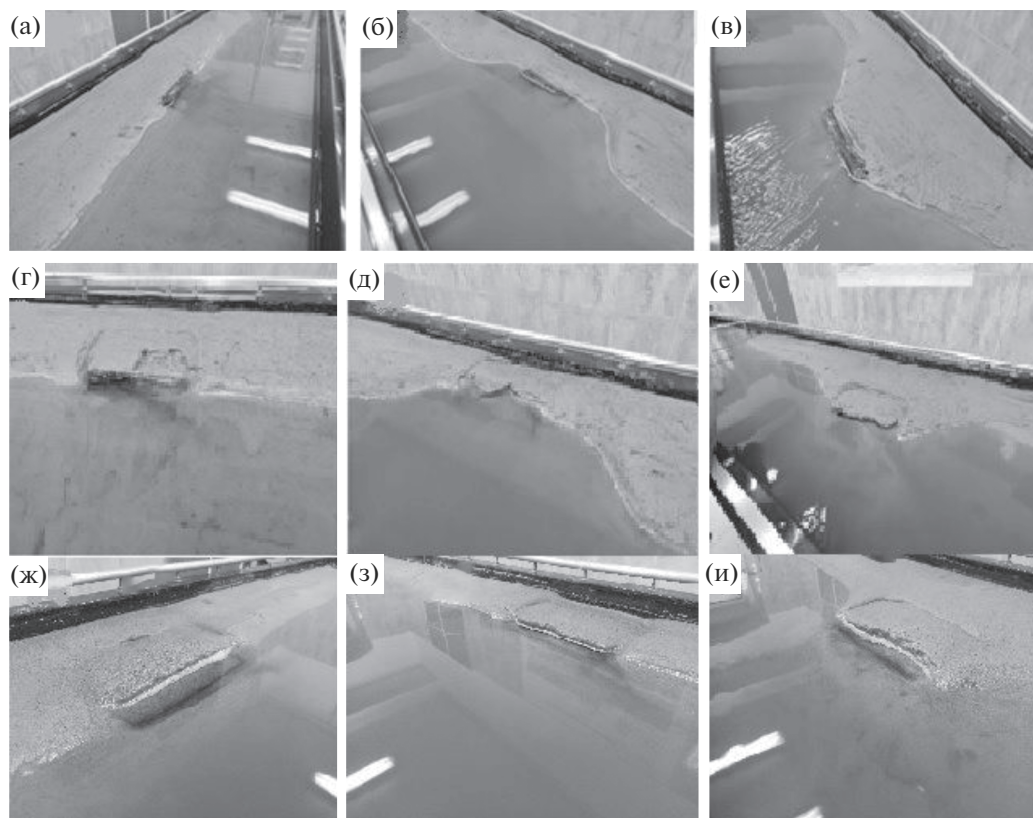


Рис. 2. Фото начальных состояний потоков (а, б, в), береговых деформаций и пятен примеси через 25 мин после начала первой (г, д, е) и второй (ж, з, и) серий экспериментов — в прямом (а, г, ж), расширяющемся (б, д, з) и сужающемся (в, е, и) руслах.

редины льдины и максимальны в ее центральной части. В обоих экспериментах льдина довольно долго сохраняется из-за того, что находится в занесенном состоянии и имеет минимальный контакт с водным потоком. Благодаря этому время нахождения примеси в потоке увеличивается; по визуальным оценкам, ее концентрация в каждый момент времени гораздо меньше, чем в прямом русле. Этот эффект получился и в численных экспериментах.

Русло с сужением ($kg = -1$)

В случае с сужающимся руслом как в первой, так и во второй сериях деформации развиваются наиболее равномерно и распространение примеси происходит быстрее и интенсивнее. Обрушение происходит интенсивно и равномерно по длине пластины. Таяние также идет равномерно, форма пластины сохраняется практически в течение всего эксперимента. Происходит значительная аккумуляция наносов в русле на участке, прилегающем к нижнему по течению краю пластины. Эти эффекты воспроизводятся и в численной модели.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Численные расчеты проводились на модели водного потока в русле с трапецеидальным поперечным сечением. Угол заложения берегового склона — α . Описание математической модели, состоящей из теплового, гидродинамического, деформационного блоков и блока переноса примеси, дано в работах [2, 3]. В гидродинамическом блоке модели использовались двухмерные уравнения движения жидкости и уравнение неразрывности. В деформационном модуле рассчитываются изменения отметок дна из уравнения русловых деформаций. В тепловом модуле для расчета температуры грунта используется одномерное уравнение теплопроводности. В новой версии предусмотрена возможность изменения льдистости в мерзлых включениях, кроме изменения положения поверхности, контактирующей с водой, учтено изменение положения поверхностей, граничащих с теплым грунтом. При расчете положения границы вода — лед / мерзлый грунт в условие Стефана добавлен конвективный член, ответственный за перенос оттаявших частиц потоком воды, как это сделано в модели [4]. Блок переноса примеси основан на решении двухмерного нестационарного уравнения переноса примеси. Источник примеси задается в мерзлом включении и начинает действовать, когда температура грунта достигает нулевого значения. Уравнение переноса примеси дополнено двумя слагаемыми, отвечающими за фильтрацию, обуслов-

ленную градиентами давления по направлению основного русла и берегового склона [5].

Проведены эксперименты с разными формами русла, размером и расположением ледяного включения. Форма русла менялась в соответствии с синусоидальной зависимостью ширины русла от длины. Каждому виду соответствовал фактор формы kg : $kg = 0$ — прямое русло, $kg = 1$ — половина синусоиды при ее возрастании (вогнутый берег), $kg = -1$ — половина синусоиды при ее убывании (выпуклый берег), $kg = 2$ — целая синусоида. Для математического моделирования распространения примеси на криволинейном участке использованы масштабы и параметры вышеописанных лабораторных экспериментов.

Сравнение результатов численных расчетов по модели с данными лабораторного эксперимента

Для оценки деформаций проведены визуальные наблюдения и измерения образовавшегося рельефа непосредственно в процессе проведения эксперимента.

