

ВЛИЯНИЕ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА МАЛЫХ И СРЕДНИХ РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ИХ РУСЕЛ (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ)

© 2025 г. А. М. Тарбеева^{1,*}, В. С. Ефремов², Л. С. Лебедева², В. В. Шамов^{2,3}, И. В. Крыленко¹

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

³Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

*e-mail: amtarbeeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.05.2025 г.

После доработки 06.08.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

На малых и средних реках криолитозоны ледостав длится большую часть года, и нередко ледяной покров нарастает до дна на всём протяжении или на отдельных участках. Однако его влияние на морфологию и динамику русла, сток воды, наносов, растворённых веществ, окружающие отложения практически не исследовано. На трёх малых и средних реках Центральной Якутии выполнены наблюдения за формированием и разрушением ледяного покрова, промерзанием и оттаиванием слагающих русло отложений, мутнотостью воды и проанализированы данные Якутского УГМС, полученные на гидропостах за 2008–2022 гг. Характер замерзания реки – нарастание ледяного покрова до дна на всём протяжении или только на отдельных участках – зависит от его морфологии. Даже при отсутствии питания реки в зимний период на наиболее глубоких (более 1.5 м) участках рек, таких как чётковидные расширения русел или плёсы в вершинах излучин, сохраняются линзы незамёрзшей воды. На промерзающих до дна участках рек лёд примерзает ко дну и берегам, и значительная часть стока половодья проходит по льду. Наличие льда в русле приводит к повышению уровней воды и увеличению скоростей водного потока, но в то же время защищает отложения на дне и берегах от оттаивания и последующего размыва. Пик расходов воды в половодье на самых малых реках проходит по льду, по мере увеличения размера реки пик расходов воды смещается на более поздние сроки, поэтому он проходит по свободному ото льда руслу. Таким образом, влияние половодья на размыв дна и берегов на промерзающих до дна участках рек оказывается снижено из-за затрат энергии водного потока в первой фазе половодья на разрушение льда, заполняющего русло, и оттаивание дна и берегов. Это явление сильнее проявляется на самых малых, имеющих меньшую тепловую энергию реках, чем на более крупных.

Ключевые слова: промерзание рек, речной лёд, наледь, подрусловой талик, чётковидное русло, мутнота, многолетняя мерзлота, руслоформирующие расходы воды

DOI: 10.7868/S2412376525040116

ВВЕДЕНИЕ

Большинство исследований замерзания и вскрытия касается средних и больших не промерзающих до дна рек, наблюдения за формированием и разрушением ледяного покрова на малых реках немногочисленны (Prowse et al., 2007; Agafonova, Vasilenko, 2020; Vandermause et al., 2021). В то же время на малых и средних реках криолитозоны ледяной покров часто нарастает до дна, т.е. наблюдается промерзание

рек (Чеботарев, 1978; Аржакова, 2001). Считается, что в зоне сплошного распространения многолетнемёрзлых пород ежегодно промерзают до дна на всём протяжении равнинные реки с площадью водосбора менее 2 тыс. км², по мере увеличения площади водосбора наблюдается промерзание рек на отдельных участках, обычно на перекатах, и такие реки получили название перемерзающих (Чеботарев, 1978; Аржакова, 2001). При этом промерзание рек чаще всего

фиксируется только в створе гидрологического поста, а обследование их по длине не проводят. Между тем, сроки замерзания и вскрытия, расположение промёрзших и не промёрзших до дна участков рек имеют большое значение для строительства зимних дорог, организации водоснабжения, зимовки гидробионтов (Чижов, 1990; Аржакова, 2001; Arg et al., 2015).

Промерзание рек до дна приводит к прекращению стока воды и промерзанию слагающих русло отложений, чем существенно отличает эти реки от более крупных не промерзающих до дна рек. Влияние промерзания рек на сток воды и наносов, скорости и механизмы размыва дна и берегов, так же как влияние на них климатических изменений, не изучено, хотя именно малые реки, образуя верхние звенья речных систем, имеют наибольшую суммарную протяжённость и оказывают непосредственное влияние на лежащие ниже звенья.

Мёрзлое состояние берегов в целом снижает темпы горизонтальных русловых деформаций (Rowland et al., 2023; Geuman et al., 2024), хотя в ряде случаев вызывает развитие специфических для холодных широт геоморфологических процессов, таких как термоденудация (субаэральное вытаивание подземных льдов) и образование термоэррозионных ниш, которые могут приводить к весьма интенсивному локальному разрушению берегов (Арэ, 1985; Walker, Hogston, 2003, Kanevskiy et al., 2016; Tananaev, 2016). Наблюдения за отступанием берегов на равнинных реках разных размеров на севере Аляски показали, что русла самых малых рек практически не испытывают деформаций, что связывают с малой мощностью потока при относительно крупном составе наносов и защитными свойствами корневой системы кустарников, которыми застают берега малых рек (Scott, 1978). Отмечается также, что переход, по мере возрастания площади водосбора, от промёрзших до дна (bedfast ice) рек к рекам, сохраняющим воду под льдом (floating ice), сопровождается резким увеличением поперечного сечения и ширины русла (Best et al., 2005).

Цель исследования – дать пространственно-временную характеристику процессов формирования и разрушения ледяного покрова, а также промерзания и оттаивания отложений, слагающих русла трёх разных по размерам малых и средних рек Центральной Якутии, и оценить влияние этих процессов на деформации русел.

Природные условия территории. Наблюдения проводились на трёх ключевых участках левобережных притоков среднего течения р. Лены (Центральная Якутия), формирующихся в близких ландшафтно-климатических условиях, но различающихся по размеру и морфологии русла (рис. 1; таблица).

Центральная Якутия характеризуется умеренным резко континентальным климатом с суровой зимой и тёплым летом. По данным метеостанции Якутск за 1950–2023 гг., среднегодовая температура воздуха составила -9.1°C , средняя температура июля $+19.8^{\circ}\text{C}$, средняя температура января -42.1°C , среднее годовое количество осадков – 234 мм.

Бассейны исследуемых рек сложены позднеплейстоценовыми эоловыми, преимущественно мелкозернистыми песками, подстилаемыми отложениями высоких террас р. Лены (Филиппов, Васильев, 2006), занятые сосновыми, лиственничными и сосново-лиственничными лесами (Мерзлотно-ландшафтная карта..., 2018), по понижениям, в том числе и в верховьях рек, заболочены.

Мощность многолетнемёрзлых пород достигает 500 м; глубина сезонного оттаивания изменяется от 0.5 м в заболоченных понижениях и лиственничных марях до 4 м на покрытых сосняками междуречьях (Варламов и др., 2017). Для бассейна р. Шестаковки, в том числе её левого истока – Левой Шестаковки, характерны надмерзлотные водоносные талики, приуроченные к сосновым лесам на склонах долин и расположенные на глубине 3–20 м от поверхности. Их общая доля оценивается в 9.5 % площади бассейна, и они служат важным источником подземного питания рек (Лебедева и др., 2025).

Водный режим рек характеризуется резким подъёмом уровней воды во время весеннего половодья, которое начинается в последних числах апреля – начале мая, достигает пика в первой декаде мая; медленным спадом уровней, продолжающимся до конца июня; низкой летне-осенней меженью, прерываемой обычно невысокими дождевыми паводками. С ноября по апрель сток воды отсутствует. По данным УГМС, реки Шестакова и Кэнкэмэ в створе гидропостов относятся к промерзающим до дна. В ноябре и декабре на многих участках рек наблюдается образование наледей.

Бассейны исследуемых рек слабо затронуты хозяйственной деятельностью, т.е. характеризуют условия, близкие к естественным.

