

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ И ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 551.435.1; 551.435.5 (292.513)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(38-49)

**УСЛОВИЯ И ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
ЧЁТКОВИДНОГО РУСЛА МАЛОЙ РЕКИ КРИОЛИТОЗОНЫ  
(НА ПРИМЕРЕ Р. ШЕСТАКОВКА, ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ)****А.М. Тарбеева<sup>1</sup>, Л.С. Лебедева<sup>2</sup>, В.С. Ефремов<sup>2</sup>, И.В. Крыленко<sup>1</sup>, В.В. Сурков<sup>1</sup>,  
В.В. Шамоу<sup>2,3</sup>, Т.Н. Луценко<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; [amtarbeeva@yandex.ru](mailto:amtarbeeva@yandex.ru)<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия<sup>3</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, 690041, Владивосток, ул. Радио, 7, Россия

Наблюдения за термическим режимом грунтов, образованием и разрушением льда, гидрологическими характеристиками и изучение геологического строения были проведены в русле малой реки Центральной Якутии с целью выявления процессов, формирующих ее чётковидное русло. Этот тип русла, свойственный многим рекам криолитозоны и характеризующийся чередованием озеровидных расширений (чётков) и узких протоков, предопределяет особый термический, водный и ледовый режим реки, приводящий к сезонной смене периодов перемешивания и стратификации водной толщи в чётках, наличию в них зимой напорной незамерзшей воды, возникновению ледовых бугров, образованию локальных подрусловых таликов. Несмотря на наличие под чётками талых отложений, в настоящее время термокарст не играет существенной роли в их формировании из-за невысокой льдистости подстилающих пород. Максимальные расходы половодья проходят по льду, поэтому расширение и углубление чётков водным потоком возможно лишь при прохождении высоких расходов воды на заключительном этапе половодья после вытаивания льда в русле или в период паводков. Значимыми механизмами современного углубления и расширения чётков могут быть многократно повторяющиеся выдавливание и последующий вынос взвешенных веществ и донных осадков под действием криостатического напора при промерзании русла, а также напряжения, возникающие на контакте льда и грунта при замерзании, приводящие к разрушению берегов.

*Ледовые процессы, русловые процессы, термический режим русла, подрусловые талики, криостатическое давление, криогенные процессы, Лена-Вилюйское междуречье*

**CONDITIONS AND PROCESSES OF FORMATION OF A BEADED CHANNEL  
OF A SMALL RIVER IN PERMAFROST, SHESTAKOVKA RIVER, CENTRAL YAKUTIA****A.M. Tarbeeva<sup>1</sup>, L.S. Lebedeva<sup>2</sup>, V.S. Efremov<sup>2</sup>, I.V. Krylenko<sup>1</sup>, V.V. Surkov<sup>1</sup>, V.V. Shamov<sup>2,3</sup>, T.N. Lutsenko<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia;  
[amtarbeeva@yandex.ru](mailto:amtarbeeva@yandex.ru)<sup>2</sup>Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 36, Merzlotnaya str., Yakutsk, 677010, Russia<sup>3</sup>Pacific Geographical Institute, FEB RAS, 7, Radio str., Vladivostok, 690041, Russia

Observations over the thermal regime of soils, formation and destruction of river ice were carried out, the hydrological characteristics were obtained and the geological structure of a small river in Central Yakutia was investigated in order to identify the processes forming the beaded shape of the river channel. This type of a channel is widespread in permafrost regions, characterized by alternation of the channel extensions, 'beads', and narrow runs, predetermining the specific thermal, water and ice regime of the river, which leads to alternation of the periods of mixing and stratification of the water, to the presence of pressured unfrozen water in winter, and the appearance of ice mounds and local underwater taliks. Despite the presence of thawed sediments under the channel, thermokarst does not play a significant role in the modern formation of the beads due to the low ice content in the underlying sediments. The maximum water discharges flow above the ice cover, so the expansion and deepening of the pools by the water flow is possible only when anomalously high flow events occur after thawing of ice in the channel. Significant mechanisms of modern deepening and widening of the beads can consist in repeated extrusion and subsequent removal of suspended matter and bottom sediments under cryostatic pressure during freezing of the channel, as well as stresses that occur on the ice-ground contact during freezing, leading to destruction of the banks.

*River ice processes, channel processes, thermal regime of a river channel, river taliks, cryostatic pressure, cryogenic processes, Lena-Vilyui interfluvium*

## ВВЕДЕНИЕ

Мерзлота воздействует на реки криолитозоны, изменяя их гидрологический режим, морфологию и деформации русла [Коржуев, 1964; Арз, 1985; Зайцев, Тананаев, 2008; Scott, 1978; McNamara, Kane, 2009; Woo, 2012]. Между тем механизмы этого влияния исследованы недостаточно. Чётковидные русла малых рек (англ. *beaded streams*), состоящие из чередующихся глубоких озеровидных расширений (чётков, англ. *beads*) и соединяющих их узких и мелких протоков, – результат этого воздействия. Они встречаются в холодных зонах всюду, составляя до половины длины речной сети бассейнов [Arp et al., 2015] и образуя специфический тип русел малых рек [Тарбеева, 2018]. Чётковидные русла регулируют сток воды, служат местами зимовки и путями миграции водной фауны, воды в них имеют своеобразный химический состав [Губарьков, Лейбман, 2010; Тарбеева и др., 2016a; Oswood et al., 1989; Merck et al., 2011; Arp et al., 2015]. Вопрос о происхождении чётковидных русел в криолитозоне сейчас дискутируется. Многие исследователи [Термоэрозия..., 1982; Губарьков, Лейбман, 2010; Тарбеева, Сурков, 2013; Hopkins et al., 1955; Washburn, 1979; Woo, 2012; Arp, 2015] объясняют такую форму русла термокарстом (термоэрозией), т. е. вытаиванием льдов в узлах полигональной решетки. Термокарст и термоэрозия, по многочисленным фактам, не единственная причина их образования. Подобные реки текут и в районах, где льдистость грунтов мала, а полигонально-жильные льды отсутствуют. Размеры чётков коррелируют с порядком водотока, но не с размерами мерзлотных полигонов [Тарбеева, 2018]. Малые чётковидные реки существуют и в теплых природных зонах [Тарбеева и др., 2016b]. А.А. Григорьев [1927] объясняет такую форму русла неравномерным размывом мерзлых и талых грунтов, С.С. Воскресенский [1962] – сохранившимися от теплых эпох плесами.

Чтобы установить процессы, происходящие в чётковидном русле и способствующие сохранению или разрушению его формы, были проведены исследования на р. Шестаковка – левом притоке р. Лены в 20 км юго-западнее Якутска (рис. 1). Бассейн реки хорошо изучен [Бойцов, 1985; Варламов и др., 2017], здесь находятся мерзлотно-гидрогеологический полигон Института мерзлотоведения СО РАН “Чабыда” и гидрологический пост “Камырдагыстах” (наблюдения ведутся с 1951 г., площадь водосбора 170 км<sup>2</sup>). Детально изучалась р. Левая Шестаковка – основная составляющая водотока, с площадью водосбора 90 км<sup>2</sup>, наименее затронутая хозяйственной деятельностью.

## ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ ТЕРРИТОРИИ

Бассейн верхнего течения р. Шестаковка – возвышенная (абс. высота 200–300 м) холмистая

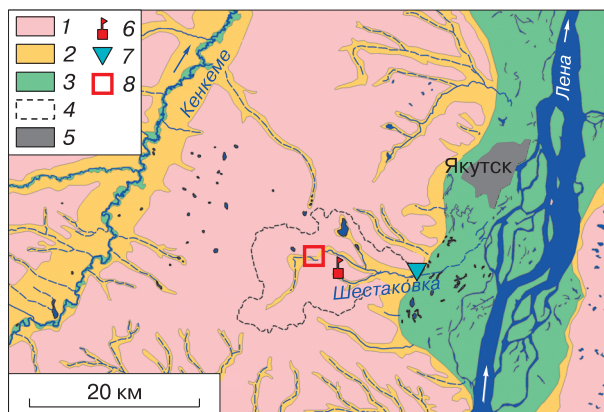


Рис. 1. Расположение бассейна р. Шестаковка на геоморфологической схеме:

1 – междуречья, представленные высокими террасами р. Лены [Соловьев, 1959]; 2 – склоны долин; 3 – днища долин; 4 – граница водосбора р. Шестаковки; 5 – застроенные территории; 6 – автоматическая метеостанция; 7 – гидрологический пост “Камырдагыстах”; 8 – ключевой участок исследований.