На рис. 3 представлены фото и поверхности русел с разными видами искривлений, рассчитанные по модели с входными данными, соответствующими лабораторным экспериментам. Из рис. 3 видно, что поверхности дна, рассчитанные по модели, находятся в удовлетворительном соответствии с поверхностями, реализованными в лабораторных экспериментах. Кроме того, следует отметить, что динамические картины деформаций в лабораторном и численном экспериментах во всех трех случаях также хорошо соответствовали. Это можно было наблюдать по сделанным во время экспериментов видеосъемкам.

Для получения более точных количественных характеристик рассчитаны объемы и массы перемещенного песка на площадях, занимаемых мерзлым включением, по данным фото и отдельных кадров видеосъемок. Эти участки выбраны для оценки исходя из того факта, что в процессе экспериментов они не были покрыты водой и их можно было свободно наблюдать и фиксировать изменения их рельефа с помощью фото- и видеосъемки. При математическом моделировании также были рассчитаны массы перенесенного берегообразующего грунта именно с этих выделенных участков. Для сравнения данных, полученных при лабораторном и численном моделировании, построены кривые изменения во времени массы перенесенного материала в руслах с разной формой (рис. 4).

Для сравнения результатов математического моделирования распространения примеси с лабораторным экспериментом использовался параметр времени нахождения примеси в потоке. Он оценивался по времени обнуления осредненной по

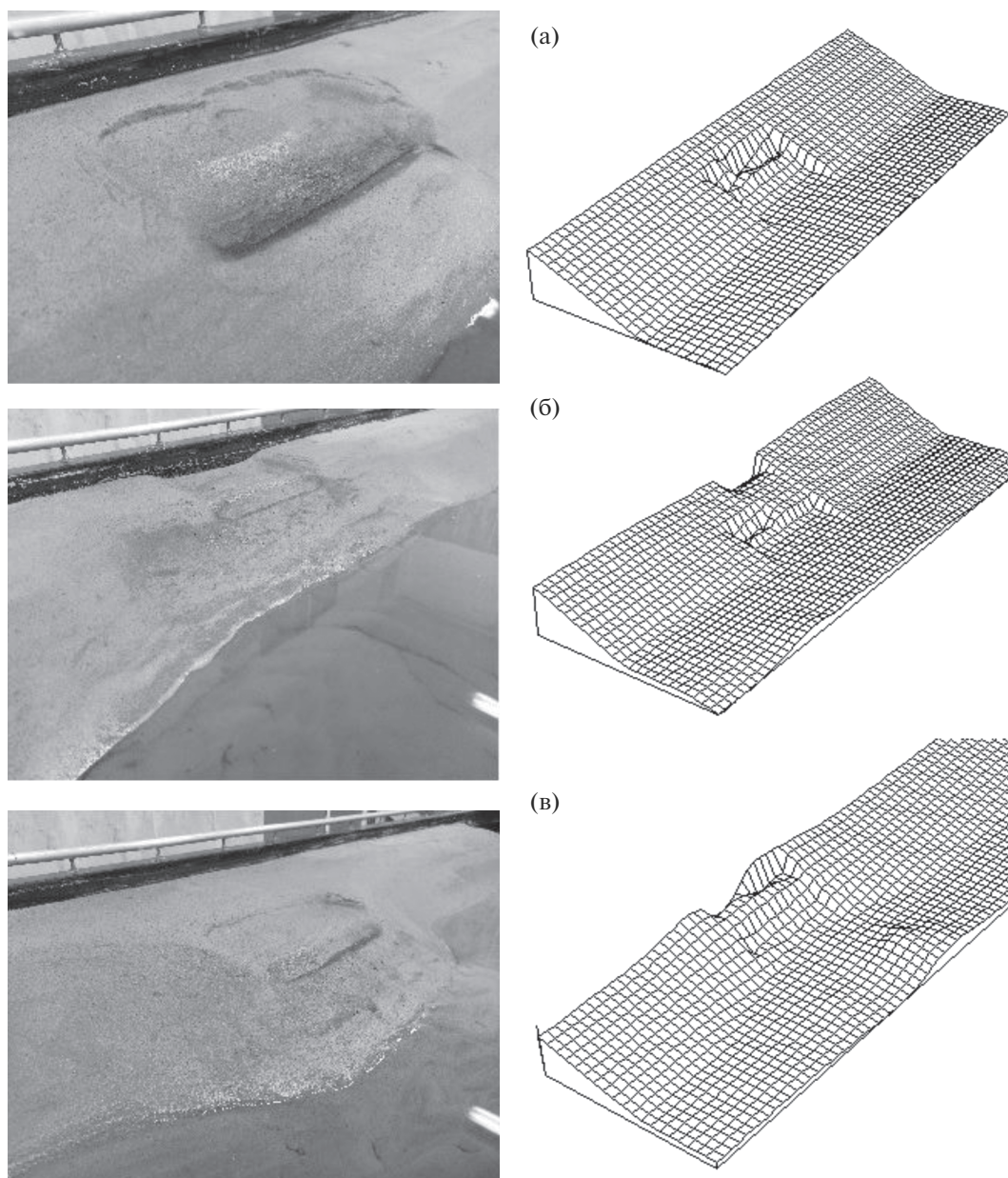


Рис. 3. Фото и рассчитанные поверхности русел с разными видами искривлений по окончании второй серии экспериментов для участков: прямого $kg = 0$ (а), с расширением $kg = 1$ (б), с сужением $kg = -1$ (в).