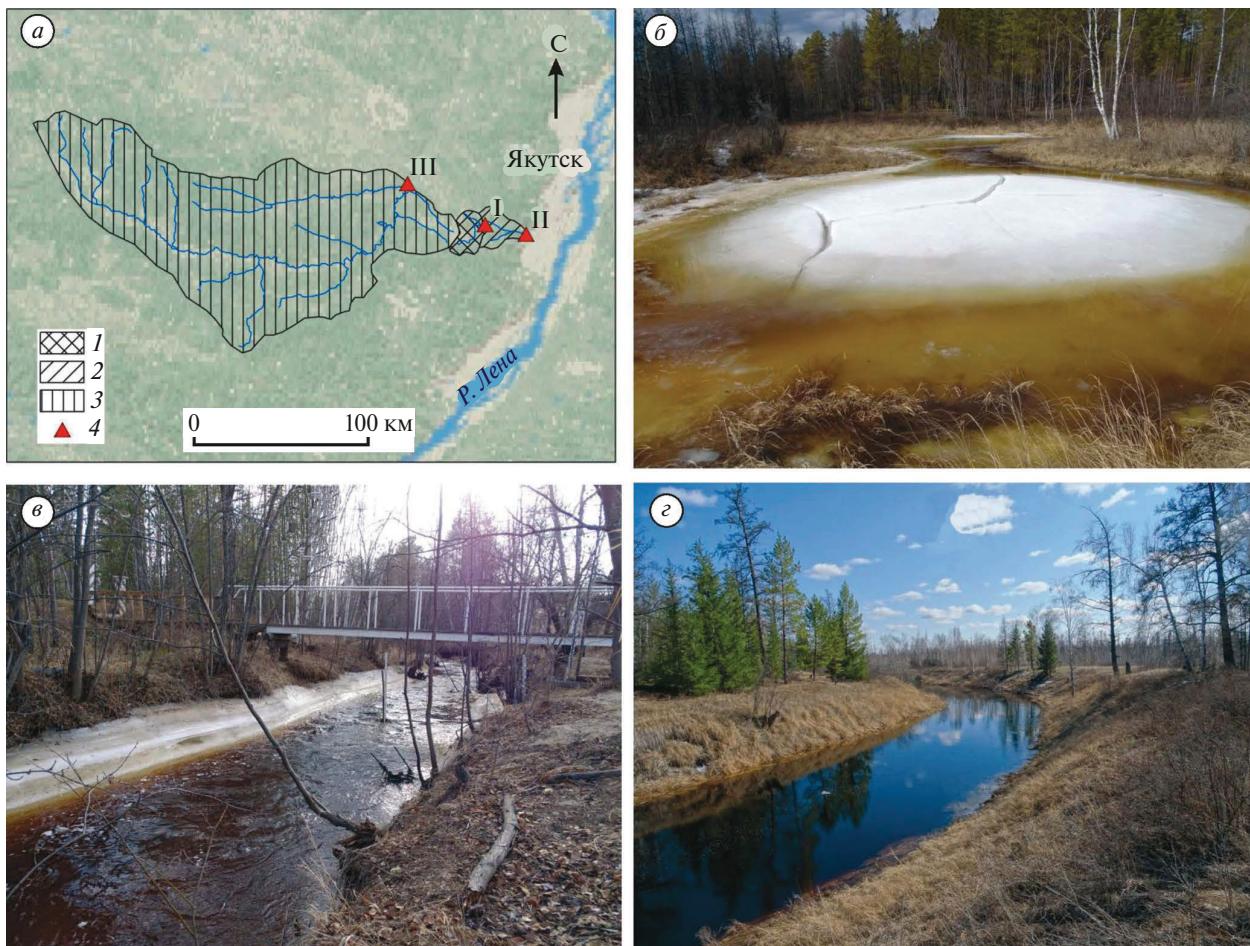


Рис. 1. Ключевые объекты исследований: *а* – обзорная схема расположения бассейнов: 1 – р. Левая Шестаковка; 2 – р. Шестаковка; 3 – р. Кэнкэмэ; 4 – гидрологические посты: I – Верхний (временный); II – Камырдагыстах; III – Второй Станок; *б* – чётковидное русло р. Левая Шестаковка 05.05.2018; *в* – прямолинейное русло р. Шестаковка 10.05.2019; *г* – извилистое русло р. Кэнкэмэ

Fig. 1. Key research objects: *a* – overview scheme of the location of the basins: 1 – Levaya Shestakovka River; 2 – Shestakovka River; 3 – Kenkeme River; 4 – gauging stations: I – Verkhniy (seasonal); II – Kamyrdagystakh; III – Vtoroy Stanok; photographs of rivers on the key sites: *b* – beaded channel of the Levaya Shestakovka River on 05.05.2018; *c* – straight channel of the Shestakovka River on 10.05.2019; *d* – meandering channel of the Kenkeme River

Таблица. Гидролого-морфологические характеристики рек на ключевых участках (сведения о характерных расходах воды и продолжительности отсутствия стока приведены для периода 2008–2022 гг.)

Table. Hydrological and morphological characteristics of rivers on the key sites (water flow characteristics and freezing duration are provided for the period 2008–2022)

Характеристика	Р. Левая Шестаковка	Р. Шестаковка	Р. Кэнкэмэ
Гидрологический пост	Верхний (временный)	Камырдагыстах	Второй Станок
Площадь водосбора, км ²	90	170	3550
Морфология русла	Чётковидное пологоизвилистое	Прямолинейное (искусственно спрятленное)	Извилистое с расширениями в вершинах излучин
Средний многолетний расход воды, м ³ /с	Не определялось	0.14	3.74
Максимальный расход воды, м ³ /с	Не определялось	3.89	62.6
Средняя многолетняя продолжительность отсутствия стока в зимний период, сутки	Не определялось	178	161

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На ключевых участках рек проводилось описание морфологии русел и выявлялись признаки их динамики. Из-за невысоких темпов деформаций русел малых рек, не позволяющих фиксировать их традиционными методами, динамика русел оценивалась по косвенным признакам – наличию незадернованных участков берегов и аккумулятивных форм в руслах, а также по изменению мутности воды. Только на наиболее крупной из исследованных рек – Кэнкэмэ – с 2018 по 2020 г. проводились измерения отступания бровки берега от закреплённых реперов (деревьев) на участке вогнутого берега в вершине излучины.

Для определения строения и мощности ледяного покрова, а также его пространственных изменений перед началом половодья проводилось бурение льда на участках рек, характеризующихся разной морфологией и размерами русел. При описании отмечались мощность льда, его структура, наличие и глубина воды подо льдом, наличие напора. Выделялся прозрачный кристаллический речной лёд и непрозрачный белый или желтоватый натёчный (наледный) лёд. Разделение льда на кристаллический и натёчный позволяет установить механизм нарастания ледяного покрова. Участки реки, где ледяной покров нарастает до дна, мы называем промёрзшими до дна участками реки, где не достигает дна – не промёрзшими до дна.

Для определения характера промерзания и оттаивания подстилающих русло отложений на двух смежных участках р. Левой Шестаковки: промёрзшем до дна и соседнем не промёрзшем до дна, были пробурены скважины 1/18 и 4/17 глубиной 10 м каждая, в которых был описан состав отложений и проводились ежемесячные измерения температур горных пород на разных глубинах с шагом 0,5–1 м. Детально температурный режим мёрзлых пород и описание отложений в бассейне р. Шестаковки рассмотрены в работах (Тарбеева и др., 2019; Лебедева и др. 2023).

В период половодья в мае–июне 2019 г. в сужении и расширении русла р. Левой Шестаковки, а также на прямолинейном участке русла р. Шестаковки проводились непосредственные наблюдения за таянием льда, оттаиванием дна и берегов. Для этого на закреплённых на местности поперечных профилях пешком или с лодки проводились повторные нивелировки поверхности льда, дна и берегов с шагом 0,5–1 м. На участках, свободных ото льда, стальным

щупом определяли глубину оттаивания, в том числе под водой. Понижение поверхности льда в русле также определяли на г.п. Верхний и Камырдагыстах в одной точке, расположенной по центру русла.

Поскольку под толщей воды определить целостность ледяного покрова не всегда возможно, так же как и определить факт достижения растущим ледяным покровом дна, в качестве косвенного маркера этих явлений дополнительно к непосредственным наблюдением и съёмкам с фотоловушек использовались данные с самописцев давления, температуры и электропроводности воды, установленных в не промерзающих до дна участках русел р. Левой Шестаковки и р. Кэнкэмэ. Использование данных с самописцев позволило установить сроки и характер замерзания и вскрытия реки Кэнкэмэ, на которой непосредственные наблюдения за таянием льда в русле не проводились, и сравнить её с меньшей по размеру р. Левой Шестаковкой.

На р. Левой Шестаковке (г.п. Верхний) и Шестаковке (г.п. Камырдагыстах) проводились измерения расходов воды и отбирались пробы воды на мутность ежедневно во время половодья и реже в остальное время. Расходы воды определяли методом “площадь–скорость” с использованием гидрологической вертушки ГР-21М. Мутность определяли в аналитической лаборатории НИИПЭС (СВФУ, г. Якутск) оптическим методом по ГОСТ 57164-2016 на спектрометре ПЭ-5400ВИ и выражали в единицах мутности по формазину (ЕМФ). Полученные данные, вместе с данными по понижению отметок льда в русле, позволили проанализировать изменение расходов воды и скоростей потока по мере прохождения половодья и таяния льда в русле и оценить их влияние на изменение мутности воды, характеризующей размыв русла.

Многолетнее влияние ледяного покрова на размыв русла выявлялось на основе кривых руслоформирующих расходов воды, построенных по данным гидропостов Камырдагыстах на р. Шестаковке и Второй Станок на р. Кэнкэмэ за 2008–2022 гг. (Автоматизированная..., 2025). Руслоформирующими являются такие расходы воды, при которых в многолетнем плане проходит максимальный сток наносов и наблюдаются максимальные русловые деформации (Wolman, Miller, 1960; Маккавеев, 1971). Величина такого расхода определяется по максимуму функции $Q_{\Phi} = f(\sigma Q^m PI)$, где Q – средняя величина расхода воды в пределах каждого интервала, на которые разбивается весь диапазон наблюдаемых

расходов, P – вероятность расходов каждого интервала; I – средний уклон водной поверхности для каждого интервала; m – эмпирический коэффициент, устанавливаемый по кривой связи среднемесячных расходов воды и наносов; σ – коэффициент, зависящий от ширины разлива реки по пойме.

Для оценки влияния ледяного покрова на размыв русла были сопоставлены два вида кривых: за весь период стока воды и исключая период, когда сток воды проходит по льду, так как предполагается, что поток, проходящий по поверхности льда, не воздействует на русло. Для этого была определена продолжительность стока воды, дата прохождения максимальных расходов воды, сроки сохранения льда в русле (принимались по наличию стока поверх льда – отмечается символом “W” в таблицах ежедневных уровней воды). Выделены годы, в которые максимальные расходы воды проходили по льду. По данным ежедневных расходов воды построены кривые руслоформирующих расходов воды за весь период стока и за безледный период. При построении кривых не учитывалось изменение уклонов при разных уровнях воды (в связи с отсутствием данных), а коэффициент σ принимался равным 1, что соответствует отсутствию затопления поймы. Показатель степени m принимался равным 2, что соответствует песчаным наносам (Маккавеев, 1971). Сравнение двух типов кривых позволило выявить основные закономерности влияния ледяного покрова на формирование русла.