равнина (цокольные высокие левобережные террасы Лены), песчаная с эоловым рельефом [Филиппов, Васильев, 2006]. Характерный для Центральной Якутии аласный рельеф в данном районе не отмечается [Соловьев, 1959]. Климат района – резко континентальный с жарким коротким летом (средняя температура июля 18,7 °С) и семимесячной (октябрь–конец апреля) суровой зимой (средняя температура января –42,6 °С). Годовое количество осадков 245 мм (данные по Якутску за 1950–2015 гг.). Мощность многолетнемерзлых пород в бассейне реки достигает 500 м, глубина сезонного протаивания – от 0,5 м в заболоченных понижениях и листовенных марях до 4 м на покрытых сосняками междуречьях [Варламов и др., 2017]. Для склонов, занятых сосновым лесом, характерны надмерзлотные субаэральные талики [Шепелев, 2011; Лебедева и др., 2019].

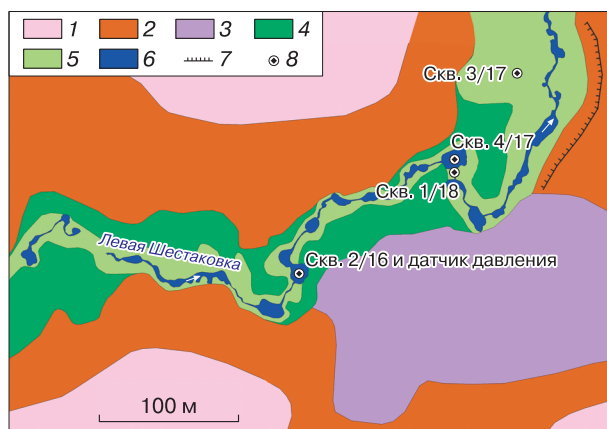
Среднемноголетний годовой слой водного стока Шестаковки у гидропоста “Камырдагыстах” – 24 мм. Половодье длится с начала мая по конец июня; подъем уровней резкий – на 1,4–2,2 м, снижение плавное. Средний максимальный расход половодья 2,8 м<sup>3</sup>/с. Водный режим изменчив: максимальные расходы воды, наблюдаемые в паводки, достигали 18 м<sup>3</sup>/с (июнь 1984 г.), в половодье – 13 м<sup>3</sup>/с (май 2007 г.), в маловодные годы максимальные расходы соответствуют меженным 0,05 м<sup>3</sup>/с (1987 г.). В 2016–2018 гг. половодье было ниже среднего. В наиболее многоводном 2017 году максимальный расход половодья составил 1,8 м<sup>3</sup>/с, что ниже среднего на 50 %. С ноября по март река перемерзает.

## СОСТАВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2015–2018 гг. исследовались морфология и условия формирования русла Левого Шестаковки. В зимний период проводилось бурение льда в чётках и сужениях русла, где изучались состояние донного грунта, строение и мощность прослоев льда, наличие подо льдом воды. В подледной воде измерялась температура, минерализация, pH и содержание растворенного кислорода с помощью системы контроля качества воды YSI Professional Plus.

В долине Левого Шестаковки была пробурена серия геологических скважин (10–20 м). В трех из них, расположенных на пойме, в чётке и сужении русла (3/17, 4/17 и 1/18, см. рис. 2), измерялась температура грунта, были установлены калиброванные датчики DL18B20 с шагом 0.5–1.0 м, точность измерения которых составляет  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

В 2016 г. на дне одной из крупных чёток (длиной 14 м, шириной 12 м и глубиной 2.5 м) был установлен самописец давления (уровней) и температуры воды (Keller DCX-18 ECO), который оставался в русле круглогодично (см. рис. 2). Вводилась поправка на атмосферное давление (измеренное автоматической метеостанцией НОВО Microstation, установленной на лесистом междуречье в 6 км от долины реки, см. рис. 1). Для отслеживания ледовых явлений были установлены автоматические фотокамеры Falcon Eye FE AC100. Регистрация параметров на них производилась каждые 3 часа. Расходы воды измерялись вертушкой ГР-55 на гидрометрическом створе, оборудованном несколько ниже ключевого участка.



**Рис. 2. Геоморфологическая схема ключевого участка р. Левая Шестаковка и расположение скважин:**

1 – междуречья, представленные Маганской террасой р. Лены [Соловьев, 1959; Варламов и др., 2017], переработанной эоловыми процессами; 2 – склоны; 3 – склоновая марь; 4 – высокая пойма; 5 – низкая пойма; 6 – русло; 7 – склоновая наледь; 8 – скважины и их номера.

Радиоуглеродное датирование образцов торфа из скважин проводилось радиометрическим методом в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН. В статье приводятся некалиброванные радиоуглеродные даты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Морфология долины и русла.** Долина р. Левая Шестаковка врезана на 8–10 м в волнистую поверхность древней песчаной террасы; склоны долины крутые выпуклые. Плоское дно на коротких участках сужается до 30 м, расширения (150–600 м) заняты кочкарными болотами и лесокустарниковой поймой. Русло в верховьях не выражено, оно появляется ниже очередного заболоченного расширения долины, чуть выше ключевого участка (см. рис. 2). Площадь водосбора здесь составляет 80 км<sup>2</sup>.

На ключевом участке пойма ступенчатая. Низкая (0.2–0.6 м) прирусловая ступень занята кустарниками (преимущественно ивой), высокая ступень (1.0–1.4 м) поросла березовым и сосново-лиственничным лесом. Расширения долины заняты осокой или кустарником, подстилаемым торфом мощностью до 0.5 м. Пойменный аллювий – мелко-среднезернистые пески и супеси с прослоями торфа.

Чётки, округлой, но чаще овальной формы, имеют ширину 7–12 м при длине до 12–18 м, глубина их 1.5–3.5 м. Соединяющие протоки (длиной 5–40 м) щелевидные, имеют ширину 0.5–1.5 м и глубину 0.5 м, часто расширяются в нижней части. Средние уклоны в сужениях русла 3–7 ‰, в чётках практически нулевые. Русло имеет коленообразные изгибы, вероятно, обусловленные морозобойным растрескиванием.