объему концентрации примеси или осредненной по площади поперечного сечения концентрации примеси в крайнем створе. В табл. 1 приведены результаты сравнения времени исчезновения примеси из потока по данным второго лабораторного и численного экспериментов в зависимости от формы русла. При моделировании нагревания и таяния ледяного включения использовалось известное уравнение переноса тепла:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad x \geq s(t), \quad (1)$$

где λ , ρ , c_p – соответственно теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость мерзлого образца. В процессе проведения модельных расчетов выяснилось, что, если эти характеристики принимать равными для разных случаев искривления русла, то достичь одинакового соответствия времени нахождения примеси в потоке по данным численных и лабораторных экспериментов не удастся. Исследования мерзлых и талых пород, описанные в работе [1], показывают, что значения коэффициента теплопроводности λ для песков в мерзлом и талом состоянии различаются мало, в то время как удельная теплоемкость c_p

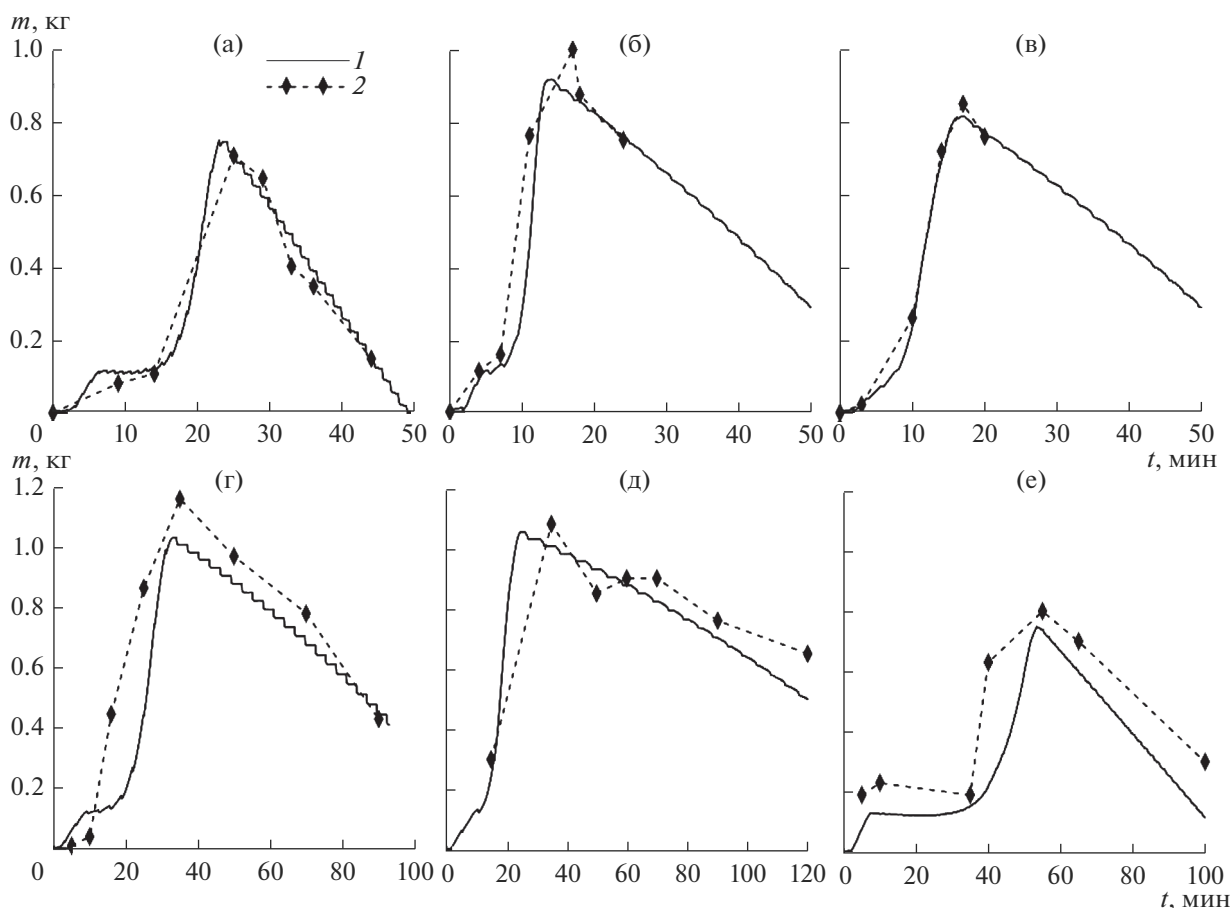


Рис. 4. Изменения во времени массы перенесенного в процессе деформаций песка с выделенных участков в потоках с прямым (а, г), расширяющимся (б, д) и сужающимся (в, е) руслами: 1 – по данным численных расчетов, 2 – по данным измерений в первой (а–в) и второй (г–е) сериях лабораторных экспериментов.

в том диапазоне влажности, который соответствовал условиям проведения лабораторных экспериментов, при переходе образца из мерзлого состояния в талое увеличивается в 1.5 раза. Изменение температуры в центральной точке мерзлого образца по данным модельных расчетов (рис. 5) показывает, что в русле с сужением переход образца в талое состояние происходит гораздо быстрее, чем в прямом русле и в русле с расширением. Соответствующая корректировка удельной теп-

лоемкости позволила уточнить время нахождения примеси в потоке.

Следует отметить, что после окончания экспериментов значительная часть примеси оставалась в донном материале в результате фильтрации. Это учтено в модели путем добавления в уравнение переноса примеси двух слагаемых, отвечающих за фильтрацию, обусловленную градиентами давления по направлению основного русла и берегового склона.

Таблица 1. Время исчезновения примеси из потока $t_{C=0}$ (мин) в зависимости от формы русла

Форма русла	Изменение температуры воды в течение эксперимента, °С	Лабораторный эксперимент	Численная модель
Прямое	14–16	90	87
С расширением	14–17	120	125
С сужением	15–16	100	98

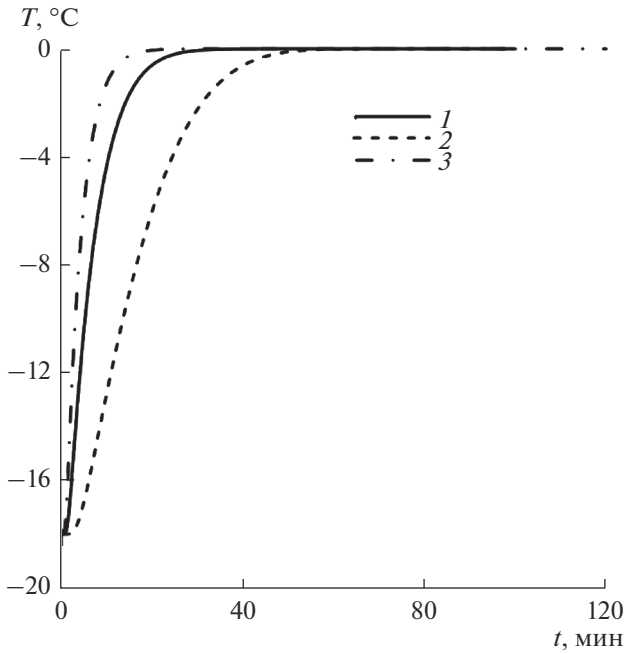


Рис. 5. Изменение температуры ледяного включения в его центральной точке во времени в руслах разной формы (1 – прямое, 2 – с сужением, 3 – с расширением) по результатам численных экспериментов.

