

Протаивание русла малой реки криолитозоны: результаты наблюдений на р. Шестаковке (Центральная Якутия)

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

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

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

³Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

*amtarbeeva@yandex.ru

Аннотация. Перемерзание русел малых рек в суровых климатических условиях длится большую часть года. Однако, что происходит в русле при его промерзании и протаивании, как это влияет на его морфологию и динамику, сток воды и наносов, окружающие мерзлые породы практически не известно. Между тем, исследование этих процессов актуально для понимания закономерностей развития флювиального рельефа криолитозоны, прогноза изменения стока воды и наносов, растворенных веществ и динамики русла в условиях меняющегося климата. В период половодья проводились наблюдения за динамикой протаивания льда и русла на разных участках реки, определялись температура, уровни воды, мутность потока. Выявлено, что протаивание затопленного речного льда мощностью 1 м происходит за 10 дней от начала половодья. Максимальный расход воды при этом проходит по льду. Дольше лед сохраняется на участках, вышедших из зоны затопления, например, при врезании потока в лед. Мутность воды не увеличивается после протаивания льда в русле. Температура воды в конкретном створе определяется характером затопления поймы выше по течению. Так, при широкой затопленной пойме вода хорошо прогревается и может иметь положительную температуру даже в русле, занятом льдом.

Ключевые слова: криолитозона, малые реки, подрусловой талик, перемерзание русла, ледовый режим, взвешенные наносы.

The thawing of a small river channel in permafrost: observations on the Shestakovka Creek (Central Yakutia, Russia)

A.M. Tarbeeva^{1*}, V.S. Efremov², L.S. Lebedeva², I.V. Krylenko¹, V.V. Shamov^{2,3}

¹ Lomonosov Moscow State University, Russia

² Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

³ Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

*amtarbeeva@yandex.ru

Abstract. Freezing-up of small rivers in severe climatic conditions lasts most of the year. However, what happens in the streambed during its freezing and thawing, how this affects its morphology and dynamics, the water flow and sediment transport and streamside frozen grounds, is almost unknown. A study of these processes is relevant for understanding the patterns and dynamics of the fluvial topography, predicting changes in water flow and sediment transport in a changing climate. Observations of the river ice melting and streambed thawing were made during the spring in different parts of the Shestakovka Creek. Water temperature, water levels and turbidity were simultaneously determined. It was revealed that melting out of flooded river ice of 1 m thickness occurs within 10 days from the beginning of flood. The maximum water flow passes above the ice. The ice retains longer in areas outside

the flooding zone, for example, when a flow incises into the ice. Turbidity of water does not increase after melting of ice in the streambed. The water temperature in a given section is determined by the pattern of upstream flooding. So, with a submerged wide floodplain, the water warms up well and can reach a positive temperature even in the ice-covered streambed.

Keywords: permafrost, small river, under-channel talik, freezing of the channel, ice regime, suspended sediment

Введение

Длительное, достигающее девяти месяцев в году, перемерзание русел рек в суровых климатических снижает продолжительность стока воды, по сравнению с реками в районах более мягкого климата. В этот период размыв русла не происходит, следовательно, темпы горизонтальных русловых деформаций оказываются ниже, по сравнению с реками вне мерзлоты в тех же условиях [1, 9]. Однако что происходит в русле при его промерзании и протаивании, как это влияет на его морфологию и динамику, сток воды и наносов, окружающие мерзлые породы практически неизвестно. Исследование этих процессов актуально для понимания механизмов влияния половодья на динамику промороженного русла, а также прогноза изменения стока воды, наносов, растворенных веществ и динамики русла в условиях меняющегося климата.

Для выявления процессов, происходящих в русле малой реки при его протаивании, были организованы наблюдения на малой реке Шестаковке – левом притоке р. Лены в 20 км к югу от г. Якутска. Как и для многих малых рек криолитозоны, для р. Шестаковки характерно четковидное строение русла, характеризующееся чередованием озеровидных расширений и узких протоков. Такое строение русла приводит к его неравномерному перемерзанию и сохранению незамерзшей воды в наиболее глубоких участках – плёсах [6]. Образование расширений русла связывают с термокарстом – вытаиванием крупных включений льда в отложениях, чаще всего – полигонально-жильных льдов [7, 8]. Однако в долине р. Шестаковки такие включения льда не выявлены [6]. Река Шестаковка была выбрана для исследования процессов, которые могли бы привести к образованию расширений русла в условиях отсутствия крупных ледовых включений. Среди таких процессов ранее предполагались промерзание перекатов и неравномерный размыв талых и мерзлых пород в русле [3, 4].