Для оценки возможности размыва во время половодья части русла, расположенной выше уровня ледяного покрова, была определена разница между максимальными уровнями воды во время половодья и уровнями воды в самом начале весеннего стока. Предполагается, что уровни воды в начале стока примерно соответствуют уровню поверхности ледяного покрова, а разница между максимальными и начальными уровнями воды отражает высоту затопляемой части береговых откосов над льдом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Морфология и динамика русел рек на ключевых участках. Река Левая Шестаковка на ключевом участке имеет чётковидное русло, состоящее из озеровидных расширений диаметром до 15–20 м, глубинами до 2.5–3.0 м и соединяющих их узких проток (сужений) шириной 1–3 м, глубиной до 1 м (см. рис. 1, б). Берега расширений русла пологие, преимущественно задернованы

и не имеют признаков размыва, берега узких сужений русла часто обрывисты и не задернованы. В летнюю межень при выходе потока из сужений русла в расширения можно наблюдать небольшие песчаные аккумулятивные формы (рис. 2, а). На пойме Левой Шестаковки наблюдается чередование залесённых и открытых (луговых) участков, в верхнем течении реки расположены обширные заболоченные расширения долины, где русло не выражено.

Река Шестаковка в районе г.п. Камырдагы-стах имеет искусственно спрямлённое русло шириной по бровкам около 5 м, глубиной в межень 0.2–0.5 м. В естественных условиях река имела извилистое русло, о чём свидетельствуют изогнутые старицы. Долина реки глубокая и залесена. Берега Шестаковки задернованы и имеют локальные следы размыва. Дно реки в межень сплошь покрыто подвижными грядами песка – рифелями, благодаря чему оно имеет уплощённую форму (см. рис. 2, б).

Река Кэнкэмэ на исследуемом участке имеет извилистое русло (см. рис. 1, г). Ширина русла на крыльях излучин составляет 10–12 м, глубина в межень – до 1 м. В вершинах излучин расположены озеровидные расширения глубиной до 5 м и шириной до 30–40 м. Берега р. Кэнкэмэ сложены песком и имеют высоту 3–5 м, на перекатах образуются песчаные гряды (см. рис. 2, в), а в вершинах некоторых излучин наблюдаются незадернованные участки береговых откосов с признаками размыва. Во время половодья можно наблюдать льдины с примёрзшими частями дернины, а также отложения песка на поверхности льда (см. рис. 2, г). В 2018–2020 гг. максимальная скорость отступания бровки берега составила 0.5 м, средняя по фронту размыва – 0.1 м за два года.

Строение ледяного покрова и распределение промёрзших и не промёрзших до дна участков русел. Озеровидные расширения русла р. Левой Шестаковки, имеющие глубину более 1.5 м, зимой не промерзают до дна. В марте–апреле поверхность льда над ними имеет форму купола (ледяного бугра) высотой 0.3–0.6 м, подо льдом сохраняются линзы напорной воды глубиной до 2 м. Толщина льда в них изменяется от 0.8 до 1.5 м, из которых верхние 30–40 см составляют натёчный лёд, образованный водами, поступающими при растрескивании куполов, а также из берегов при промерзании сезонно-талого слоя. Небольшие расширения русла промерзают до дна, лёд над ними также имеет форму купола, максимальная его толщина достигает 1.6 м.



Рис. 2. Признаки эрозии и аккумуляции наносов в руслах исследуемых рек: *а* – небольшой конус выноса песчаных наносов при выходе из сужения русла в расширение на р. Левой Шестаковке; *б* – песчаные рифели в русле р. Шестаковки, вид вниз по течению с мостика гидропоста Камырдагыстах; *в* – песчаная грязь в русле р. Кэнкэмэ; *г* – всплывший лёд с примёрзшей к нему дерниной в вершине излучины р. Кэнкэмэ во время половодья

Fig. 2. Signs of erosion and deposition in the channels of the studied rivers: *a* – a small fan of sand at the outflow from the run into the pool (bead) on the Levaya Shestakovka River; *b* – sand ripples in the channel of the Shestakovka River, view downstream from the bridge of the Kamyrdagystakh gauging station; *c* – a sand dune in the channel of the Kenkeme River; *d* – floating ice with bank material frozen to it at the top of the meander of the Kenkeme River during a spring flood

Сужения русла промерзают до дна, толщина льда в них составляет 0.2–0.5 м, из которых верхние 5–15 см представляют собой натёчный лёд.

Под дном реки в чётковидном расширении русла (подо льдом и линзой воды) в начале апреля скважиной 4/17 были вскрыты талые отложения (локальные талики) мощностью около 4 м, которые подстилались мёрзлыми породами со слабо отрицательными температурами. В смежном сужении русла скважиной 1/18 талики не выявлены. По данным термометрических измерений, максимальное сезонное оттаивание отложений под сужением русла достигает глубины 2.0–2.5 м и наблюдается в октябре, когда

уже начинается промерзание дна с поверхности. Полностью отложения под руслом промерзают в декабре.

На р. Шестаковке вблизи г.п. Камырдагыстах весной мощность льда в русле составляет 0.5–0.6 м, из которых нижние 0.1 м занимает прозрачный речной лёд, а выше залегает натёчный слоистый белый лёд (наледь). Наледь образуется в русле за счёт поступления воды из берегов при промерзании сезонно-талого слоя. Равномерное распределение глубин в русле приводит к его промерзанию до дна на значительном протяжении и позволяет предположить, что талики под руслом в нижнем течении Шестаковки отсутствуют.

Река Кэнкэмэ на крыльях излучин промерзает до дна. Ледяной покров здесь представлен прозрачным льдом толщиной 75–95 см и подстилается мёрзлым песком. В вершинах излучин, к которым обычно приурочены глубокие расширения русла, поверхность льда имеет форму пологого купола высотой до 0.2 м, толщина льда составляет 80–85 см, под ним сохраняется линза слабонапорной воды глубиной до 3.0–3.5 м. Лёд преимущественно прозрачный, верхний слой натёчного льда достигает в толщину первых сантиметров. Наличие незамёрзшей воды подо льдом указывает на присутствие локальных подрусловых таликов в вершинах излучин.

Изменения физико-химических характеристик воды и их связь с ледовыми явлениями. Процессы образования и разрушения ледяного покрова сопровождаются изменениями температуры, давления и электропроводности воды в пределах не промерзающих до дна плёсов или озёровидных расширений русел рек.

Начало формирования ледостава на р. Левой Шестаковке выражается в снижении давления и понижении температуры придонной воды в расширении русла (рис. 3, *a*; I). Промерзание реки до дна в сужениях русла приводит к возникновению замкнутой линзы воды в соседних не промёрзших до дна расширениях русла, что выражается в резком повышении подлёдного давления воды (рис. 3, *a*; II) и приводит к росту ледяного купола. Рост ледяного купола сопровождается его эпизодическим растрескиванием и выходом воды на поверхность льда с образованием наледи. Это отображается пилообразной формой кривой давления на графике (рис. 3, *a*; III). Весной при переходе среднесуточной температуры воздуха через 0 °C происходит окончательное растрескивание ледяного купола, что приводит к резкому снижению давления придонной воды и появлению воды на льду (рис. 3, *b*; IV). При этом придонная вода не имеет гидродинамического обмена с талой водой на поверхности льда, поэтому сохраняет высокую минерализацию и оклонулевую температуру, а суточный ход температуры придонной воды отсутствует. Появление поверхностного стока приводит к повышению давления в связи с ростом расходов и уровней воды. Разрушение ледяного покрова под действием водного потока наблюдается лишь через несколько дней после растрескивания ледяного купола и отмечается резким снижением электропроводности и появлением суточного хода температуры придонной воды (рис. 3, *b*; V). Полное стаивание льда в русле

приводит к повышению температуры воды выше нулевых значений в ночное время и общему росту температуры воды.

Сравнение температуры и давления воды, полученных в один и тот же год на Левой Шестаковке и Кэнкэмэ (рис. 3, *в–г*), показывает, что промерзание мелководных участков до дна и вскрытие рек (растрескивание куполов) происходит практически одновременно. Однако величина подлёдного давления на р. Кэнкэмэ существенно ниже, чем подлёдное давление на р. Левой Шестаковке, а давление, вызываемое подъёмом уровней воды во время половодья, существенно выше (рис. 3, *в*). Также на р. Кэнкэмэ существенно выше температура придонной воды (рис. 3, *г*): зимой она приближается к +3 °C, а в летний период поднимается выше +20 °C.

Таяние речного льда и оттаивание русел рек в 2019 г. В расширении русла р. Левой Шестаковки, несмотря на наличие купола, таяние льда в центральной части русла происходило быстрее, чем вблизи берегов, и достигало скорости 30 см в сутки (рис. 4, *б*), что можно объяснить центральным положением стрежня потока при выходе из сужения русла. В трещинах на ледяном куполе, частично заполненных прозрачным льдом, происходила концентрация водного потока, что приводило к их расширению (см. рис. 4, *а*). Именно по трещинам 9 мая произошло “пропиливание” ледяного покрова. 10 мая лёд в расширении русла полностью растаял.

Отложения на дне в центральной части расширения русла были талыми в течение всего года. По затопленным пойменным берегам вокруг расширения русла, где скорости течения не превышают 0.1 м/с, оттаивание почвы 14 мая в среднем составляло 4–6 см и достигло 20–30 см лишь в первых числах июня.

В сужениях русла Левой Шестаковки часть водного потока в половодье концентрируется в глубоком узком врезе, но значительная часть проходит по затопленной луговой низкой пойме. Скорости таяния льда в сужении русла достигали 20 см в сутки. В сужении, как и в расширении русла, лёд полностью растаял 10 мая. Через 4 дня после полного стаивания льда в сужении русла глубина оттаивания отложений на дне и затопленной низкой пойме составляла 15–30 см, а к 5 июня в узком врезе уже превышала 1.5 м (см. рис. 4, *в–г*).

На р. Шестаковке у г.п. Камырдагыстах поток воды в половодье постепенно врезался в лёд и сформировал русло во льду (см. рис. 4, *д–е*).