Сравнение с аналитическим решением одномерной задачи

Для оценки достоверности рассчитанного с помощью математической модели порядка величины концентрации проведено сравнение данных численного эксперимента с результатами анали-

тического решения одномерного уравнения переноса примеси [26]

$$C = \frac{C_0}{2t\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{(x-ut)^2}{4Dt}\right), \quad (2)$$

где C_0 – концентрация источника, D – коэффициент диффузии, t – время, x – расстояние от источника, u – скорость водного потока.

На рис. 6 показаны поля концентраций красителя через 4 мин после начала действия источника, рассчитанные по двумерной модели и по формуле (2), представляющей решение одномерного уравнения по координате x для каждого фиксированного значения координаты y . При этом скорости $u = u(x, y)$ и коэффициенты диффузии $D = D(x, y)$ – функции двух координат. Из рис. 6 видно, что сравнение результатов расчетов по модели с результатами расчетов по формуле (2), преобразованной для двумерного случая, показало совпадение по порядку величин концентраций для двух этих расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В МАСШТАБЕ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость от фактора формы русла kg

На рис. 7 представлены поверхности деформаций, т. е. отклонений отметок дна от первоначального положения (не рельефы), векторное поле скоростей, изолинии модуля скорости и распределения осредненной по глубине концентрации примеси, рассчитанные для разных видов

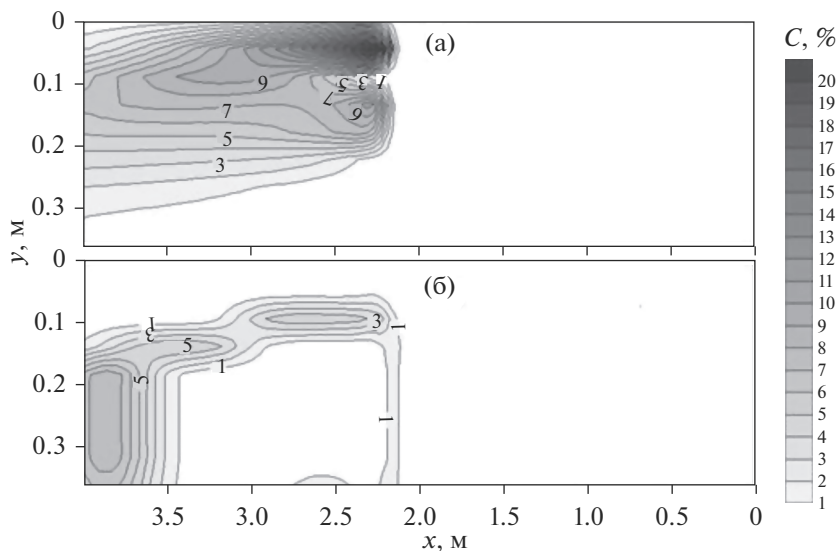


Рис. 6. Распределение концентраций красителя в горизонтальной плоскости потока, рассчитанных по двумерной модели (а) и по формуле (1) (б).

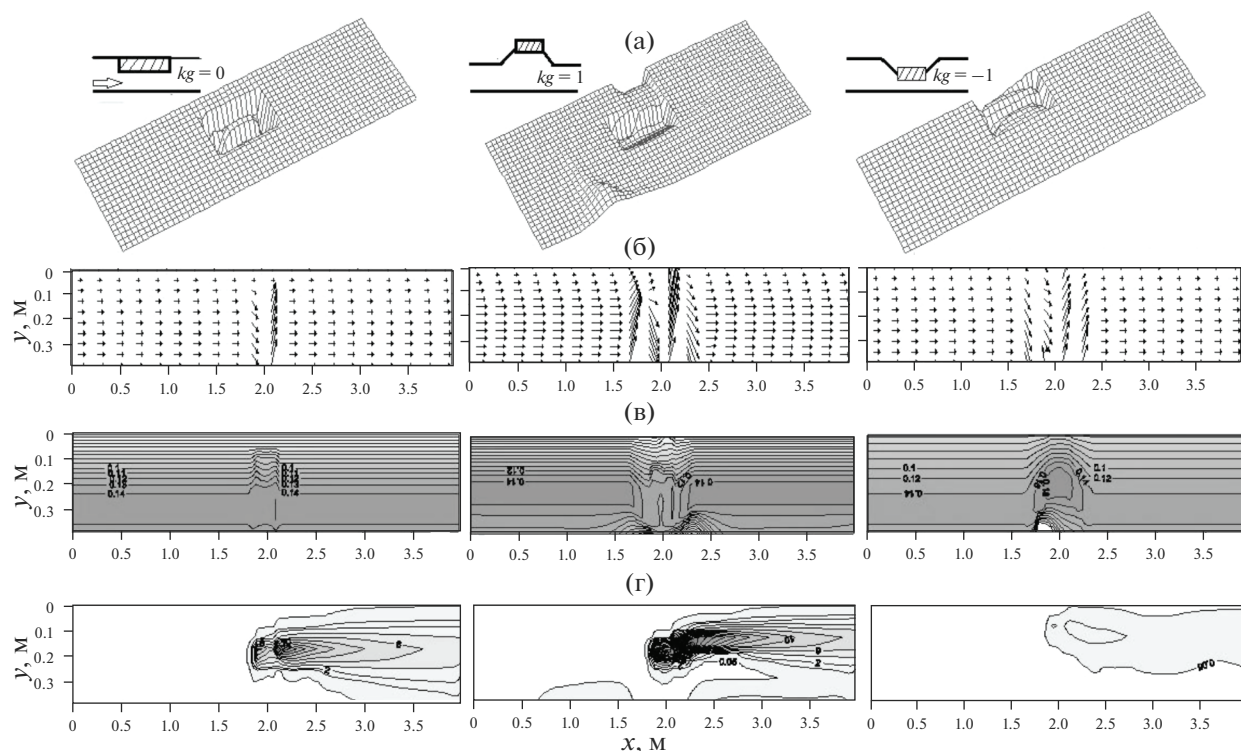


Рис. 7. Поверхности деформаций (отклонений отметок дна от первоначального положения) (а), векторное поле скоростей (б), изолинии модуля скорости (в), распределение осредненной по глубине концентрации примеси (г), рассчитанные для различных видов искривления русла через 20 мин после начала численных экспериментов.