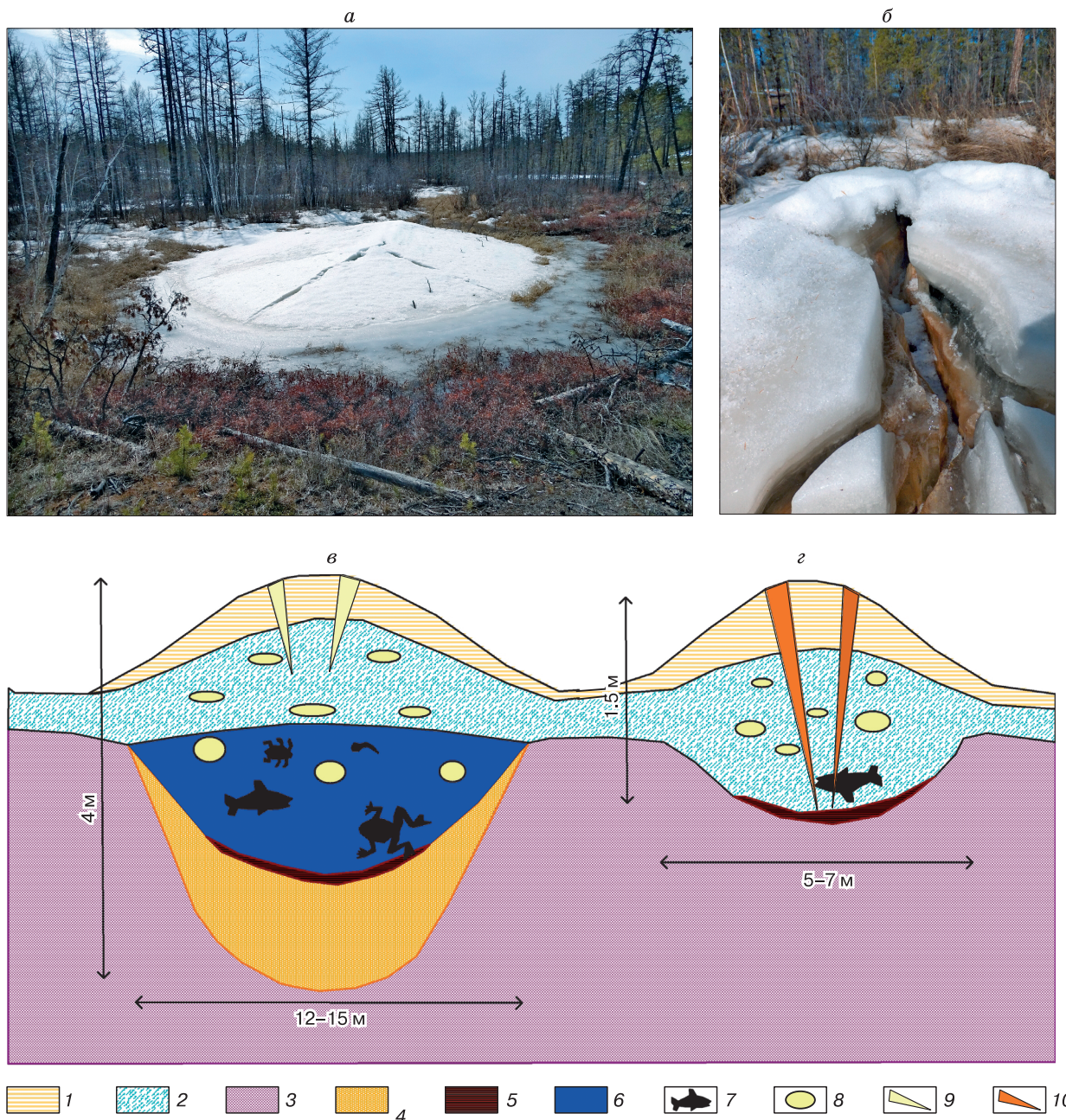
Ниже ключевого участка высота поймы постепенно возрастает до 2.0–2.5 м, низкая ивняковая пойма сужается. Чётки мелеют и становятся вытянутыми, их ширина уменьшается до 5–7 м, глубина – до 1.5 м, они чаще приурочены к вершинам излучин, напоминая расположением обычные плесы меандрирующего русла. Сужения же русла, напротив, становятся шире. При выходе потока из сужений русла в чётки нередко образуются песчаные аккумулятивные формы. По-видимому, это обусловлено большими уклонами и расходами воды, увеличивающими мощность водного потока вниз по течению. Обмеление чёток может быть связано как с аккумуляцией в них наносов, так и с их спуском врезающимся потоком, а, возможно, и с затуханием процессов, приводящих к их образованию. В 8 км от ключевого участка чётковидное русло окончательно сменяется врезанным, относительно прямолинейным или извилистым. Таким образом, Левая Шестаковка имеет чётковидное русло только в верхнем течении, при сочета-



нии относительно небольших уклонов и расходов воды и наносов.

*Характеристика зимнего состояния русла.* Зимой р. Левая Шестаковка замерзает. Высота снега над льдом 25–30 см, что меньше, чем на склонах и междуречье (30–50 см). В сужениях русло запол-

нено льдом полностью, и грунт под ним мерзлый. В чётках к концу зимы вырастают ледовые купола высотой до 0.5 м и диаметром 10–15 м (рис. 3); толщина льда в них колеблется от 80 до 160 см. Подо льдом наиболее крупных куполов сохраняются линзы напорной воды глубиной 2–3 м (см.



**Рис. 3. Промёрзшие и непромерзшие чётки.**

*a* – ледовый купол на месте непромерзшей чётки (фото А.М. Тарбеевой); *б* – рыжевато-бурый лед заполнения трещины в промерзшей чётке (фото Т.Н. Луценко). Схематичный продольный профиль чётковидного русла в зимний период с непромерзшей большой чёткой (*а*) и промерзшей малой чёткой (*б*): 1 – лед слоистый желтый; 2 – лед прозрачный; 3 – многолетнемерзлые породы; 4 – талые породы; 5 – растительные остатки; 6 – вода; 7 – водные организмы (жуки, лягушки, пиявки, рыбы); 8 – пузыри газа; 9 – трещины во льду, заполненные мутным льдом; 10 – трещины во льду, заполненные рыжевато-коричневым льдом с большим количеством взвеси.



рис. 3, в). Своды ледовых бугров разбиты радиальными трещинами шириной 5–15 см, обусловленными криостатическим напором.

Лед в русле двухслойный. Верхняя его часть натечная – слоистая, мутная, желтоватая с прослоями лиственничной хвои на нижней границе, что говорит о многократном излиянии воды на поверхность льда под снегом. Натечный лед в сужениях русла немного тоньше (5–15 см), чем в чётках (15–50 см). Под мутным натечным залегает прозрачный речной лед, который в чётках существенно толще (60–120 см), чем в сужениях русла (20–50 см). В нем заметны замороженные пузыри газа, возникшие при разложении органических остатков и жизнедеятельности водных организмов. Трещины частично заполнены мутным льдом.

При бурении лунок в начале апреля из-под ледяных куполов под напором изливается рыжевато-бурая вода, ее температура составляла  $-0.6...+0.6^{\circ}\text{C}$ , содержание кислорода 0.27–0.30 мг/л, pH 5.5–6.5. Минерализация подледной воды изменялась в больших пределах – от 74 до 919 мг/л. Излияние воды сопровождалось выходами биогенного газа, иногда в течение часа. Фонтанами воды из лунок нередко выбрасывало гольянов, жуков-плавунцов, лягушек, пиявок, все они были живыми и активно двигались.

Дно чётко выстилается мелко-среднезернистыми хорошо отмытыми сизовато-серыми кварцевыми песками, иногда перекрытыми маломощным (не более 5–10 см) слоем слабо разложившихся растительных остатков. Под самыми большими чётками вскрыты талики мощностью 1.3 и 3 м (скважины 2/16 и 4/17).