Природные условия

Бассейн р. Шестаковки расположен в таежной зоне, характеризуется резко континентальным суровым климатом. По данным метеостанции Якутск, среднегодовая температура составляет $-9,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1950-2015 гг.). Мощность многолетнемерзлых пород достигает 500 м; глубина сезонного протаивания – от 0,5 м в заболоченных понижениях и лиственничных марях до 4 м на покрытых сосняками междуречьях [2]. Для склонов, занятых сосновым лесом, характерны надмерзлотные субэральные талики [5]. Долина заложена в эоловых мелкозернистых мерзлых песках с весовой льдистостью 20–40%, врезана на глубину 8–10 м [6].

Река Шестаковка характеризуется резким подъемом 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 паводками. Максимальный расход воды во время половодья на гидрологическом посту Камырдагыстах (период наблюдений 1951–2015 гг., площадь водосбора 170 км^2) составляет $2,8\text{ м}^3/\text{сек}$. С ноября по апрель река перемерзает (в среднем на 188 дней), подземное питание отсутствует.

Исследовались верховья р. Шестаковки, где площадь ее водосбора составляет 90 км². Русло реки состоит из озеровидных расширений шириной до 15–20 м, глубиной до 2,5–3,0 м, соединенных узкими и мелкими протоками шириной 1–3 м, глубиной до 1 м и протяженностью от 1 до 30–40 м. Бурением установлено, что четковидные расширения русла р. Шестаковки зимой не перемерзают полностью, в них сохраняются линзы напорной минерализованной воды мощностью до 2 м, а под ними сохраняются локальные талики, мощностью до 3–4 м. Мелководные сужения русла полностью промерзают, глубина сезонного протаивания под ними достигает 1,5–2,0 м [6].

Методы

В 2016–2019 гг. на ключевом участке р. Шестаковки проводилась автоматизированная регистрация давления, электропроводности и температур воды. Автономные беспроводные датчики давления, температуры и электропроводности воды (Keller DCX-18 есо и U-24 Onset Hobo) погружались на дно неперемежающегося четковидного расширения русла р. Шестаковки и оставлялись там круглогодично, проводя запись измерений через каждые 3 часа. Извлекались они один раз в год в летний период для считывания данных. Для обоснования интерпретации данных, получаемых с подледных самописцев, участки русла в месте установки датчиков фотографировались при помощи автоматических фотокамер.

В весенний период 2019 г. один раз в 2 дня проводились нивелировки поверхности льда и грунта вблизи русла по закрепленным поперечникам через четковидное расширение и смежное с ним сужение русла, а также на прямолинейном участке русла в нижнем течении реки у г.п. Камырдагыстах. На участках, свободных ото льда, в пределах поперечников щупом определялась глубина протаивания грунта. На временном гидрологическом посту в верхнем течении измерялись расходы воды и проводился отбор проб для определения мутности оптическим методом. Пробы воды анализировались в лаборатории НИИПЭС СВФУ (г. Якутск).

Результаты и обсуждение

Совместный анализ графиков температуры, давления и электропроводности придонной воды позволяет выявить характер сезонных изменений в русле, связанных и его замерзанием и протаиванием (Рис. 1). Кривая давления отражает изменение уровней воды в период открытого русла, а после его перемерзания – значения криогенного подледного давления воды. Осенью, после перехода температуры воздуха через 0°C, уровни воды снижаются. Однако 26–28 октября при отрицательных температурах воздуха давление резко начинает расти. Рост давления происходит на фоне излияния воды на лед, при этом на снимках с фотокамер видно, что центральную часть расширения русла приподнята, не заливаается, то есть, в нем под давлением начинает формироваться ледовый купол.