искривления русла через 20 мин после начала численных экспериментов. Анализ рис. 7 позволяет сделать вывод о том, что существенную роль в распределении примеси играют скоростные характеристики и поперечный перенос. Это подтверждается и приведенными на рис. 8 распределениями поперечной скорости водного потока для трех видов формы русла. Очевидно, что в прямом русле ($kg = 0$) поперечные скорости возникают только за счет протаявшей области на месте расположения мерзлого включения. В случае искривленных русел ($kg = \pm 1$) поперечные скорости возникают также и за счет кривизны берега. Для выпуклого и вогнутого русла возникновение поперечных скоростей приводит к развитию вихрей, которые имеют противоположное воздействие, тормозя распространение примеси в одном случае и ускоряя в другом.

Фактор формы kg служит только для определения направления искривления русла от прямолинейной формы в сторону расширения или сужения. Для выяснения более точной зависимости от формы искривления введены коэффициенты искривления по ширине rb и по длине alb русла.

Зависимость от коэффициента искривления по ширине русла

Коэффициент искривления по ширине русла определен как отношение максимальной ширины потока по урезу на криволинейном участке (в данном случае это амплитуда синусоиды) к ширине по урезу на прямолинейном участке. Очевидно, что значения $rb < 1$ соответствуют случаям, при которых фактор формы $kg = -1$, при $rb > 1$ всегда $kg = +1$. При $rb = 1$ $kg = 0$. На рис. 9 приведены изменения во времени осредненных по сечению концентраций примеси в последнем расчетном створе для разных форм искривления русла и зависимости средних и максимальных во времени концентраций примеси от коэффициента искривления по ширине русла rb . Очевидно, что увеличение параметра rb приводит к уменьшению средней концентрации в каждый момент времени и к увеличению времени нахождения примеси в потоке. Хотя осредненные во времени характеристики не значительно различаются для всех сценариев, максимальные во времени концентрации, осредненные как по объему, так и по площади поперечного сечения, в последнем створе в зависимости от коэффициента искривления изменяются в несколько раз.

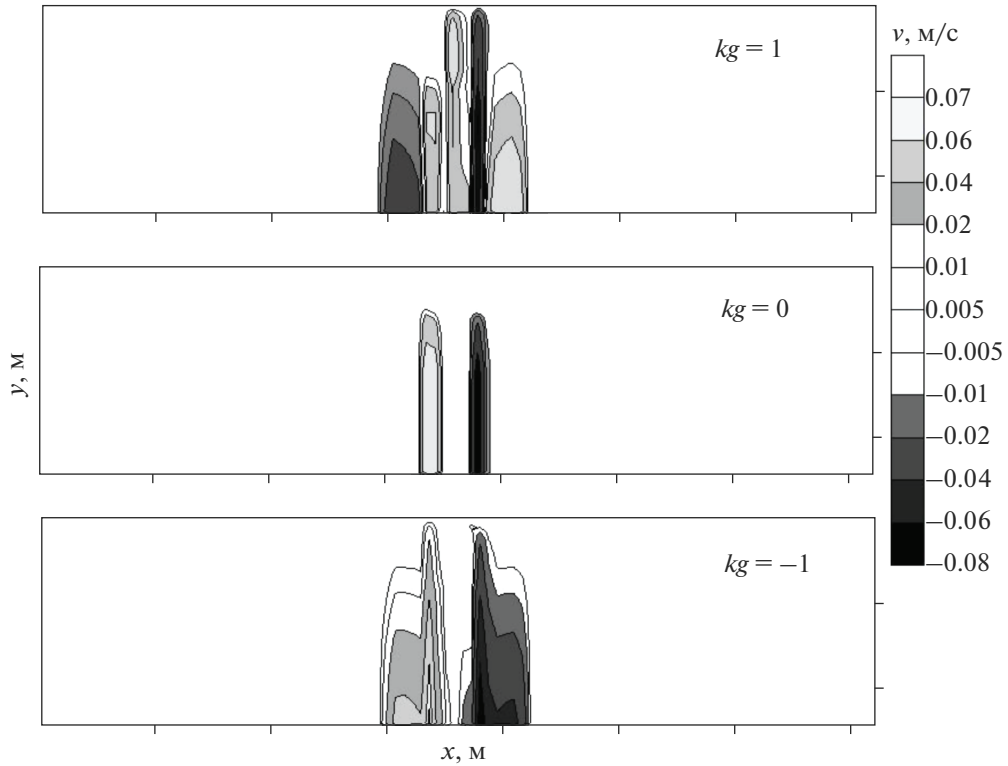


Рис. 8. Распределение поперечной скорости потока в его горизонтальной плоскости для различных случаев искривления русла по данным численных расчетов.