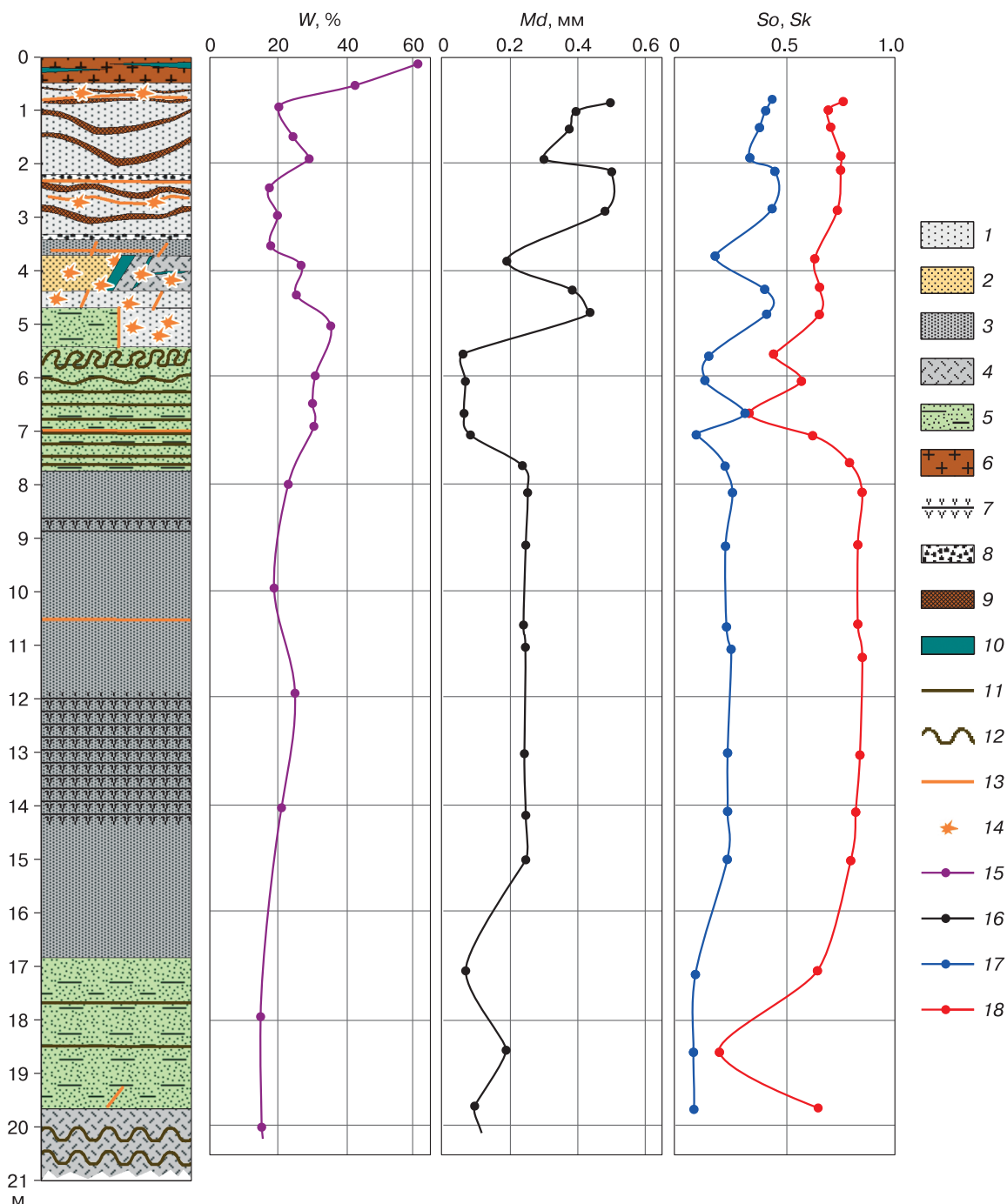
Небольшие чётки промерзают полностью, над ними также образуются ледовые купола меньшего диаметра и высоты, но часто с большей (до 160 см) мощностью льда, подстилаемого мерзлым грунтом (см. рис. 3, г). Трещины в таких куполах иногда заполнены льдом ярко-рыжего цвета (см. рис. 3, б), последнее связано с выдавливанием при перемерзании из придонных слоев наиболее минерализованной воды с большим количеством (до 480 мг/л) взвеси. Малые промерзшие до дна чётки преобладают ниже по течению от ключевого участка, где возрастают уклоны дна долины и увеличивается глубина врезания русла.

Таким образом, специфическими особенностями чётков зимой являются наличие незамерзшей напорной минерализованной воды, талых отложений в днищах и существенное давление, возникающее подо льдом в чётке при промерзании прилегающих участков русла и деятельного слоя на пойме. Оно периодически сбрасывается при растрескивании бугров, при этом изливается подледная вода вместе со взвешенными веществами. Дно чётков не заилено, что может свидетельствовать о продолжающемся процессе их углубления.

*Геологическое строение дна долины.* Геологическое строение дна долины изучалось по 20-метровой скважине 3/17, расположенной в центральной части расширения долины на высоте около 0.5 м над меженным урезом воды. По скважине отслеживались гранулометрический состав и льдистость пород, выявлялась возможность развития термокарста.

По данным бурения, дно долины до глубины 20 м сложено мерзлыми песками и супесями (рис. 4). Полуметровый деятельный слой состоит из торфа с прослоями и линзами льда мощностью до 3 см. С глубины 0.33–0.4 м по торфу получена радиоуглеродная ( $^{14}\text{C}$ ) датировка  $130 \pm 50$  лет назад (IGAN-5930), т. е. торф имеет современный возраст. Ниже, до глубины 5 м залегают среднезернистые слоистые пески, сизовато-серые, местами ожелезненные. В песках встречаются вертикальные, наклонные и горизонтальные шпильки льда толщиной до 2 см, а также прослой торфа, наиболее мощные и частые в верхних 3 метрах. На глубинах 5–7 м преобладают пылеватые супеси. В интервале 2.5–6.5 м отмечается смятие слоев в мелкие складки, их вертикальные смещения и другие деформации и изменения текстуры. Из прослоев торфа получены следующие радиоуглеродные датировки: с глубины 2.59–2.63 м –  $1630 \pm 60$  лет назад (IGAN-5931), с глубины 2.65–2.75 м –  $1510 \pm 60$  лет назад (IGAN-5932), с глубины 2.80–2.83 м –  $1510 \pm 70$  лет назад (IGAN-5933). Близкие значения и инверсии полученных датировок в интервале 2.59–2.83 м подтверждают наличие в прошлом активных криотурбаций этой части толщи.

В нижней части разреза (с 8 до 15 м) вновь залегают пески мелкозернистые, горизонтально-слоистые, однородные, хорошо сортированные с массивной криотекстурой, ниже отметки 15 м переходящие в алевритистые супеси. Коренные породы (горизонтально-слоистые серые мелкозернистые песчаники) предположительно достигнуты скважиной 3/17 в забое и вскрыты скважиной 4/17 на глубине 12 м. Верхняя 5-метровая пачка среднезернистых ожелезненных песков с прослоями торфа предварительно интерпретируется как голоценовые аллювиальные отложения р. Левая Шестаковка, при этом верхняя ее часть, слагающая поверхность низкой поймы, позднеголоценовая. Нижняя граница аллювиальных отложений р. Левая Шестаковка маркируется в скв. 1/18 на глубине 4.5 м прослоем крупнозернистого песка с гравием. Подстилающие породы (алевритистые супеси и хорошо сортированные мелкозернистые пески) имеют, предположительно, золотое происхождение и доголоценовый возраст. По фондовым данным Института мерзлотоведения СО РАН, песчаники, вскрывающиеся скважинами в районе Чабыдинского стационара, имеют юрский возраст.



**Рис. 4. Геологический разрез многолетнемерзлых пород по скважине 3/17 на низкой левобережной пойме в расширении долины р. Левая Шестаковка.**

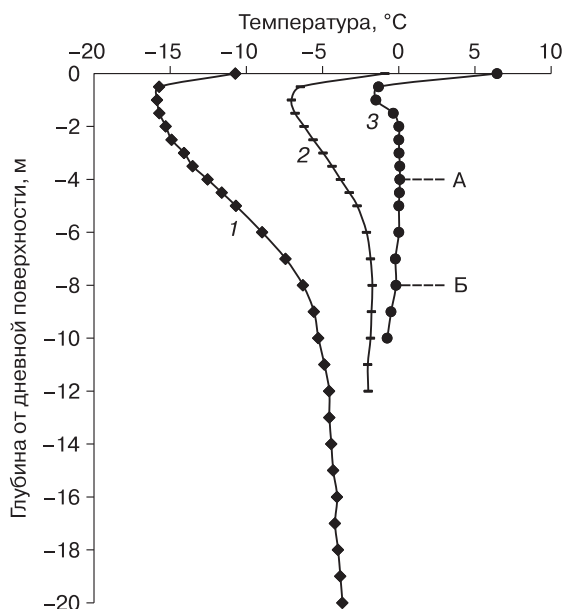
Состав отложений: 1 – песок среднезернистый сизовато-серый; 2 – песок мелкозернистый рыжевато-бурый; 3 – песок тонко-мелкозернистый сизовато-серый; 4 – песок пылеватый сизовато-серый; 5 – супесь алевитистая сизовато-зеленоватая; 6 – торф. Текстуры (вне масштаба): 7 – субгоризонтальные тонкие (1–5 мм) прослои растительных остатков; 8 – прослои песка крупнозернистого с гравием, хорошо промытого; 9 – прослои торфа мощностью от 1 до 10 см; 10 – вертикальные, наклонные и горизонтальные прослои и линзы льда мощностью 0.5–3 см; 11 – прослои суглинка мощностью 0.5–2 см, обогащенного органическим веществом, субгоризонтальные; 12 – прослои суглинка мощностью 0.5–2 см, обогащенного органическим веществом, деформированные в складки; 13 – ожеженные прослои; 14 – пятна ожежения. Графики зависимостей: 15 – весовая влажность (льדיстость) отложений в % воды от сухой части образца ( $W$ ); 16 – медианный диаметр частиц ( $Md$ ); 17 – квартильный коэффициент сортировки ( $So$ ); 18 – квартильный коэффициент асимметрии ( $Sk$ ) [Шванов, 1969]. Весовая влажность (льдистость) определена В.С. Ефремовым. Гранулометрический анализ выполнен аэрометрическим и ситовым методами в лаборатории ИМЗ СО РАН Ю.Г. Слепцовой и А.Л. Лобановым.