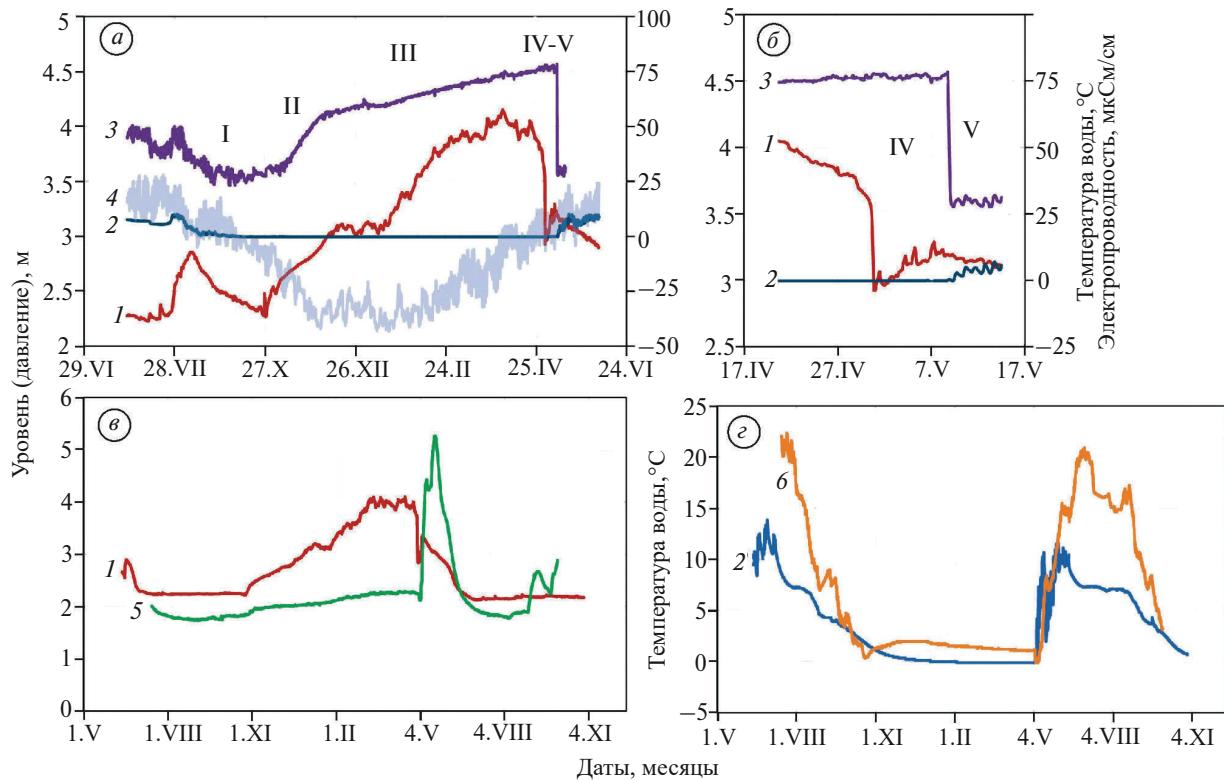


Рис. 3. Изменение физических характеристик придонной воды в не промерзающих до дна расширениях русла: *а* и *б* – на р. Левой Шестаковке в зимний период 2018/19 г.; *в* – крупным планом в период половодья; *в* и *г* – сравнение характеристик придонной воды в расширениях русел р. Левой Шестаковки и р. Кэнкэмэ в 2020–2021 г.: *в* – давления (уровня) придонной воды; *г* – температуры придонной воды: 1 – давление на р. Левой Шестаковке; 2 – температура воды на р. Левой Шестаковке; 3 – электропроводность на р. Левой Шестаковке; 4 – температура воздуха по м.с. Якутск; 5 – давление на р. Кэнкэмэ; 6 – температура воды на р. Кэнкэмэ. Римскими цифрами на рисунках *а* и *б* обозначены этапы, описанные в тексте

Fig. 3. Changes in the physical characteristics of the water near the channel bed in non-freezing channel widenings: *a* and *б* – on the Levaya Shestakovka River in the winter of 2018/19: *a* – for the hydrological year; *б* – zoomed during the flood period; *в* – and *г* – comparison of the characteristics of the water near the channel bed in non-freezing channel widenings of the Levaya Shestakovka and Kenkeme Rivers in 2020–2021: *в* – water pressure (level); *г* – water temperature: 1 – water pressure on the Levaya Shestakovka River; 2 – water temperature on the Levaya Shestakovka River; 3 – electrical conductivity on the Levaya Shestakovka River; 4 – air temperature in the Yakutsk weather station; 5 – water pressure on the Kenkeme River; 6 – water temperature on the Kenkeme River. Roman numerals in figures *а* and *б* indicate the stages described in the text

Максимальные темпы таяния льда наблюдались в центральной части русла и изменялись от 3 до 9 см в сутки, при этом темпы таяния льда, вышедшего из зоны затопления, существенно отставали от темпов разрушения затопленного льда. Стеснение потока льдом привело к образованию промоины-вреза в подстилающих песчаных русловых отложениях (см. профиль 15 мая на рис. 4, *е*). После полного стаивания льда это переуглубление было занесено наносами (см. профиль дна на рис. 4, *е*). Врезание потока в лёд в значительной степени ограничивало контакт потока с береговыми откосами и препятствовало их размыву (см. рис. 4, *д*). Лёд в русле на контакте с водой полностью растаял 20 мая, хотя

на берегах выше уреза воды ещё сохранялись фрагменты ледяного покрова.

Лёд в расширениях русла Кэнкэмэ в начале половодья ломается и всплывает (см. рис. 2, *г*). При этом в сужениях русла примёрзший ко дну лёд тает на месте, защищая дно от размыва на некоторое время. По данным гидропоста Второй Станок, в 2019 г. лёд на дне в русле растаял 7 мая, т.е. раньше, чем на меньших по размеру реках.

Изменение расходов, скоростей течения и мутности воды по мере таяния льда и оттаивания отложений в русле в 2019 г. В сужении русла Левой Шестаковки на г.п. Верхний по мере увеличения

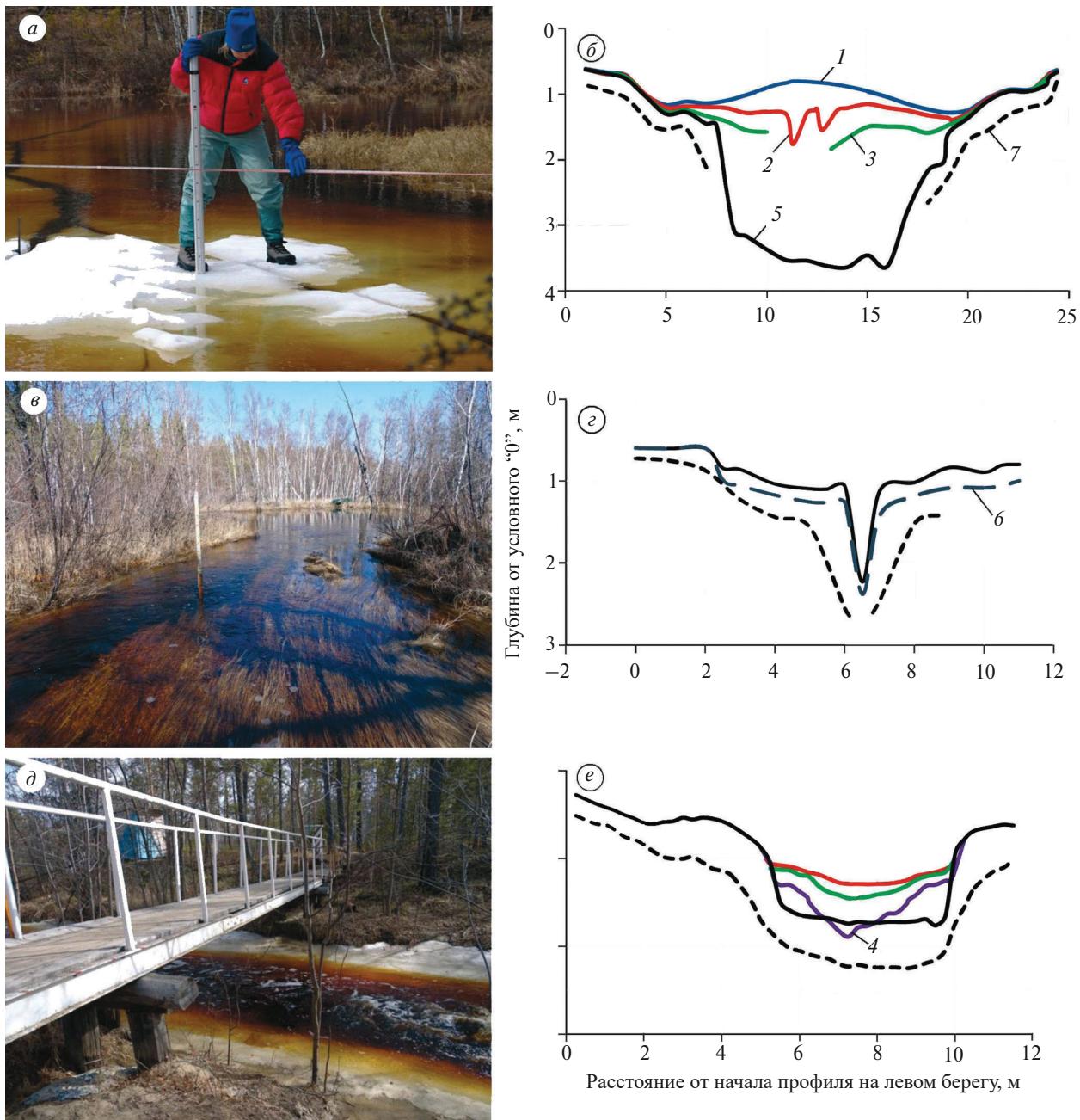


Рис. 4. Изменение поверхности льда и глубины оттаивания на ключевых участках: *а* и *б* – в расширении русла р. Левой Шестаковки; *в* – сужение русла с затопленной низкой поймой 14.05.2019 г.; *г* – динамика глубины оттаивания; *д* и *е* – в русле р. Шестаковки у гидропоста Камырдагыстах: *д* – врезание потока в лёд 10.05.2019 г.; *е* – изменение поверхности льда и глубины оттаивания русла. Обозначения: 1–7 положение поверхности льда: 1–03.05.2019 г.; 2–07.05.2019 г.; 3–09.05.2019 г.; 4–15.05.2019 г.; 5 – поверхность дна и берегов 05.06.2019 г.; 6–7 – глубина оттаивания: 6–14.05.2019 г.; 7–05.06.2019 г.