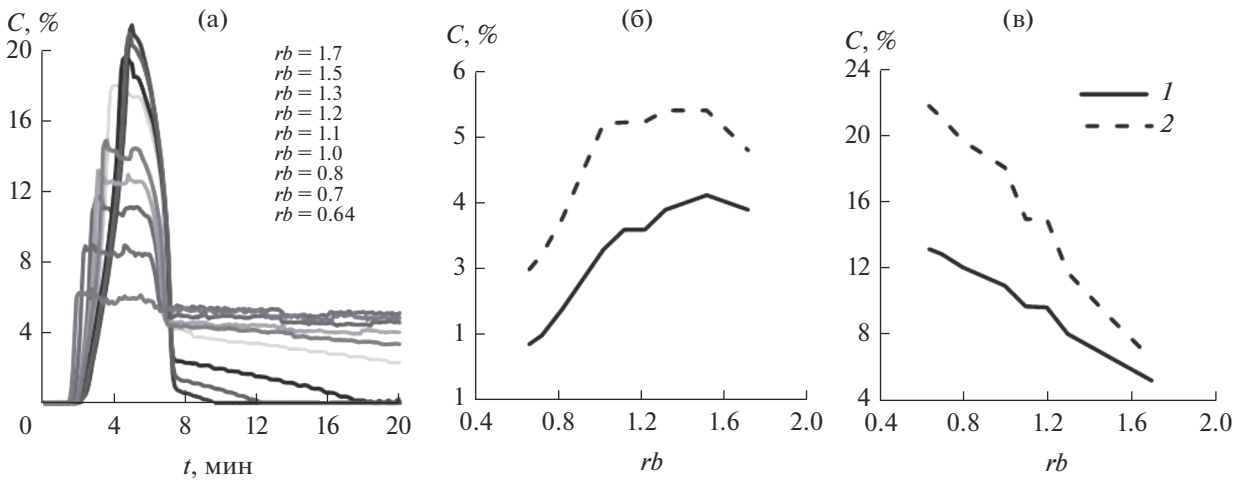


Рис. 9. Изменение во времени осредненных по сечению концентраций примеси в последнем расчетном створе для разных форм искривления русла (а). Зависимости средних во времени (б) и максимальных во времени (в) концентраций примеси от коэффициента искривления по ширине русла rb : 1 – значения концентраций, осредненных по объему, 2 – значения концентраций, осредненных по сечению в последнем створе.

Зависимость от коэффициента искривления по длине русла

Коэффициент искривления по длине русла определен как отношение длины искривленного участка (в данном случае – длины полусинусоиды) к любому постоянному пространственному

размеру. В рассматриваемом случае это либо ширина русла на прямолинейном участке, либо длина расчетного участка. Моделирование сценариев с различными коэффициентами искривления по длине русла показало, что время нахождения примеси в потоке обратно пропорционально дли-

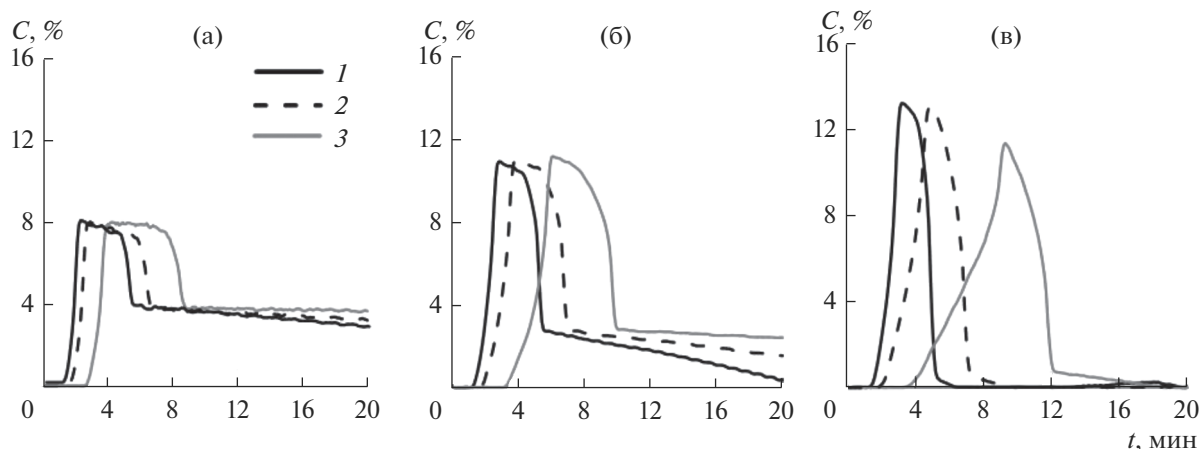


Рис. 10. Изменение средней концентрации C примеси во времени для разных форм искривления русла: с расширением (а), прямого (б) и с сужением (в); и для температуры воды T_b : 1 – $T_b = 15^\circ\text{C}$, 2 – $T_b = 10^\circ\text{C}$, 3 – $T_b = 5^\circ\text{C}$.

не искривленного участка, средние по времени величины концентраций не значительно различаются.

Зависимость от температуры воды

Температура воды – один из основных внешних факторов в процессе термоэрозии; следовательно, она должна влиять и на распространение примеси. Численные эксперименты продемонстрировали, что при увеличении температуры воды в потоке с разными формами русла начало распространения примеси, как и следовало ожидать, наступает раньше. Время нахождения примеси в потоке при увеличении температуры воды для прямого ($kg = 0$) и выпуклого ($kg = -1$) русел значительно уменьшается, для вогнутого ($kg = +1$) меняется незначительно. Максимальные и средние значения концентраций для всех сценариев, как и ход изменения концентраций во времени, меняются незначительно, за исключением случая с выпуклой формой русла. При низкой температуре динамика распространения примеси в сценарии с $kg = -1$ существенным образом отличается: нарастание концентраций происходит медленнее, их максимальное значение существенно ниже, время нахождения примеси в потоке увеличивается (рис. 10).

Влияние формы русла при различном расположении мерзлого включения

Анализ результатов численных экспериментов для случая разного расположения пластинки показал, что при расположении мерзлого включения (МВ) с примесью в начале расчетного участка его форма незначительно влияет на среднюю величину концентрации примеси, при расположении МВ в центральной части моделируемого

участка русла зависимость концентрации примеси от фактора формы более выражена и обусловлена в первую очередь деформациями.

Влияние размера мерзлого включения

Для оценки степени влияния размера ледяного включения при разных формах русла проведены численные эксперименты, имитирующие сценарий, в котором примесь заполняет одинаковый объем, независимо от размера ледяной пластины. В случае короткой пластины она занимает весь ее объем, в случае длинной пластины примесь заморожена в средней части. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что чем меньшую часть ледяного включения занимает участок с замороженной примесью, тем меньше зависимость от формы руслового участка. Этот вывод может быть объяснен тем, что из ледяного включения большей длины вынос примеси водным потоком за пределы расчетного участка русла происходит интенсивнее.