Весовая влажность (льדיстость) отложений в верхних 8 метрах сильно варьирует и в среднем составляет 20–40 %, вниз по разрезу она снижается до 15–20 % (см. рис. 4). За счет льда на поверхности грунта и крупных (до 3 см) прослоев льда в торфе льдиность деятельного слоя весьма высокая. Таким образом, деятельный слой является сильнольдистым, до глубины 8 м породы преимущественно льдистые, ниже – слабольдистые. Крупных ледовых тел в днище долины ни в одной из скважин не выявлено.

**Температура грунтов.** Грунт под чётками гораздо теплее, чем на прилегающих участках. Среднегодовая температура грунта на глубине 10 м на пойме (скв. 3/17) составляет  $-5.2^{\circ}\text{C}$ , в чётке (скв. 4/17) равна  $-0.85^{\circ}\text{C}$ , в сужении русла (скв. 1/18) – около  $-2^{\circ}\text{C}$ . В середине апреля, в момент наибольшего промерзания грунтов, непосредственно под ложем чётки донные отложения талые и теплее окружающих пород на  $12.5^{\circ}\text{C}$  (рис. 5), а на глубине 10 м разница температур под чёткой и поймой составляет  $6^{\circ}\text{C}$ . Температуры грунта в сужениях русла отрицательные, хотя и выше, чем на пойме (скв. 1/18). Летом грунт под сужениями русла протаивает на глубину до 1 м. Под чёткой (скв. 4/17) нижняя граница талика располагается на глубине 8 м от уреза и существенно не изменяется в течение года.

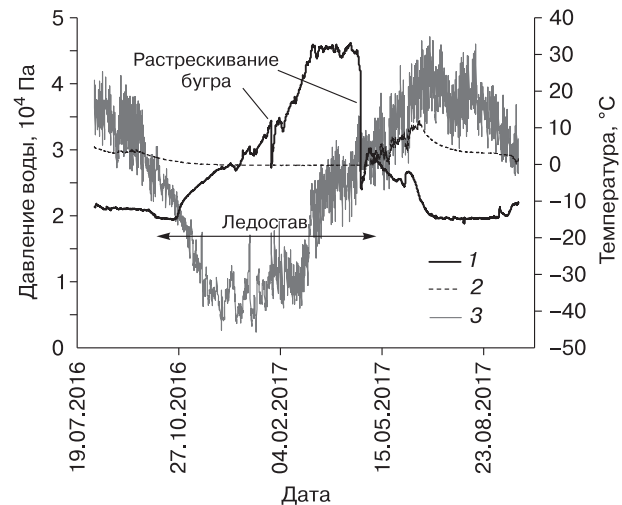
**Водный и термический режим реки, особенности прохождения половодья.** Значения давления,



**Рис. 5. Распределение температур по глубине в скважинах на пойме, в сужении русла и в чётке на р. Левая Шестаковка на 12.04.2018 г.:**

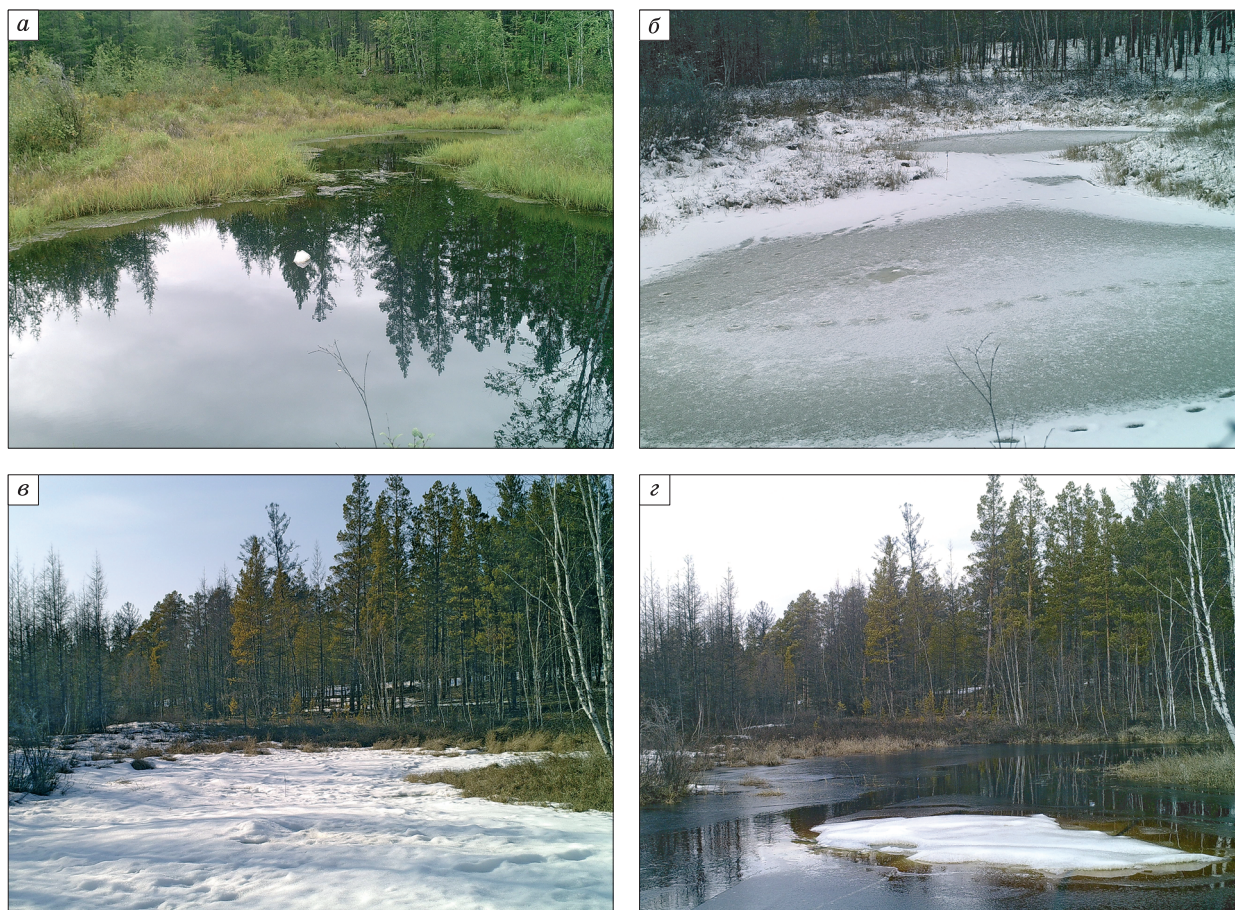
1 – скв. 3/17 на низкой пойме; 2 – скв. 1/18 в сужении русла; 3 – скв. 4/17 в чётке; А – уровень дна в чётке; Б – нижняя граница талика в чётке.