С 9 ноября по 1 декабря 2018 г. были зафиксированы повышенные темпы роста электропроводности воды, вероятно, связанные с активным нарастанием речного льда и криогенным концентрированием растворенных веществ. Этот же период характеризовался плавным изменением кривой давления, что, вероятно, связано с отсутствием эпизодов растрескивания растущего ледового бугра и пластичной деформацией льда. Дальнейший рост давления имел пилообразный характер, а электропроводность (сумма растворенных в воде веществ) росла равномерно и медленно до самой весны. Вероятно, это объясняется периодическим растрескиванием купола с последующим заполнением трещин, и промерзанием отложений вокруг подруслового талика. Пилообразный рост давления продолжался до 30 апреля, когда произошел его резкий сброс. Он свидетельствовал о растрескивании бугра, однако произошел до появления поверхностного стока. На появление стока воды указал

подъем кривой давления, связанного с повышением уровня воды. Однако, при этом перемешивания воды, сохранившейся подо льдом, с талой водой на поверхности льда не происходило. Это выразалось в отсутствии изменения температуры и высоких значениях электропроводности придонной воды. В это время талая вода текла поверх льда, а поток не мог оказывать эрозирующего воздействия на дно реки, бронированное льдом. Размыв льда потоком произошел вечером 9 мая и отметился резким падением электропроводности придонной воды, связанным с ее разбавлением поверхностными ультрапресными талыми водами, а также повышением значений и появлением суточного хода температур придонной воды.

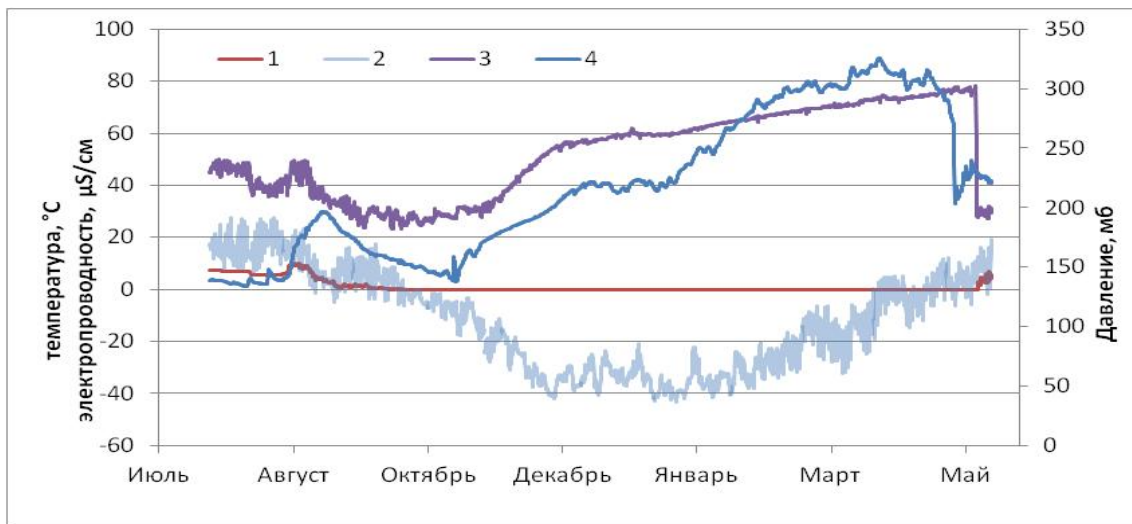


Рис. 1 Изменение температуры, давления и электропроводности придонной воды в расширении русла р. Шестаковки, а также температуры воздуха в 2018-2019 гг.: 1 – температура воды в придонном слое; 2 – температура воздуха по метеостанции Якутск; 3 – электропроводность воды придонном слое; 4 – давление воды в придонном слое.

В 2019 г. разрушение льда в период между 9 и 11 мая было подтверждено непосредственными повторными нивелировками поверхности речного льда (Рис. 2). На графиках видно, что наибольшие скорости протаивания льда составили 5–15 см в сутки и наблюдались по стрежню потока. Происходило расширение трещин во льду, главным образом за счет концентрации в них водного потока. Лед в расширении русла и смежном с ним сужении растаял одновременно в течение 9–10 мая. Донный грунт в центральной части расширения русла круглогодично талый [6]. По берегам расширения русла, где течение слабое, протаивание грунта к 14 мая в среднем составляло 4–6 см и достигло 20 см лишь в первых числах июня. В сужении русла, где происходила концентрация водного потока и наблюдались высокие (до 1 м/с) скорости течения, через 4 дня после таяния льда в русле глубина оттаивания грунта составляла 15–30 см, а к 5 июня превышала 1,5 м.