Fig. 4. Changes in the ice surface and thawing depth on the key sites: *a* and *b* – in the widening of the Levaya Shestakovka River channel: *a* – top of the ice hummock on 03.05.2019; *b* – change in the ice surface *c* and *e* – in the narrowing of the Levaya Shestakovka channel: *c* – narrowing of the channel with a flooded low floodplain on 14.05.2019; *e* – dynamics of the thawing depth; *d* and *e* – in the channel of the Shestakovka River near the Kamyrdagystakh gauging station: *d* – incision of the stream into the ice on 10.05.2019; *e* – change in the ice surface and channel thawing depth. Legend: 1–7 – ice surface position: 1–03.05.2019; 2–07.05.2019; 3–09.05.2019; 4–15.05.2019; 5 – ground surface at 05.06.2019; 6–7 – thaw depth: 6–14.05.2019; 7–05.06.2019

расходов воды в половодье уровни воды росли (рис. 5, *a*). Максимальные скорости потока в сужении русла быстро достигли 0.7 м/с, но дальше практически не менялись, несмотря на увеличение расходов воды, так как по мере понижения поверхности льда, заполняющего узкий врез, увеличивалась часть сечения потока, контактирующая с боковыми стенками вреза, что увеличивало шероховатость.

На Шестаковке у г.п. Камырдагыстах в начале половодья поток растекался по льду, заполняющему русло. Увеличение площади поперечно-го сечения потока на фоне роста расходов воды

компенсировалось врезанием потока в лёд, поэтому уровни воды от начала до пика половодья практически не менялись (рис. 5, *б*). При этом скорости течения потока, имевшего ледяное русло и постепенно углублявшегося, на фоне роста расходов воды значительно возрастали.

Наличие льда в русле значительно повышает уровни воды, а также увеличивает скорости течения за счёт уменьшения шероховатости. Так, на р. Шестаковке у г.п. Камырдагыстах при близких расходах воды, наблюдавшихся 30 апреля (222 л/с), когда поток проходил по льду, и 24 мая (202 л/с), когда лёд полностью растаял, скорости

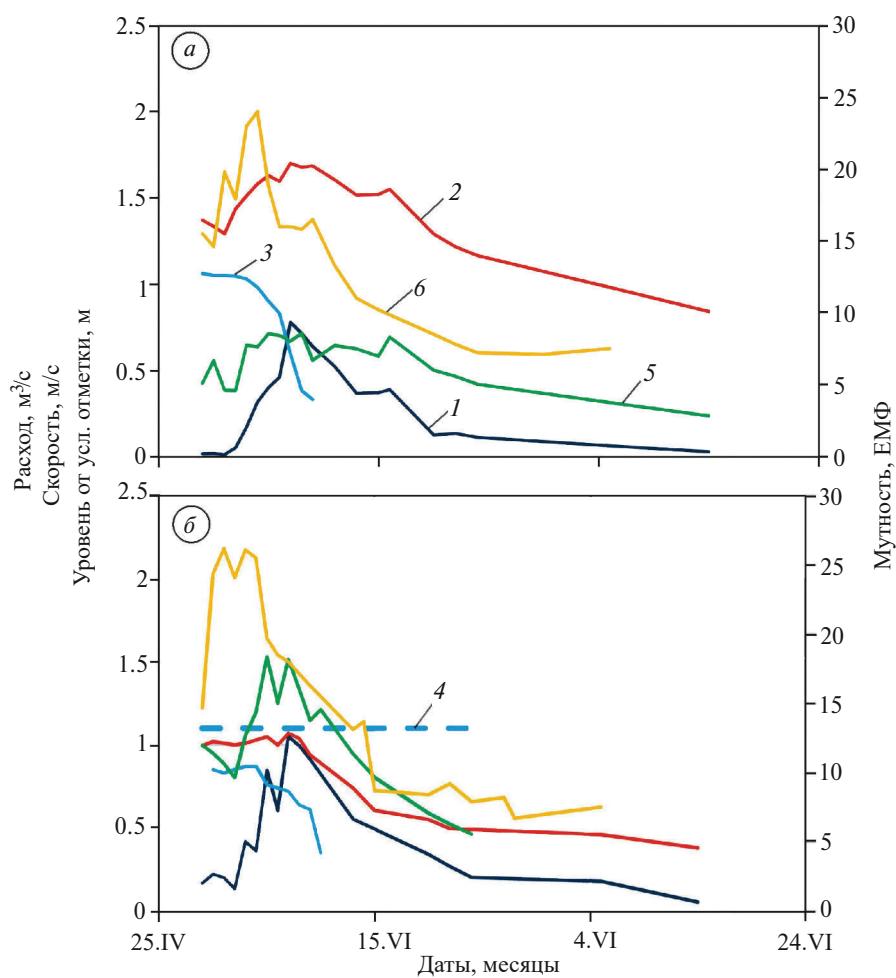


Рис. 5. Измеренные характеристики половодья весной 2019 г.: *а* – на р. Левой Шестаковке (г.п. Верхний) и *б* – на р. Шестаковке (г.п. Камырдагыстах): по левой шкале: 1 – расходы воды, $\text{м}^3/\text{s}$; 2 – уровни воды, м; 3 – уровень льда по центру русла, м; 4 – верхняя кромка льда, м (примерное положение, только для рис. *б*); 5 – осреднённая по вертикали скорость течения на стрежне потока, $\text{м}/\text{s}$; по правой шкале: 6 – мутность, единицы мутности по формазину (ЕМФ)

Fig. 5. Measured flood characteristics in spring 2019: *a* – on the Levaya Shestakovka River (Verkhniy gauging station) and *б* – on the Shestakovka River (Kamyrdagystakh gauging station): on the left scale: 1 – water discharge, m^3/s ; 2 – water levels, m; 3 – ice level in the center of the channel, m; 4 – upper ice edge, m (approximate position, only for Fig. *б*); 5 – vertically averaged maximum flow velocity, m/s ; on the right scale: 6 – turbidity, formazin turbidity units (FTU)

потока на стрежне различались почти в два раза и составляли 0.94 и 0.46 м/с соответственно. Уровень воды при этом 30 апреля был на 0.5 м выше, чем 24 мая.

Изменение оптической мутности весной 2019 г. на р. Левой Шестаковке и на р. Шестаковке имело схожий характер: максимальная мутность наблюдалась на подъёме половодья до прохождения максимальных расходов воды, когда в русле ещё сохранялся лёд. Таяние льда в русле не привело к существенному увеличению мутности воды. На Левой Шестаковке наблюдался небольшой второй пик мутности в период после прохождения пика половодья, но до полного таяния льда в русле (см. рис. 5, а). Этот пик совпадает с максимальными значениями уровней воды и, вероятно, объясняется размывом освободившихся от льда береговых уступов в сужениях русла.

Влияние ледяного покрова на руслоформирующие расходы воды. На гидропостах Камырдагыстах (р. Шестаковка) и Второй Станок (р. Кэнкэмэ) за 15 лет (2008–2022 гг.) были сопоставлены даты прохождения максимальных расходов воды и сроки полного таяния льда в русле. На р. Шестаковке в 12 случаях максимальные расходы воды проходили по поверхности льда, один раз (в 2013 г.) максимальный расход воды отмечен на пике дождевого паводка на спаде половодья, и дважды (в 2010 и 2021 гг.) пик максимальных расходов половодья прошёл после схода льда. При этом подъём уровней воды от начала стока до максимальных за половодье в среднем составлял менее 0.5 м, изменяясь от 6 до 135 см.

На р. Кэнкэмэ максимальные расходы воды проходили по льду три раза из 15, а в остальные годы максимальные расходы воды проходили после полного таяния льда в русле. При этом уровни воды во время половодья в среднем поднимались на 2 м (максимум до 4.5 м) от начального уровня (поверхности льда) – т.е. значительная часть береговых откосов может подвергаться размыву при наличии льда в русле.

Сопоставление кривых руслоформирующих расходов воды показывает, что на р. Кэнкэмэ кривые с учётом периода прохождения стока воды по льду и без учёта расходов этого периода, различаются преимущественно в диапазоне наиболее высоких расходов (рис. 6, б); на р. Шестаковке различия в кривых более существенны – наблюдается некоторое смещение максимумов и в целом снижается повторяемость расходов воды (см. рис. 6, а).