полученные с датчика, установленного на дне одной из чётки, в период с середины августа до 26 октября отражают ход уровня воды (рис. 6). (Давление в  $10^4$  Па приблизительно соответствует глубине воды над датчиком в метрах в период открытого русла.) В этот период фиксируется постепенное снижение уровней одновременно с уменьшением температуры придонной воды (см. рис. 6, 7, а). В конце сентября с переходом температуры воздуха через  $0^{\circ}\text{C}$  сток воды с водосбора прекратился, часть воды перешла в ледовый покров, в связи с чем уровень воды (и, соответственно, давление) снижались более резко. Фотокамеры 27 октября зафиксировали выходы воды вдоль берегов, которая растекалась по поверхности речного льда, образуя наледь (см. рис. 7, б). Это было связано с оседанием льда и появлением трещин вдоль контакта льда и грунта, через которые часть воды изливалась на поверхность льда и вновь замерзала. Но после 27 октября, когда температура воздуха достигла  $-14...-17^{\circ}\text{C}$ , в замерзшей чётке фиксировалось резкое повышение давления. Это объясняется формированием сплошного ледового покрова на реке и перемерзанием русла в сужениях: вода в чётке оказывается зажатой со всех сторон интенсивно промерзающим водонасыщенным грунтом деятельного слоя на пойме, по периферии русла, а также прирастающим вниз ледовым покровом, которые увеличиваются в объеме при замерзании. Лишь снизу не наблюдается существенного изменения положения фронта промерзания, так как под дном расположен талик глубиной 1.3 м, под-



**Рис. 6. Совмещенные графики изменения температуры воздуха, температуры и давления воды в придонном слое чётки на р. Левая Шестаковка в 2016–2017 гг. (расположение датчика см. на рис. 2).**

1 – давление воды в придонном слое; 2 – температура воды в придонном слое; 3 – температура воздуха на автоматической метеостанции.



**Рис. 7. Последовательные снимки русла р. Левая Шестаковка с фотоловушка (в районе установки автоматического датчика давления и температуры, скв. 2/16 на рис. 2):**

*а* – открытое русло, 18.08.2016 г.; *б* – выход воды на лед, 27.10.2016 г.; *в* – русло в момент снятия давления с ледового купола (см. линию 1 на рис. 6), 24.04.2017 г.; *г* – обтекание вершины купола водами половодья, 30.04.2017 г.

стилаемый мерзлыми породами с достаточно высокими ( $-0.85^{\circ}\text{C}$ ) температурами. Температура воды в придонном слое при этом снижается до  $0^{\circ}\text{C}$  и держится на этой отметке в течение всей зимы.

Интенсивный рост давления воды подо льдом в чётке продолжался до 26 января, с понижением температуры воздуха до  $-30\ldots-40^{\circ}\text{C}$ . Давление приводит к постепенной пластической деформации льда и росту ледового купола над центром чётки. Ледовый купол 26 января треснул и часть воды излилась на поверхность, что выразилось в резком падении кривой давления на рис. 6. После этого в течение 5 дней давление восстановилось до прежних значений и продолжало расти до 8 марта. В начале марта температура воздуха повысилась до  $-10\ldots-15^{\circ}\text{C}$  с тенденцией к дальнейшему росту, давление в чётке стабилизировалось на значении  $4.5\cdot 10^4$  Па, т. е. промерзание деятельного слоя и увеличение мощности ледового покрова прекра-

тились. Отметим, что такое давление примерно эквивалентно весу столба воды высотой 4.5 м, при этом высота ледового бугра в 2017 г. в исследуемой чётке составляла всего 30 см. Давление воды в русле до начала ледостава составляло около  $2\cdot 10^4$  Па, что соответствует глубине 2 м.

24 апреля среднесуточная температура воздуха уже поднялась выше  $0^{\circ}\text{C}$ , но река еще находилась под снегом, ледовый купол раскололся, учитывая отсутствие других видимых причин, вероятно, за счет термического расширения льда (см. рис. 7, *в*). Разрушение купола сняло избыточное давление, вдоль берегов появилась излившаяся застойная красновато-бурая вода. Сток воды по руслу начался позже (28 апреля), и последующий подъем давления был связан уже с ростом глубины воды над датчиком при увеличении расходов и уровней воды в половодье.

В начале половодья вода течет поверх речного льда, по периферии сохранившихся ледовых купо-



лов (см. рис. 7, з). При дальнейшем повышении уровней воды ледовые купола оказываются полностью затопленными. Лед сохраняется в русле в течение двух-трех недель после начала половодья, предохраняя талое дно чётки от размыва. Максимальный измеренный в 2017 г. расход воды в верхнем течении наблюдался 3 мая и составил  $0.944 \text{ м}^3/\text{с}$ , скорости течения в сужениях русла превышали  $1 \text{ м/с}$ , но в реке сохранялись значительные массы затопленного и примерзшего к берегам льда. Подъем уровня воды на пике половодья на разных участках реки составил  $0.7\text{--}1.0 \text{ м}$ . Начало повышения температуры придонной воды в чётке произошло одновременно с достижением пика уровня воды 3–4 мая, когда началось перемешивание воды, текущей по поверхности льда, с водой, законсервированной внутри ледового купола.

Интересен значительный рост температуры воды в придонном слое чётки на спаде половодья. 21 июня 2017 г. она достигла максимального за год значения  $+12.1 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. рис. 6). При этом суточный ход температуры придонной воды отражал изменения температуры воздуха, что свидетельствует об интенсивном перемешивании воды в чётках при больших (до  $1 \text{ м/с}$ ) скоростях течения. В межень (с конца июня) со снижением расходов воды до  $0.05\text{--}0.06 \text{ м}^3/\text{с}$  в чётках начинается резкое падение температуры придонной воды до  $+3.0\text{...}+3.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , даже несмотря на продолжающийся рост температуры воздуха. Прекращается суточный ход температуры придонной воды. Следовательно, при снижении расходов и скоростей течения воды до меженных в чётках ослабевает или прекращается перемешивание воды и усиливается стратификация водной толщи, т. е. устанавливается озерный режим. Поверхностные слои воды хорошо прогреваются, достигая в июле–августе  $+15\text{...}+16 \text{ }^\circ\text{C}$  на глубине  $0.2 \text{ м}$ , температуры придонной воды не превышают  $+3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расходы воды в летнюю межень крайне малы ( $0.005\text{--}0.02 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Таким образом, термический режим свидетельствует об активном перемешивании воды в чётках после таяния ледового покрова в конце половодья и о застойном режиме в межень. Среднегодовые температуры воды в придонном слое чётки положительны и по наблюдениям 2016–2017 гг. составили  $+1.9 \text{ }^\circ\text{C}$ , при отрицательной средней температуре воздуха за тот же период значения равны  $-7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Максимальные придонные температуры воды наблюдаются в конце половодья и достигают  $+12 \text{ }^\circ\text{C}$ , что влияет на термический режим подстилающих пород, обуславливает сохранение таликов. Несмотря на то что в чётках круглый год сохраняются талые породы, максимальные расходы воды в половодье не оказывают существенного влияния на размыв дна, так как проходят по поверхности льда.

## ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЧЁТКОВИДНОГО РУСЛА

Чётковидные русла широко распространены в криолитозоне, в том числе в Центральной Якутии. Они характерны для рек первых порядков с относительно небольшими уклонами, стоком воды и наносов и переходят в “нормальные” меандрирующие русла вниз по течению.

Своеобразное строение чётковидных русел – наличие глубоких расширений, разделенных узкими и мелководными протоками, – обуславливает специфический термический режим этих рек, в результате которого их русла существенно теплее пойм. Несмотря на суровые климатические условия Центральной Якутии и малые размеры рек, благодаря озерному типу водного режима при промерзании и хорошему перемешиванию воды в начале лета, в чётках фиксируется положительная среднегодовая температура в придонном слое, а зимой сохраняется незамерзшая вода, что способствует существенному растеплению подстилающих горных пород и образованию подрусовых таликов.