В нижнем течении реки, у г.п. Камырдагыстах, где река на большом протяжении течет в глубокой залесенной долине, лед не протаял к 15 мая, а поток на спаде половодья постепенно врезался в лед, концентрируясь по центру русла. При этом темпы таяния льда, вышедшего из зоны затопления, существенно отставали от темпов таяния затопленного льда. Полное таяние льда в нижнем течении произошло, вероятно, 20 мая, когда регистраторы зафиксировали резкий подъем температуры воды до $+5,1^{\circ}\text{C}$ (с 15 мая по 6 июня наблюдения не проводились). При этом, прорезав лед, поток вновь углубил свое русло, а затем, по мере таяния льда, заполнил песчаными наносами это углубление.

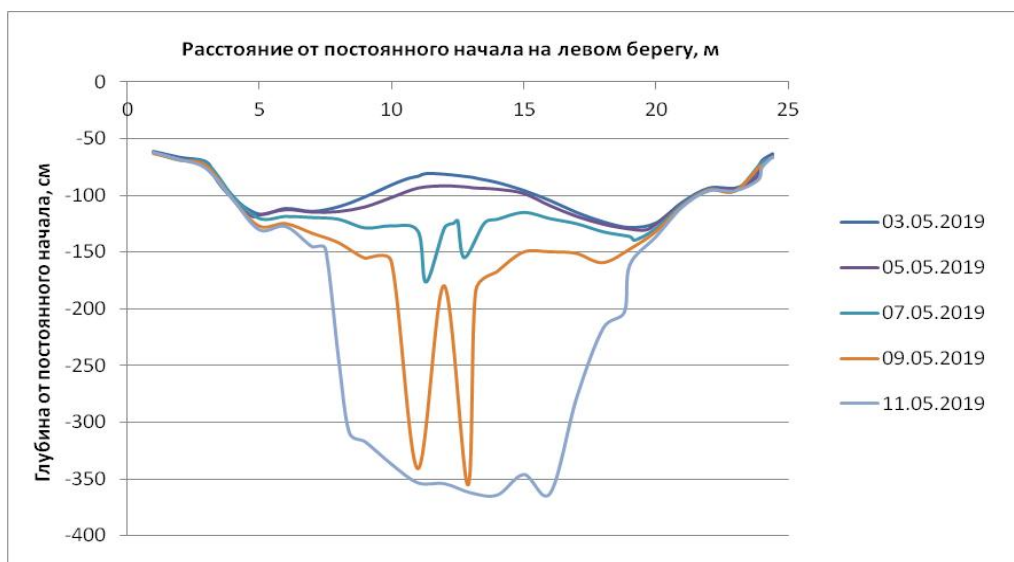


Рис. 2 Сопоставленные профили поверхности ледового покрова (с 03.05.2019 по 09.05.2019) и дна (11.05.2019) в расширении русла. 09.05.2019 в двух точках в центре русла рейка установлена на дно через трещины во льду.

В период прохождения половодья 2019 г. в верхнем течении реки измерялись расходы воды и ее мутность (Рис. 3).