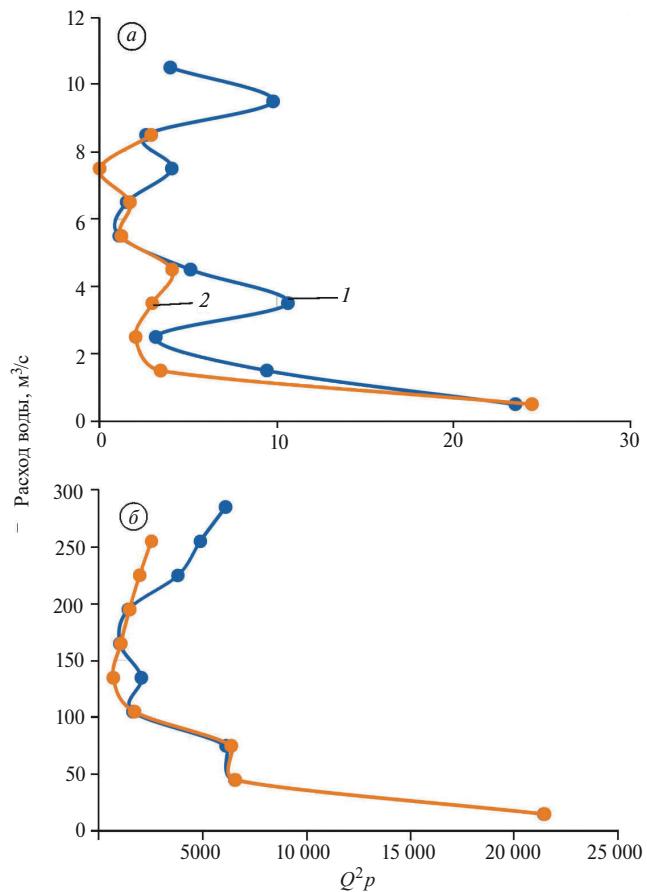


Рис. 6. Сопоставленные кривые руслоформирующих расходов воды: а – Шестаковка, б – Кэнкэмэ: 1 – построенные по всем расходам; 2 – по расходам воды после таяния льда в русле

Fig. 6. Compared curves of effective water discharges: а – Shestakovka, б – Kenkeme: 1 – constructed for all discharges; 2 – constructed for water discharges after ice melting in the channel

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования, проведённые на трёх разных по размерам малых и средних реках, показали, что наличие не промёрзших до дна участков рек в значительной мере зависит от морфологии русла – глубины воды при замерзании – и может наблюдаться на реках любых размеров. Даже на самой малой из исследованных рек – Левой Шестаковке, с площадью водосбора 90 км², присутствуют не промёрзшие до дна участки реки в зимний период. Такие участки приурочены к расширениям чётковидных русел, имеющим глубины более 1.5 м. Т.е., согласно принятым определениям (Чеботарев, 1978; Аржакова, 2001), р. Левая Шестаковка, как и другие исследованные нами реки, должна

относиться к пермерзающим, а не промерзающим рекам. При этом источники питания, поверхностный и подрусловой сток на всех исследованных реках в конце зимнего периода отсутствуют, что подтверждают данные бурения в сужении русла Левой Шестаковки, где отложения полностью промерзают, а также наличие криогенного напора подо льдом на не промёрзших до дна участках рек Левая Шестаковка и Кэнкэмэ, фиксируемое датчиками давления. Широкое распространение чётковидных русел на малых реках криолитозоны (Agr et al., 2015; Harlan et al., 2023) позволяет предположить также широкое распространение не промерзающих до дна участков малых рек.

В то же время равномерное распределение и небольшие значения глубин в искусственно спрямлённом русле нижнего течения р. Шестаковки, а также в сужениях русел и на крыльях излучин р. Кэнкэмэ приводят к промерзанию этих участков рек до дна. Связь промерзающих и не промерзающих до дна участков русла с глубиной описана и на дельтовых протоках р. Лены (Максимов и др., 2022).

Воздействие водного потока на русловые отложения на промерзающих до дна участках рек ниже, чем при аналогичном водном режиме на не промерзающих до дна реках. На реках, не промерзающих до дна, в том числе за пределами криолитозоны, лёд всплывает во время половодья, что часто сопровождается ледоходом, заторами, повреждением берегов льдинами и нередко приводит к усилению размыва берегов (Vandermause et al., 2021). На промерзающих до дна реках, например, на р. Шестаковке, лёд примерзает ко дну, а поток половодья проходит поверх льда, что препятствует оттаиванию подстилающих отложений и размыву русла. На Левой Шестаковке на промерзших до дна и не промёрзших до дна участках реки лёд также не всплывал, так как был крепко приморожен к берегам, таяние льда происходило под водой, что также защищало русло от размыва. На р. Кэнкэмэ, где лёд был тоньше при большей ширине реки, в расширениях русла наблюдалось всплытие льда (см. рис. 2, г), тогда как в сужениях примороженный ко дну лёд таял на месте. Вспывающий лёд в расширениях русла отрывал дернину, т.е. оказывал локальное разрушающее воздействие на берега.

На самых малых реках из-за высокого порога скорости, необходимой для начала размыва отложений и задернованных берегов, руслоформирующие расходы воды часто оказываются

близки к максимальным наблюдавшимся расходам (Wolman, Miller, 1960). Поэтому если максимальные расходы воды на малых реках проходят по льду, то на спаде половодья размыв русла зачастую вообще не наблюдается или он минимален. По мере увеличения размера реки пик расходов воды становится более пологим и смещается на более поздние сроки, поэтому он проходит по свободному ото льда и частично оттаявшему руслу.

Кривые руслоформирующих расходов воды на р. Кэнкэмэ, где влияние льда проявляется меньший период времени, отличаются преимущественно в области максимальных расходов. Это связано с тем, что максимальные расходы воды наблюдались в самом начале половодья, когда в русле ещё сохраняется лёд. На Шестаковке, где большая часть стока половодья проходит по льду, снижается воздействие всех расходов, кроме меженных, и изменяется положение пиков кривых. Однако пики на кривых не могут быть напрямую использованы для установления конкретных значений расходов воды, отвечающих за формирование определённых форм русла, так как при наличии разного объёма льда в русле один и тот же расход воды будет проходить при разных уровнях воды и разных скоростях течения, т.е. будет оказывать разное воздействие на русло.

На Левой Шестаковке деформации русла незначительны и не превышают точности измерения за период наблюдений. Само наличие чётковидных расширений говорит о малом стоке наносов и отсутствии русловых деформаций. Отсутствие дернового покрова на берегах наблюдается только в сужениях русла. Из-за весенного характера берегов в узких глубоких врезах провести непосредственные измерения глубины оттаивания отложений берегов под водой затруднительно. Однако их размыв отражается во втором пике мутности в период прохождения максимальных расходов воды половодья и, вероятно, наблюдается в паводки. Вынесенные из сужений наносы аккумулируются в верхних частях расширений русла из-за резкого падения скоростей потока и образуют локальные конусы выноса (см. рис. 2, а).

В нижнем течении Шестаковки размывы берегов в виде незадернованных участков также очень локальны. Из-за спрямлённого характера русла стрежень потока половодья редко подходит к берегам. Центральная часть русла, где скорости потока весьма высоки, большую часть половодья заполнена льдом. Уровни воды

обычно лишь ненамного превышают поверхность льда, и только в начале половодья, когда берега ещё мёрзлые, а скорости течения вдоль затопленных берегов в результате распластывания потока оказываются незначительными. Однако быстрое “пропиливание” льда по центру русла при сохранении высоких скоростей потока приводит к локальным деформациям дна. После таяния льда в русле скорости потока и уровни воды оказываются недостаточными для размыва берегов.

Река Кэнкэмэ – самая крупная из исследованных и единственная, где удалось зафиксировать деформации берегов. Помимо большей мощности водного потока, это можно объяснить следующими причинами: более частым прохождением высоких расходов воды при отсутствии льда в русле, о чём свидетельствуют данные гидропостов; наличием излучин, где стрежень потока подходит к вогнутому берегу; разрушением берега льдом при его всплытии и ледоходе; размывом русла выше уровня ледового покрова, так как максимальное превышение уровней воды над ледовым покровом достигает 4.5 м. Размыв надледных частей берегов на р. Кэнкэмэ подтверждается отложением наносов на льду (см. рис. 2, г).

Размыв дна и берегов промерзающих до дна рек возможен после таяния льда в русле (за исключением надледных частей берегов), т.е. начало размыва берегов определяется скоростью таяния льда в русле. На скорость таяния льда влияют объём (толщина) льда в русле с одной стороны и энергия водного потока с другой.

Толщина льда в русле, если она не ограничена глубиной, в единых климатических условиях (без учёта перераспределения снежного покрова и выходов подземных вод) зависит от теплопритока из водной массы (Чижов, 2010). На более крупных реках запасов тепла в воде и талых отложений больше. Поэтому на р. Кэнкэмэ, где вода теплее, лёд тоньше, чем в расширениях русла р. Левой Шестаковки. Однако чаще всего, например, в сужениях русла, глубина малых рек в период ледостава меньше возможной толщины льда, что приводит к промерзанию рек до дна. При этом на реках, имеющих достаточно большой запас подземного питания в осенне-зимний период в виде таликовых вод или вод сезонно-талого слоя, толщина льда в русле нарастает сверху за счёт наледей. Так, на Шестаковке в районе гидропоста Камырдагыстах небольшая глубина воды при замерзании приводит к образованию нижнего слоя прозрачного

льда мощностью всего 0.1 м, а остальные 0.5 м льда образуются за счёт притока наледных вод. Это приводит к тому, что почти всё поперечное сечение русла к весне оказывается заполнено льдом. На многих малых реках и в оврагах, не имеющих подземного питания в осенне-зимний период, русла могут промерзать в сухом состоянии без образования ледяного покрова. Соответственно, возможность размыва их русел будет зависеть только от скорости оттаивания отложений дна и берегов.

Скорость таяния льда определяется тепловой энергией водного потока, т.е. его температурой и скоростью течения. Максимальные скорости таяния речного льда и донных отложений на всех исследованных участках наблюдались на стрежне потока. Температура воды в русле зависит от степени прогрева воды выше по течению, например, прогрев происходит при разливе воды в широких заболоченных участках дна долины на р. Левой Шестаковке. На этой реке лёд при близкой его мощности растаял на 10 дней раньше, чем на затенённом участке долины в нижнем течении р. Шестаковки. На р. Кэнкэмэ, имеющей большие расходы и более высокую температуру воды, таяние льда произошло раньше, чем на Шестаковке и Левой Шестаковке.