Положительные температуры горных пород под чётками вполне могут приводить к их углублению за счет термокарста. Этот процесс, вероятно, является одним из ведущих при формировании чётки в условиях распространения сильнольдистых многолетнемерзлых пород. Однако отсутствие значительных объемов подземных льдов и неглубокое залегание коренных пород под руслом р. Левая Шестаковка исключают термокарст из основных современных процессов формирования чётки, хотя возможно его наличие в прошлом.

Незамерзшая напорная вода обнаружена зимой в расширениях чётковидных русел рек арктического побережья Аляски [Arp et al., 2015]. Она, вероятно, остается в расширениях русел и других чётковидных рек криолитозоны. На реках Центральной Якутии промерзание чётки приводит к образованию ледовых куполов, чего не выявлено на Аляске, возможно, из-за более мощного снежного покрова в руслах, заполняемых метелевым переносом снега [Тарбеева, Арп, 2018; Arp et al., 2015], под которым их наличие просто трудно установить, либо благодаря меньшей мощности деятельного слоя и, соответственно, меньшему объему промерзающих пород. В окрестностях Якутска ледовые купола небольшой высоты, но большой площади наблюдались авторами и в русле более крупной меандрирующей реки Кенкеме (площадь водосбора  $3550 \text{ км}^2$ ). На крыльях излучин этой реки, где ширина русла составляет  $10\text{--}15 \text{ м}$ , а глубина около  $1 \text{ м}$ , оно перемерзает, но в вершинах излучин, где расположены плесы глубиной до  $3.5 \text{ м}$ , ширина русла увеличивается до  $30\text{--}40 \text{ м}$ , сохраняется незамерзшая вода и образуются



ледовые купола высотой 20–30 см. Таким образом, неравномерное распределение глубин в русле, изначально обусловленное русловыми процессами, приводит к его неравномерному промерзанию, появлению в плёсах очагов тепла и повышенного подледного давления, формированию подрусовых таликов.

Рост ледовых бугров зимой в непромерзшем до дна русле неизбежно воздействует на его дно и берега. Наличие избыточного давления в подледной воде может оказывать влияние на уплотнение нижележащих пород, но этот процесс требует дополнительной оценки. Расширение воды при замерзании, неравномерное термическое расширение и сжатие речного льда и контактирующего с ним грунта, большие температурные контрасты, возникающие весной на контакте холодного льда с хорошо прогреваемыми береговыми откосами, приводят к возникновению напряжений по периферии ледового купола и могут способствовать дезинтеграции отложений на береговых уступах, облегчая их дальнейший размыв. Этому способствует также отклонение водного потока в сторону берегов, возникающее при обтекании ледового купола в половодье.

Для промерзающих до дна небольших чётков вероятен следующий процесс их углубления. В последней стадии их полного промерзания взвесь, содержащаяся в придонной воде, а возможно, и талый грунт со дна выдавливаются наружу через трещины во льду кристатическим напором. Об этом свидетельствует рыжевато-бурый цвет ледяных жил, заполняющих трещины ледовых бугров над промерзшими до дна чётками (см. рис. 3, б). При таянии льда этот материал не оседает на дно, а выносится потоком половодья. Объёмы его невелики, но многократное повторение процесса постепенно углубляет и расширяет чётку на начальном этапе, когда она полностью промерзает к концу зимы.

Учитывая существенную разницу в размываемости мерзлых и талых песков [Достовалов, Кудрявцев, 1967], талики в чётках и промерзшие сужения русла в половодье могут способствовать его неравномерному размыву и поддержанию чётковидной формы. Бóльшая площадь поперечного сечения русла на непромерзающих участках рек по сравнению с промерзающими до дна отмечалась на реках Аляски [Best et al., 2005]. Но максимальные расходы воды обычно проходят по льду, который предохраняет талое дно чётков от размыва. Поток половодья со средними максимальными расходами воды около  $1 \text{ м}^3/\text{с}$ , характерный для рек первого-второго порядков, не обладает достаточной мощностью для размыва дна в чётках глубиной 2–4 м. Реки криолитозоны имеют существенную межгодовую изменчивость стока, и образование глубоких чётков может происходить при

прохождении выдающихся расходов воды редкой обеспеченности. Их углубление возможно в заключительную фазу половодья или в паводки, максимальные из которых на малых реках превышают максимальные расходы половодья. Образование чётков могло происходить и в иных климатических условиях в прошлом, как указывал С.С. Воскресенский [1962]. На снижение руслоформирующей деятельности современного водотока р. Левая Шестаковка косвенно указывает и сравнительно узкая полоса молодой низкой поймы по сравнению с шириной более древней редко затапливаемой высокой поймы. Однако наличие на дне чётков песка и отсутствие наилок говорят в пользу продолжающегося процесса их углубления.

Таким образом, полученные авторами данные раскрывают сложные взаимосвязи многообразных процессов, возникающих в связи с чётковидной формой русла. И все же, вопрос о механизме формирования чётковидных русел, по крайней мере применительно к р. Левая Шестаковка, пока остается открытым.

## ВЫВОДЫ

1. Морфология чётковидного русла предопределяет особый термический, водный и ледовый режим реки, приводящий к наличию в зимний период в чётках напорной незамерзшей воды, возникновению ледовых бугров, образованию локальных подрусовых таликов, а также к чередованию периодов хорошего перемешивания и стратификации водной толщи. Этот режим имеет большое значение и для зимовки водных организмов.

2. Формирование чётковидного русла является многофакторным процессом с положительными обратными связями. Вклад разных процессов в углубление и расширение чётков, вероятно, различается в зависимости от природных условий.

3. В районах с высокой льдистостью пород термокарст может стать основным механизмом углубления и расширения чётков. Однако в связи с невысокой льдистостью подстилающих пород термокарст в настоящее время не играет существенной роли в углублении чётков р. Левая Шестаковка, при этом не исключено его влияние в прошлом.

4. Углубление чётков водным потоком возможно только при прохождении высоких расходов воды в дождевые паводки или в конце половодья после вытаивания льда в русле, так как максимальные расходы половодья малых рек проходят по льду, препятствующему размыву дна. Для выяснения этого вопроса необходимы наблюдения за стоком наносов.

5. Расширению чётков могут способствовать напряжения на контакте льда и грунта, возникающие в результате роста куполов и неравномерного расширения и сжатия льда и грунта, приводящие к дезинтеграции грунта на берегах и облегчающие

их размыв. Вопрос о влиянии давления, возникающего в ледовых буграх, на подстилающие горные породы требует дополнительных исследований.

6. Одним из значимых современных механизмов углубления небольших чётков может быть выдавливание вверх в заключительной фазе промерзания ледового бугра взвешенных веществ и донных осадков под действием криостатического напора и их последующий вынос водами половодья.

7. Плёсы более крупных рек, образующиеся в результате русловых процессов, также нередко являются неперемежающимися участками русла, в которых возникает криогенный напор, поэтому первичное расположение чётков вполне может определяться русловой деятельностью водотока.

8. Процесс формирования чётков на р. Левая Шестаковка, по-видимому, продолжается в современный период, так как дно изученных нами чётков не заилено.