Взаимное влияние начальной температуры и размера мерзлого включения

Воздействие повышения температурного фона на характер распространения примеси от мерзлого источника исследовалось для прямолинейного русла для пластинок разной длины. Численные эксперименты показали, что в прямолинейном русле характер изменения средней концентрации во времени не зависит от размера МВ, если их начальная температура близка к нулю, отличаются лишь концентрации. Характерно, что в широком диапазоне отрицательной температуры динамика распространения примеси почти не зависит от первоначальных значений температуры МВ, но значительно отличается от динамики в случае,

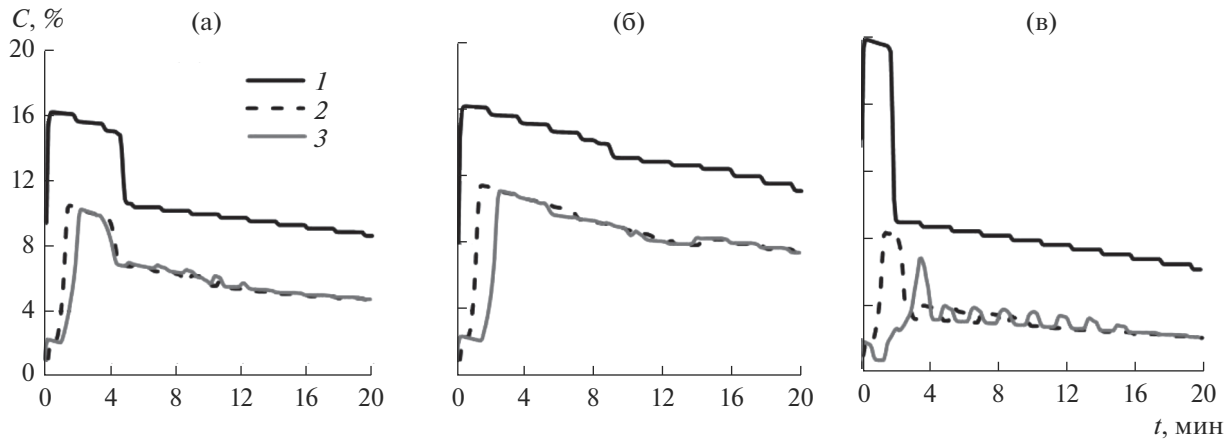


Рис. 11. Изменение во времени осредненной по объему концентрации примеси в прямом (а), расширяющемся (б) и сужающемся (в) руслах с разной начальной температурой мерзлого включения T_{MB} : 1 – $T_{MB} = 0^\circ\text{C}$, 2 – $T_{MB} = -5^\circ\text{C}$, 3 – $T_{MB} = -15^\circ\text{C}$.

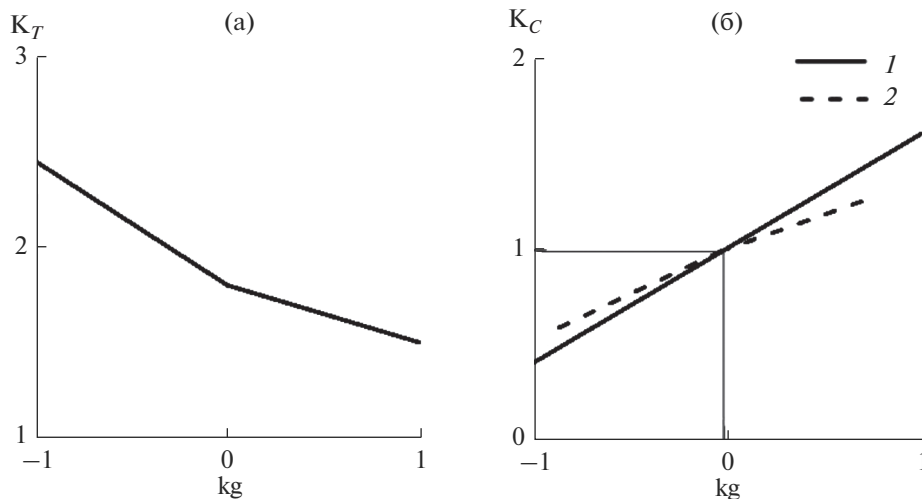


Рис. 12. Зависимости коэффициента изменения концентрации за счет повышения начальной температуры мерзлого включения до нуля K_T (а) и коэффициента изменения концентрации за счет изменения формы русла относительно прямолинейного K_C (б) от коэффициента формы. 1 – $T < 0^\circ\text{C}$, 2 – $T = 0^\circ\text{C}$.

когда первоначальная температура МВ близка к нулю. Это может свидетельствовать о том, что при приближении к температуре фазового перехода русловые деформации, вызванные термоэрозией, и высвобождение примеси существенно ускоряются.

Влияние начальной температуры мерзлого включения при разных формах русла

Зависимости осредненных по объему концентраций примесей от времени для МВ в виде короткой пластинки, расположенной в середине участков русла разной кривизны и целиком заполненной примесью, с начальной нулевой и отрицательной температурой представлены на рис. 11.

Максимальные концентрации примеси в начале таяния незначительно различаются для разных форм русла как при нулевой начальной температуре МВ, так и при отрицательной. В процессе таяния и деформаций русла его форма начинает заметно влиять на характер изменений концентрации. При этом индекс K_T , обозначающий изменение средней по времени и пространству концентрации примеси за счет увеличения начальной температуры оттаявшего МВ, существенным образом зависит от того, на участке какой формы он расположен (рис. 12а).