Климатические изменения приводят к сокращению мощности льда и продолжительности перемерзания русел, но их влияние неоднозначно.

В Центральной Якутии среднегодовая температура воздуха растёт в среднем на 0.68 °С в год, а температура января – на 1.31 °С в год (за 1966–2016 гг.) (Горохов, Федоров, 2018). При этом среднегодовой сток многих рек бассейна Лены, в том числе р. Шестаковки, испытывает положительный тренд (Тананаев et al., 2016). С 1980-х годов отмечается уменьшение толщины льда и увеличение температуры воды в р. Лене, с чем связывают увеличение скорости отступания мёрзлых берегов (Costard et al., 2007). Многолетняя тенденция повышения зимних температур способствует уменьшению продолжительности перемерзания русла (Prowse et al., 2007), а также уменьшению толщины речного льда. При этом на участках, где глубина потока меньше, чем максимальная возможная мощность льда, повышение питания рек в осенне-зимний период может привести к увеличению мощности льда из-за наледей. Снижение мощности льда и прохождение максимальных расходов воды после схода льда и при большой глубине оттаивания

руслы приведут к большему воздействию потока на русло и увеличению стока наносов, что может привести к заполнению глубоких расширений русла наносами. Механизмы занесения озёровидных расширений русла (чёток) вследствие размыва перемычек между ними описаны на Ямале (Тарбееева, Сурков, 2013). Уменьшение глубин в расширениях русла вследствие занесения может привести к промерзанию рек до дна на всём их протяжении и промерзанию отложений, слагающих русла.

ВЫВОДЫ

На малых равнинных реках наличие не промёрзших до дна участков рек в значительной мере зависит от морфологии русла, точнее – от глубины воды при замерзании, и может наблюдаться на реках любых размеров. Влияние ледяного покрова на формирование русел промерзающих до дна и не промерзающих до дна рек различно. На широких не промерзающих до дна реках ледяной покров всплывает и оказывает разрушающее воздействие на берега. Примерзающий ко дну и берегам ледяной покров на промерзающих до дна реках снижает воздействие водного потока на русло из-за затрат энергии водного потока в первой фазе половодья на разрушение льда, заполняющего русло. Это явление сильнее проявляется на самых малых реках, где максимальные расходы воды чаще проходят по льду. При этом могут размываться берега выше уровня льда в реке.

Многолетнее направленное повышение зимних температур воздуха в целом приводит к уменьшению толщины речного льда и уменьшению затрат тепла, необходимых для таяния льда, а увеличение речного стока – к большей тепловой и механической энергии водного потока. Это, очевидно, приводит к тому, что максимальные расходы половодья чаще проходят по свободному ото льда и оттаявшему руслу, а значит, возможность размыва русла усиливается. Между тем, увеличение меженного стока может приводить к росту мощности наледей, а заполнение расширений русел наносами – к более равномерному распределению глубин и промерзанию русел до дна.

Благодарности. Обобщение результатов наблюдений выполнено по плану НИР (ГЗ) 121051100166-4, географический факультет МГУ (2021–2025 гг.). Полевые работы в разные годы выполнялись при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-05-60036, № 19-31-37001, № 20-05-00840),

а также НИОКТР № 122012400106-7, ИМЗ им. П.И. Мельникова СО РАН. Авторы выражают благодарность Н.И. Тананаеву за помощь в установке уровнемера на р. Кэнкэмэ.

Acknowledgments. The reported study contributes to the State Task 121051100166-4, Faculty of Geography, Moscow State University (2021–2025). Field work in different years was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects No 18-05-60036, No 19-31-37001, No 20-05-00840), as well as State Task No. 122012400106-7, Melnikov Permafrost Institute SB RAS. The authors would like to thank N.I. Tannanaev for his help in installing a level gauge on the Kenkeme River.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) // Электронный ресурс. <https://gmvo.skniivh.ru/> (Дата обращения 03.04.2025).
- Аржакова С.К. Зимний сток рек криолитозоны России. Санкт-Петербург: Гос. гидрометеорол. ун-т, 2001. 209 с.
- Арэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск: Наука, 1985. 172 с.
- Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н. Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре “Чабыда” (Центральная Якутия) // Наука и образование. 2017. № 2. С. 34–40.
- Горохов А.Н., Федоров А.Н. Современные тенденции изменения климата в Якутии // География и природные ресурсы. 2018. № 2. С. 111–119. <https://doi.org/110.1134/S1875372818020087>
- Лебедева Л.С., Башев Н.Е., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огненов В.В., Тарбееева А.М. Температура пород в слое годовых теплооборотов в районе распространения надмерзлотных таликов в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2023. Т. 27. № 2. С. 3–15. <https://doi.org/110.15372/KZ20230201>
- Лебедева Л.С., Шамов В.В., Христофоров И.И., Павлова Н.А., Данилов К.П. Роль надмерзлотных суббаэральных водоносных таликов в питании двух малых притоков реки Лены по данным натурных наблюдений // Криосфера Земли. 2025. Т. 29. № 1. С. 37–51. <https://doi.org/110.15372/KZ20250104>
- Маккавеев Н.И. Сток и русловые процессы. М.: Изд-во МГУ, 1971. 115 с.
- Максимов Г.Т., Григорьев М.Н., Большиянов Д.Ю. Формирование и распространение многолетней мерзлоты и таликов под руслами проток в дельте р. Лена // Природные ресурсы Арктики

- и Субарктики. 2022. Т. 27. № 3. С. 370–380.
<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-370-380>
- Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1:1500000. / Ред. М.Н. Железняк. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2018. 2 с.
- Тарбеева А.М., Лебедева Л.С., Ефремов В.С., Крыленко И.В., Сурков В.В., Шамов В.В., Луценко Т.Н. Условия и процессы формирования чётковидной формы русла малой реки криолитозоны (на примере р. Шестаковки, Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 2. С. 38–49.
- Тарбеева А.М., Сурков В.В. Чётковидные русла малых рек зоны многолетней мерзлоты // География и природные ресурсы. 2013. Т. 34. № 3. С. 216–220.
- Филиппов В.Е., Васильев И.С. Перигляциальный рельеф Лено-Вилойского междуречья // География и природные ресурсы. 2006. № 4. С. 82–86.
- Чуботарев А.И. Гидрологический словарь. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1978. 308 с.
- Чижов А.Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщины. Л.: Гидрометеоиздат. 1990. 128 с.
- Agafonova S.A., Vasilenko A.N. Hazardous ice phenomena in rivers of the Russian arctic zone under current climate conditions and the safety of water use // Geography, Environment, Sustainability. 2020. V. 13. № 2. P. 43–51.
<https://doi.org/110.24057/2071-9388-2020-12>
- Arp C.D., Whitman M., Jones B., Grosse G., Gaglioti B., Heim K. Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes // Biogeosciences. 2015. № 12 (1). P. 29–47.
- Best H., McNamara J.P., Liberty L. Association of Ice and River Channel Morphology Determined Using Ground-penetrating Radar in the Kuparuk River, Alaska // Arctic, Antarctic and Alpine Research. 2005. V. 37. № 2. P. 157–162.
- Costard F., Gautier F., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang D., Dupeyrat L. Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in central Siberia // Geophys. Research Letters. 2007. V. 34. L14501 p.
[http://dx.doi.org/10.1029/2007GL030212](https://doi.org/10.1029/2007GL030212)
- Geyman E.C., Douglas M.M., Avouac J.P., Lamb M.P. Permafrost slows Arctic riverbank erosion // Nature. 2024. V. 634. P. 359–365.
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07978-w>
- Harlan M.E., Gleason C.J., Flores J.A., Langhorst T.M., Roy S. Mapping and characterizing Arctic beaded streams through high resolution satellite imagery // Remote Sensing of Environment. 2023. V. 285. 113378 p.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113378>
- Kanevskiy M., Shur Y., Strauss J., Jorgenson T., Fortier D., Stephan E., Vasiliev A. Patterns and rates of riverbank erosion involving ice-rich permafrost (yedoma) in northern Alaska // Geomorphology. 2016. V. 253. P. 370–384.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.023>
- Prowse T.D., Bonsal B.R., Duguay C.R., Lacroix M.P. River-ice break-up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions // Annals of Glaciology. 2007. N 46. P. 443–451.
<https://doi.org/110.3189/172756407782871431>
- Rowland J.C., Schwenk J.P., Shelef E., Muss J., Ahrens D., Stauffer S., Pilliouras A., Crosby B., Chadwick A., Douglas M.M., Kemeny P.C., Lamb M.P., Li G.K., Vulis L. Scale-dependent influence of permafrost on riverbank erosion rates // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2023. V. 128. e2023JF007101 p.
<https://doi.org/10.1029/2023JF007101>
- Scott K.M. Effects of Permafrost on Stream Channel Behavior in Arctic Alaska // Geological Survey Professional Paper 1068. United States Government Printing Office, Washington, USA, 1978. 19 p.
- Tananaev N. Hydrological and sedimentary controls over fluvial thermal erosion, the Lena River, central Yakutia // Geomorphology. 2016. V. 253. P. 524–533.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.009>
- Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43 № 20. P. 10764–10772.
<https://doi.org/10.1002/2016GL070796>
- Vandermause R., Harvey M., Zevenbergen L., Ettema R. River-ice effects on bank erosion along the middle segment of the Susitna River, Alaska // Cold Regions Science and Technology. 2021. V. 85. 103239 p.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103239>
- Walker H.J., Hudson P.F. Hydrologic and geomorphic processes in the Colville River delta, Alaska // Geomorphology. 2003. V. 56. P. 291–303.
[https://doi.org/110.1016/S0169-555X\(03\)00157-0](https://doi.org/110.1016/S0169-555X(03)00157-0)
- Wolman M.G., Miller J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes // Journ. of Geology. 1960. V. 68. № 1. P. 54–74.