*Работы проведены по плану научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ и при поддержке РФФИ (проекты № 17-05-01287, 17-05-00217, 17-05-00926, 18-05-60036).*

## Литература

- Арз Ф.Э. Основы прогноза термоабразии берегов. Новосибирск, Наука, 1985, 172 с.
- Are, F.E., 1985. Prediction of Thermal Abrasion. Nauka, Novosibirsk, 172 pp. (in Russian)
- Бойцов А.В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1985, с. 44–55.
- Boytsov, A.V., 1985. The formation conditions and the regime of slope taliks in Central Yakutia. In: Cryohydrogeological Studies. Permafrost Institute, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Yakutsk, pp. 44–55. (in Russian)
- 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.
- Varlamov, S.P., Skachkov, Yu.B., Skryabin, P.N., 2017. The results of 35-years’ permafrost monitoring conducted at the Chabyda station (Central Yakutia). Nauka i Obrazovanie, No. 2, 34–40.
- Воскресенский С.С. Геоморфология Сибири. М., Изд-во Моск. ун-та, 1962, 340 с.
- Voskresensky, S.S., 1962. The Geomorphology of Siberia. Moscow University Press, Moscow, 340 pp. (in Russian)
- Григорьев А.А. Геоморфологический очерк Якутии. Л., Изд-во АН СССР, 1927, 52 с.
- Grigor’ev A.A., 1927. The Brief Geomorphological Description of Yakutia. Izd-vo Academy of Sciences of the USSR, Leningrad, 52 pp. (in Russian)
- Губарьков А.А., Лейбман М.О. Чёткообразные русловые формы в долинах малых рек на Центральном Ямале – результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 41–49.
- Gubar’kov, A.A., Leibman, M.O., 2010. Bead-shaped channel forms as evidence of paragenesis of cryogenic and hydrological processes in the small-river valleys of Central Yamal. Earth’s Cryosphere XIV (1), 41–49.
- Достовалов Б.Н. Общее мерзлотоведение / Б.Н. Достовалов, В.А. Кудрявцев. М., Изд-во Моск. ун-та, 1967, 403 с.
- Dostovalov, B.N., Kudryavtsev, V.A., 1967. General Permafrost Studies. Moscow University Press, Moscow, 403 pp. (in Russian)
- Зайцев А.А., Тананаев Н.И. Многолетние переформирования сложноразветвленного русла р. Лены в районе “Якутского разбоя” и влияние на них промерзания грунтов // Геоморфология, 2008, № 1, с. 25–35.
- Zaitsev, A.A., Tananayev, N.I., 2008. Multiannual dynamics of the Lena River mouth near the Yakut Robbery and the ground freezing impact. Geomorfologia, No. 1, 25–35.
- Коржув С.С. О естественной эрозии в зоне многолетней мерзлоты // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1964, № 3, с. 48–52.
- Korzhuyev, S.S., 1964. Natural erosion in the permafrost zone. Izvestiya AN SSSR, geography series [Bulletin of the USSR Academy of Sciences, geography series], No. 3, 48–52.
- Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И. и др. Надмерзлотные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 1, с. 40–50.
- Lebedeva, L.S., Bazhin, K.I., Khristoforov, I.I., et al., 2019. Suprapermafrost taliks in the continuous permafrost zone, Central Yakutia, Shestakovka river basin. Earth’s Cryosphere XXIII (1), 40–50.
- Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М., Изд-во АН СССР, 1959, 150 с.
- Soloviev, P.A., 1959. The Permafrost Zone of the Northern part of Lena-Amga Interfluv. Izd-vo Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 150 pp. (in Russian)
- Тарбеева А.М. О происхождении чётковидной формы русел малых рек криолитозоны // Геоморфология, 2018, № 1, с. 88–95.
- Tarbeeva, A.M., 2018. The origin of the beaded shape of river channels in the permafrost zone. Geomorfologiya, No. 1, 88–95.
- Тарбеева А.М., Арп К.Д. Исследования чётковидных русел малых рек на Аляске и в Сибири // Сб. докл. расшир. заседания науч. совета по криологии Земли РАН “Актуальные проблемы геоэкологии” с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. М., Унив. книга, 2018, т. 2, с. 305–311.
- Tarbeeva, A.M., Arp, C.D., 2018. A study of beaded river channels in Alaska and Siberia. In: Collection of Reports of the Extended Meeting of the Scientific Council on Earth Cryology of the Russian Academy of Sciences “Actual Issues of Permafrost” with Participation of Russian and Foreign Scientists, engineers and specialists. KDU University Book, Moscow, vol. 2, pp. 305–311. (in Russian)
- Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Лебедева Л.С. и др. Зимние процессы в чётковидном русле р. Шестаковки (Центральная Якутия) и их экологическое значение // Тр. V Всерос. конф. “Ледовые и термические процессы на водных объектах России”. М., РГАУ–МСХА, 2016а, с. 410–416.
- Tarbeeva, A.M., Krylenko, I.V., Lebedeva, L.S., et al., 2016a. Winter processes in the beaded channel of Shestakovka River (Central Yakutia) and their environmental meaning. In: Proceedings of the Fifth All-Russia Conference “Glacial and Thermal Processes in the Water Bodies of Russia”. Russian State Agrarian University–Moscow Agricultural Academy Press, Moscow, pp. 410–416. (in Russian)
- Тарбеева А.М., Крыленко И.В., Сурков В.В. Озеровидные расширения русел рек степной зоны и возможные причины их формирования (бассейн р. Урал в районе г. Орска) // Геоморфология, 2016б, № 1, с. 73–81.



- Tarbayeva, A.M., Krylenko, I.V., Surkov, V.V., 2016b. Lake-like expansions of riverbeds in the steppe zone and possible causes of their formation (by the example of the Ural River basin near the city of Orsk). *Geomorfologiya*, No. 1, 73–81.
- Тарбеева А.М., Сурков В.В.** Чётковидные русла малых рек зоны многолетней мерзлоты // *География и природ. ресурсы*, 2013, № 3, с. 27–32.
- Tarbeeve, A.M., Surkov, V.V., 2013. Beaded channels of small rivers in permafrost zones. *Geografiya i Prirodnye Resursy* [Geography and Natural Resources. Elsevier BV (Netherlands)] 34 (3), 216–220, DOI: 10.1134/S1875372813030049.
- Термоэрозия** дисперсных пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1982, 194 с.
- Ershov, E.D. (Ed.), 1982. Thermal Erosion in Dispersed Sediments. Moscow University Press, Moscow, 194 pp. (in Russian)
- Филиппов В.Е., Васильев И.С.** Перигляциальный рельеф Лено-Вилуйского междуречья // *География и природ. ресурсы*, 2006, № 4, с. 82–86.
- Filippov, V.E., Vasilyev, I.S., 2006. The periglacial relief of the Lena-Vilyui interfluve. *Geografiya i Prirodnye Resursy*, No. 4, 82–86.
- Шванов В.Н.** Песчаные породы и методы их изучения. Л., Недра, 1969, 248 с.
- Shvanov, V.N., 1969. Sandy Sediments and Methods for their Study. Nedra, Leningrad, 248 pp. (in Russian)
- Шепелев В.В.** Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2011, 169 с.
- Shepelev, V.V., 2011. Suprapermafrost Waters in the Cryolithozone. Academic Publishing House “Geo”, Novosibirsk, 169 pp. (in Russian)
- Arp C.D., Whitman, M., Jones, B., et al.** Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes // *Biogeosciences*, 2015, No. 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, vol. 37, No. 2, p. 157–162.
- Hopkins, D.M., Karlstrom, T.N.V., Black, R.F., et al.** Permafrost and ground water in Alaska // *Geol. Survey, Profession. Pap.* 264 F, Washington, USA, 1955, 146 p.
- McNamara, J.P., Kane, D.L.** The impact of a shrinking cryosphere on the form of arctic alluvial channels // *Hydrological Processes*, 2009, vol. 23, p. 159–168.
- Merck, M.F., Neilson, B.T., Cory, R.M., Kling, G.W.** Variability of in-stream and riparian storage in a beaded arctic stream // *Hydrological Processes*, 2011, vol. 26, p. 2938–2950.
- Oswood, M.W., Everett, K.R., Schell, D.M.** Some physical and chemical characteristics of an arctic beaded stream // *Holarctic Ecology*, 1989, No. 12, p. 290–295.
- Scott, K.M.** Effects of permafrost on stream channel behavior in Arctic Alaska // *Geol. Survey, Profession. Pap.* 1068. Washington, USA, 1978, 19 p.
- Washburn, A.L.** *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments.* Edward Arnold, London, UK, 1979, 406 p.
- Woo, M.-K.** *Permafrost Hydrology.* New York, Springer-Verlag, 2012, 563 p.

*Поступила в редакцию 13 июня 2018 г.,  
после доработки – 20 ноября 2018 г.,  
принята к публикации 27 ноября 2018 г.*