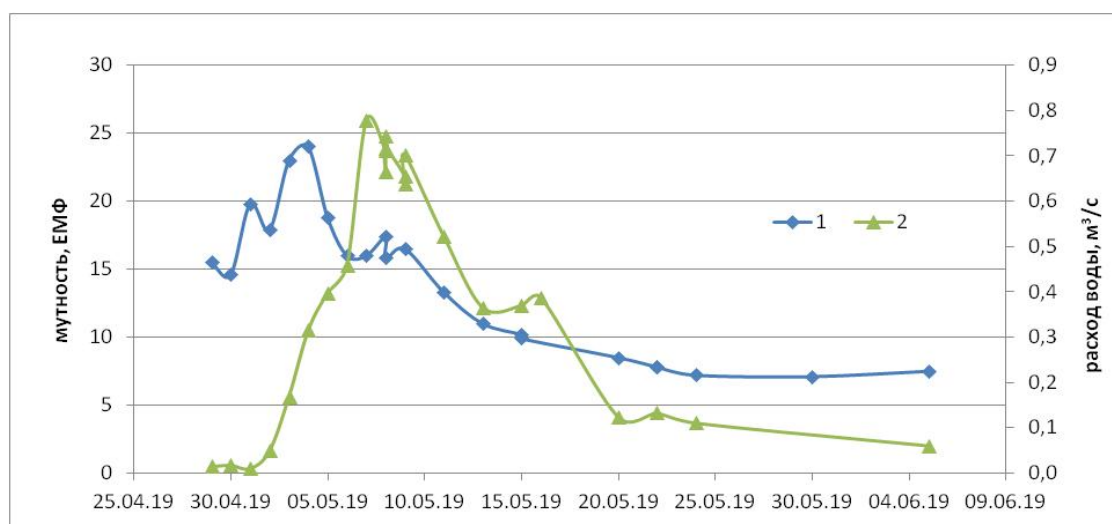


Рис. 3 Изменение мутности (1) и расходов воды (2) р. Шестаковки во время половодья 2019 г.

Максимальная мутность воды зафиксирована 4–5 мая, второе небольшое повышение мутности наблюдалось во время пика половодья 7 мая. Далее, 9 мая, после протаивания руслового льда существенного повышения мутности не наблюдалось. Вероятно, это объясняется преимущественно бассейновым источником поступления взвешенных наносов, а также низким содержанием илистой и глинистой составляющих в преимущественно песчаных отложениях русла. Определить изменение русловой составляющей стока наносов в связи с таянием льда пока не удалось.

Обсуждение результатов и выводы

В отсутствие стока воды русло малой реки в зоне мерзлоты подвергается воздействию криогенных процессов, вызванных его неравномерным промерзанием. Первыми перемерзают мелководные участки - перекаты, а над плёсами формируется

ледовый покров, который нарастает вниз, сдавливая воду между льдом и донными отложениями. Давление воды, возникающее подо льдом в плёсах, приводит к образованию ледовых бугров, сохраняющих под собой талые отложения и незамерзшую воду с высоким содержанием растворенных веществ. Подъем и пик уровней воды в половодье наблюдаются в период, когда вода течет поверх льда, а поток не оказывает эродированного воздействия на русло. Решающую роль в динамике протаивания льда и донных отложений русла играет скорость потока: на стрежне наблюдаются максимальные скорости протаивания льда и грунта. Большое значение имеет температура воды, которая различается по участкам реки в зависимости от характера разлива потока и затенённости долины. После протаивания льда в русле мутность потока не увеличивается. Вероятно, этот факт отражает поступление наносов с поверхности водосбора, а не из русла. Расходы воды в реке, несмотря на быстрое таяние льда и оттаивание донных отложений, на спаде половодья оказываются недостаточными для существенных деформаций русла.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 20-05-00840, 20-35-70027; 18-05-60036 и по плану НИР (ГЗ) АААА-А16-116032810084-0, географический факультет МГУ.

Acknowledgments

The reported study was funded by RFBR, projects number 20-05-00840, 20-35-70027; 18-05-60036 and contributes to the State Task no. АААА-А16-116032810084-0, Faculty of Geography MSU.

Список литературы

1. Арэ Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск: «Наука», 1985. 172 с.
2. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н.. Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре «Чабыда» (Центральная Якутия) // Наука и образование, 2017, № 2, с. 34-40.
3. Воскресенский С.С. Геоморфология Сибири. М.: Изд-во МГУ. 1962. 340 с.
4. Григорьев А.А. Геоморфологический очерк Якутии. Л.: Изд-во АН СССР, 1927. 52 с.
5. Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Надмерзлотные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 1, с. 40–50.
6. 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.
7. 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. № 12 (1). 2015. Pp. 29-47.
8. Hopkins, D.M., Karlstrom, T.N.V., Black, R.F., et al., 1955. Permafrost and ground water in Alaska. Geological Survey, Professional Paper. Washington, USA, 264 F, 146 pp.
9. 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.