Так, для участка с сужением ($kg = -1$) при повышении начальной температуры расположенного в нем МВ до нулевых значений средние концентрации увеличиваются почти в 2.5 раза. Но

как при нулевых начальных значениях температуры, так и при отрицательных изменение средней концентрации примеси в определенный момент времени (например, через 20 мин) при переходе от прямолинейного участка к вогнутому, обозначаемое индексом $K_C = C_{20\text{мин}}(kg = i) / C_{20\text{мин}}(kg = 0)$, $i = 1, -1$, — уменьшается (рис. 12б), как бы компенсируя эффект нагревания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных новых лабораторных экспериментов в разработанные ранее математические модели добавлена возможность расчетов распространения примеси из оттаявших источников, расположенных на участках русла с различными формами искривления. Практическая цель исследования состоит в возможности оценки наиболее оптимальных мест расположения вероятных источников загрязнения на берегах рек с целью минимизации экологического ущерба при их оттаивании. К конкретным результатам относятся выводы о влиянии на динамику распространения загрязнений расположения ледяного включения с примесью на участке с искривлением, размера ледяного включения, формы руслового участка, начальной температуры мерзлого включения, температуры воды в потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексютин Д.М., Мотенко Р.Г.* Состав, строение и свойства мерзлых и талых отложений побережья Байдарацкой губы Карского моря // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 1. С. 13–25.
2. *Дебольская Е.И.* Математическая модель русловых деформаций рек криолитозоны // Вод. ресурсы. 2014. Т. 41. № 5. С. 496–506.
3. *Дебольская Е.И., Грицук И.И., Дебольский В.К. и др.* Влияние береговых деформаций на распространение примесей в реках криолитозоны (лабораторное и математическое моделирование) // Вод. ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 396–407.
4. *Дебольская Е.И., Иванов А.В.* Сравнительный анализ применимости моделей русловых деформаций, обусловленных термоэрозией, на реках криолитозоны // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 45–56.
5. *Дебольская Е.И., Иванов А.В., Остякова А.В.* Особенности распространения примеси в руслах рек криолитозоны (лабораторное и математическое моделирование) // Гидротехн. стр.-во. 2021. № 4. С. 48–54.
6. *Are F.E.* Thermal abrasion of coasts. Proc. 4th Int. Conf. Permafrost. Washington D.C: National Acad. Press, 1983. P. 24–28.
7. *Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. et al.* Permafrost is warming at a global scale // Nat. Commun. 2019. 10 (264). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
8. *Cohen J., Screen J.A., Furtado J.C. et al.* Recent Arctic amplification and extreme midlatitude weather // Nature Geosci. 2014. V. 7. P. 627–637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
9. *Couture N.J., Irrgang A., Pollard et al.* Coastal erosion of permafrost soils along the Yukon Coastal Plain and fluxes of organic carbon to the Canadian Beaufort Sea // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2018. V. 123. P. 406–422. <https://doi.org/10.1002/2017JG004166>
10. *Dupeyrat L., Costard F., Randriamazaoro R. et al.* Effects of ice content on the thermal erosion of permafrost: Implications for coastal and fluvial erosion // Permafrost and periglacial processes. 2011. 22 (2). P. 179–187. <https://doi.org/10.1002/ppp.722>
11. *Fuchs M., Nitze I., Strauss J., Günther F. et al.* Rapid Fluvio-Thermal Erosion of a Yedoma Permafrost Cliff in the Lena River Delta // Front. Earth Sci. 2020. V. 8. P. 336. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00336>
12. *Grosse G., Goetz S., McGuire A.D. et al.* Review and synthesis: changing permafrost in a warming world and feedbacks to the Earth System // Environ. Res. Lett. 2016. 11:040201. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/040201>
13. *Günther F., Overduin P.P., Sandakov A.V. et al.* Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // Biogeosci. 2013. V. 10. P. 4297–4318. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4297-2013>
14. *Lamontagne-Hallé P., McKenzie J.M., Kurylyk B.L. et al.* Changing groundwater discharge dynamics in permafrost regions // Environ. Res. Lett. 2018. V. 13 (8). 084017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad404>
15. *Liu J., Hayakawa N., Lu M. et al.* Hydrological and geocryological response of winter streamflow to climate warming in Northeast China // Cold Reg. Sci. Technol. 2003. V. 37. P. 15–24.
16. *Ono J., Watanabe M., Komuro Y. et al.* Enhanced Arctic warming amplification revealed in a low-emission scenario // Commun. Earth Environ. 2022. V. 3 (27). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00354-4>
17. *Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V. et al.* Observationally based assessment of polar amplification of global warming // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29 (18). 1878. <https://doi.org/10.1029/2001GL011111>
18. *Rachold V., Grigoriev M.N., Are F.E. et al.* Coastal erosion vs riverine sediment discharge in the Arctic Shelf seas // Int. J. Earth Sci. 2000. V. 89. P. 450–460. <https://doi.org/10.1007/s005310000113>
19. *Randriamazaoro R., Dupeyrat L., Costard F. et al.* Fluvial thermal erosion: Heat balance integral method // Earth Surface Processes and Landforms. 2007. V. 32 (12). P. 1828–1840. <https://doi.org/10.1002/esp.1489>
20. *Rowland J.C., Schwenk J., Shelef E. et al.* Pan-arctic flux of soil organic carbon to rivers by river bank erosion // Proc. AGU Fall Meeting Abstracts. 2018.
21. *Serreze M.C., Stroeve J.* Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting. Philo-

- sophical Transactions of the Royal Society. 2015. V. 373. 20140159.
<https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0159>
22. *Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K. et al.* Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press. 2014.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
23. *Van Mierlo F.A.J.M.* Numerical modelling of wave penetration in ports // MsC Thesis Delft. Unive. Technol. 2014. 119 p.
24. *Wang P., Huang Q., Pozdniakov S. et al.* Potential role of permafrost thaw on increasing Siberian river discharge // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. 034046.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe326>
25. *Yamazaki Y., Kubota J., Ohata T. et al.* Seasonal changes in runoff characteristics on a permafrost watershed in the southern mountainous region of eastern Siberia // Hydrological Processes. 2006. V. 20. P. 453–467.
<https://doi.org/10.1002/hyp.5914>
26. *Zhang T., Frauenfeld O.W., Serreze M.C. et al.* Spatial and temporal variability in active layer thickness over the Russian Arctic drainage basin // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. D16101.
<https://doi.org/10.1029/2004JD005642>