Citation: Tarbeeva A.M., Efremov V.S., Lebedeva L.S., Shamov V.V., Krylenko I.V. Impact of ice regime of small and medium-sized rivers in the permafrost zone on the formation of their riverbeds (the case study of Central Yakutia). *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2025, 65 (4): 670–687. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040116.

Impact of ice regime of small and medium-sized rivers in the permafrost zone on the formation of their riverbeds (the case study of Central Yakutia)

© 2025 A. M. Tarbeeva^{a, #}, V. S. Efremov^b, L. S. Lebedeva^b, V. V. Shamov^{b, c}, I. V. Krylenko^a

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^b*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*

^c*Pacific Institute of Geography, FEB RAS, Vladivostok, Russia*

#e-mail: amtarbeeva@yandex.ru

Received May 18, 2025; revised August 6, 2025; accepted September 25, 2025

In small and medium-sized rivers of the permafrost zone, ice formation lasts for most of the year, and the ice cover often grows to the bottom along the entire length or in some of its sections. However, its impact on the morphology and dynamics of the riverbed, runoff, sediment, dissolved substances, and surrounding deposits is still unexplored. Observations on the formation and destruction of ice cover, freezing and thawing of riverbed sediments, and water turbidity on three small and medium-sized rivers were made in Central Yakutia. The data obtained from hydrographic stations of the Yakutsk Hydromet Office in 2008–2022 were used for our analysis. The character of the river's freezing, whether the ice cover grows to the bottom along the entire length of the river or only in certain areas, depends on its morphology. Even in the absence of water sources in winter, lenses of unfrozen water still remain in the deepest (more than 1.5 m) sections of rivers, such as pools of beaded channels or meandering rivers. Local taliks up to 4 m thick are preserved under sections of the river with floating ice, while under sections of the rivers with bedfast ice, the sediments completely freeze in winter. On rivers with bedfast ice a significant part of the snowmelt runoff passes over the ice cover. The presence of ice in the riverbed promotes rising of water levels and increased water flow rates, but at the same time, it protects the sediments on the bottom and banks of the river from thawing and subsequent erosion. The peak of water discharges during the spring flood on the smallest rivers passes over the ice; but as the size of the river increases, the peak of water discharge shifts to later dates, so it occurs on the ice-free riverbed. Thus, the effect of spring floods on the erosion of the bed and banks of rivers with bedfast ice is reduced due to the energy expenditure of the water stream in the first phase of the flood on the destruction of ice filling the channel and the thawing of the bed and banks material. This phenomenon is more pronounced on the smallest rivers, which have lower thermal energy, than on larger ones.

Keywords: freezing of the rivers, river ice, aufeis, under-channel talik, beaded channel, turbidity, permafrost, effective discharge

REFERENCES

- Automated information system of state monitoring of water bodies (AIS GMVO). Retrieved from: <https://gmvo.skniihv.ru> (Last accessed: March 4, 2025)
- Arzhakova S.K. Zimnij stok rek kriolitozony Rossii. River's low-flow at winter Season in the cryolithozone of Russia. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University. 2001: 209. [In Russian].
- Are F.E. Osnovy prognoza termoabrazii beregov. Fundamentals of coastal thermal abrasion forecasting. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985: 172. [In Russian].
- Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Scriabin P.N. The results of 35-year monitoring studies of the permafrost at the Chabyda station (Central Yakutia). *Nauka i obrazovanie. Science and Education.* 2017, 2: 34–40. [In Russian].
- Gorokhov A.N., Fedorov A.N. Current Trends in Climate Change in Yakutia. *Geografiya i prirodnye resursy.*

- Geography and Natural Resources. 2018, 2: 111–119. <https://doi.org/110.1134/S1875372818020087>
- Lebedeva L.S., Baishev N.E., Pavlova N.A., Efremov V.S., Ogonerov V.V., Tarbeeva A.M.* Ground temperature at the depth of zero annual amplitude in the area of suprapermafrost taliks in Central Yakutia. *Kriosfera Zemli. Cryosphere of the Earth*. 2023, 27 (2): 3–15. <https://doi.org/110.15372/KZ20230201>
- Lebedeva L.S., Shamov V.V., Khristoforov I.I., Pavlova N.A., Danilov K.P.* The role of suprapermafrost subaerial talik aquifers in supplying water to small tributaries of the Lena River according to field observations. *Kriosfera Zemli. Cryosphere of the Earth*. 2025, 29 (1): 37–51. <https://doi.org/110.15372/KZ20250104> [In Russian].
- Makkaveev N.I. Stok i ruslovye processy. Runoff and channel processes.* Moscow: Moscow State University Publishing House, 1971: 115. [In Russian].
- Maksimov G.T., Grigoriev M.N., Bolshyanov D.Yu.* Formation and distribution of permafrost and taliks under the channels of channels in the Lena River delta. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki. Natural resources of the Arctic and Subarctic*. 2022, 27 (3): 370–380. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-3-370-380> [In Russian].
- Merzlotno-landshaftnaja karta Respubliki Sakha (Yakutija).* Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia). Scale 1: 1500000. Yakutsk: P.I. Melnikov Institute of Permafrost Studies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2018: 2 p. [In Russian].
- Tarbeeva A.M., Lebedeva L.S., Efremov V.S., Krylenko I.V., Surkov V.V., Shamov V.V., Lutsenko T.N.* Conditions and processes of formation of a beaded channel of a small river in permafrost, Shestakovka River (Central Yakutia). *Kriosfera Zemli. Cryosphere of the Earth*. 2019, 23 (2): 38–49.
- Tarbeeva A.M., Surkov V.V.* Beaded channels of small rivers in permafrost zones. *Geografiya i prirodnye resursy. Geography and Natural Resources*. 2013, 34 (3): 216–220. <https://doi.org/110.1134/S1875372813030049>
- Filippov V.E., Vasiliev L.S.* The periglacial relief of the Lena-Vilyui interfluve. *Geografiya i prirodnye resursy. Geography and Natural Resources*. 2006, 4: 82–86. [In Russian].
- Chebotarev A.I. Gidrologicheskij slovar'.* Hydrological dictionary. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 308. [In Russian].
- Chizhov A.N. Formirovanie ledjanogo pokrova i prostranstvennoe raspredelenie ego tolshchiny.* Formation of ice cover and spatial distribution of its thickness. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 128. [In Russian].
- Agafonova S.A., Vasilenko A.N.* Hazardous ice phenomena in rivers of the Russian arctic zone under current climate conditions and the safety of water use. *Geography, Environment, Sustainability*. 2020, 13 (2): 43–51. <https://doi.org/110.24057/2071-9388-2020-12>
- Arp C.D., Whitman M., Jones B., Grosse G., Gaglioti B., Heim K.* Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes. *Biogeosciences*. 2015, 12 (1): 29–47.
- Best H., McNamara J.P., Liberty L.* Association of Ice and River Channel Morphology Determined Using Ground-penetrating Radar in the Kuparuk River, Alaska. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2005, 37 (2): 157–162.
- Costard F., Gautier F., Brunstein D., Hammadi J., Fedorov A., Yang D., Dupeyrat L.* Impact of the global warming on the fluvial thermal erosion over the Lena River in central Siberia. *Geophys. Research Letters*. 2007, 34: L14501. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL030212>
- Geyman E.C., Douglas M.M., Avouac J.P., Lamb M.P.* Permafrost slows Arctic riverbank erosion. *Nature*. 2024, 634: 359–365. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07978-w>
- Harlan M.E., Gleason C.J., Flores J.A., Langhorst T.M., Roy S.* Mapping and characterizing Arctic beaded streams through high resolution satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2023, 285:113378 p. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113378>
- Kanevskiy M., Shur Y., Strauss J., Jorgenson T., Fortier D., Stephani E., Vasiliev A.* Patterns and rates of riverbank erosion involving ice-rich permafrost (yedoma) in northern Alaska. *Geomorphology*. 2016, 253: 370–384. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.023>
- Prowse T.D., Bonsal B.R., Duguay C.R., Lacroix M.P.* River-ice break-up/freeze-up: A review of climatic drivers, historical trends and future predictions. *Annals of Glaciology*. 2007, 46: 443–451. <https://doi.org/110.3189/172756407782871431>
- Rowland J.C., Schwenk J.P., Shelef E., Muss J., Ahrens D., Stauffer S., Pilliouras A., Crosby B., Chadwick A., Douglas M.M., Kemeny P.C., Lamb M.P., Li G.K., Vulis L.* Scale-dependent influence of permafrost on riverbank erosion rates. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2023, 128: e2023JF007101 p. <https://doi.org/10.1029/2023JF007101>
- Scott K.M.* Effects of Permafrost on Stream Channel Behavior in Arctic Alaska. Geological Survey Professional Paper 1068. United States Government Printing Office, Washington, USA, 1978: 19 p.

Tananaev N. Hydrological and sedimentary controls over fluvial thermal erosion, the Lena River, central Yakutia. *Geomorphology*. 2016, 253: 524–533.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.11.009>

Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophysical Research Letters*. 2016, 43 (20): 10764–10772.
<https://doi.org/10.1002/2016GL070796>

Vandermause R., Harvey M., Zevenbergen L., Ettema R. River-ice effects on bank erosion along the

middle segment of the Susitna River, Alaska. *Cold Regions Science and Technology*. 2021, 185: 103239 p.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103239>

Walker H.J., Hudson P.F. Hydrologic and geomorphic processes in the Colville River delta, Alaska. *Geomorphology*. 2003, 56: 291–303.
[https://doi.org/1.1016/S0169-555X\(03\)00157-0](https://doi.org/1.1016/S0169-555X(03)00157-0)

Wolman M.G., Miller J.P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *J. Geol.* 1960, 68 (1): 54–74.