

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.435.1; 551.435.5

DOI: 10.15372/KZ20230302

ЭРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА МАЛЫХ ТУНДРОВЫХ ВОДОСБОРАХ  
СЕВЕРА ЯКУТИИА.М. Тарбеева<sup>1,\*</sup>, В.С. Ефремов<sup>2</sup>, Л.С. Лебедева<sup>2</sup>, В.В. Шамо́в<sup>2,3</sup><sup>1</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия*<sup>2</sup> *Институт мерзлотоведения им. 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*\*Автор для контакта, [amtarbeeveva@yandex.ru](mailto:amtarbeeveva@yandex.ru)

Эрозионные процессы играют важную роль в выносе продуктов разрушения мерзлых пород. С целью выявления темпов и механизмов эрозионных процессов в условиях деградации мерзлых пород были типизированы формы флювиального рельефа малых водосборов в предгорьях Хараулахского хребта, охарактеризована их морфология, условия образования и динамика за 2019–2022 гг. Наиболее динамичны формы рельефа, связанные с вытаиванием жильных льдов: термокарстовые ложбины стока, рытвины и эрозионно-термокарстовые овраги. Термоэрозионные овраги, формирующиеся в отложениях без жильных льдов, растут при аномально высоких паводках, а в остальное время их борта медленно оползают под действием снежников. В верховьях малых рек происходит аккумуляция наносов, вынесенных из оврагов и рытвин. Русла рек и ручьев начальных порядков стабильны, что характерно и для других районов криолитозоны. Различия в динамике разных типов эрозионных форм можно объяснить усилением теплового, а не механического воздействия водных потоков на мерзлые отложения, которое наблюдается в условиях повышения температур воздуха при стабильном количестве осадков на севере Якутии.

**Ключевые слова:** склоновые ложбины стока, рытвины, овраги, малые реки, термоэрозия, Арктика, многолетняя мерзлота, изменения климата.

**Ссылка для цитирования:** Тарбеева А.М., Ефремов В.С., Лебедева Л.С., Шамо́в В.В. Эрозионные процессы на малых тундровых водосборах севера Якутии // Криосфера Земли, 2023, т. XXVII, № 3, с. 15–30. DOI: 10.15372/KZ20230302.

EROSIONAL PROCESSES IN SMALL TUNDRA CATCHMENTS  
IN THE NORTH OF YAKUTIAA.M. Tarbeeveva<sup>1,\*</sup>, V.S. Efremov<sup>2</sup>, L.S. Lebedeva<sup>2</sup>, V.V. Shamov<sup>2,3</sup><sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia*<sup>2</sup> *Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia*<sup>3</sup> *Pacific Geographical Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Science, Radio St. 7, Vladivostok, 690041 Russia*\*Corresponding author, [amtarbeeveva@yandex.ru](mailto:amtarbeeveva@yandex.ru)

Erosion plays an important role in removing permafrost degradation products. In order to identify the rates and mechanisms of erosion in degrading permafrost, fluvial landforms in small catchments at the foothills of the Kharaulakh Range were typified, and their morphology, formation conditions, and dynamics for 2019–2022 were characterized. The most dynamic landforms associated with melting ice wedges were thermokarst runoff troughs (water tracks), rills, and thermoerosional gullies. Thermoerosional gullies forming in sediments without wedged ice grow upon very high floods; in the rest of the time, their sides slowly slide down under the action of snowfields. Sediments from gullies and rills are deposited in the upper reaches of small rivers. The channels of small rivers are relatively stable, which is also typical of other permafrost regions. Differences in the dynamics of erosional landforms can be explained by an increase in the thermal rather than mechanical impact of water on frozen deposits, which is observed with the rise in air temperature against the background of relatively stable precipitation in the north of Yakutia.

**Keywords:** water tracks, rills, gullies, small rivers, thermal erosion, Arctic, permafrost, climate change.

## ВВЕДЕНИЕ

Флювиальные процессы в криолитозоне развиваются в тесной связи с криогенными. Наиболее ярко эта связь проявляется в самых верхних звеньях гидросети, где мощность водного потока невелика.

Ложбины стока, образующие на склонах характерный полосчатый рисунок – “делли” [Mumm, 1959; Катасонова, 1963; Воскресенский, 1971; Hall, 1997] или “water track” [Kane et al., 1991; McNamara et al., 1999; Trochim et al., 2016] – различаются по морфологии, строению и механизмам образования в зависимости от уклонов, состава подстилающих отложений, сопутствующих криогенных процессов [Тарбеева и др., 2021; Trochim et al., 2016; Paquette et al., 2017]. Ложбины стока определяют скорости добегаания склоновых вод, водный режим малых водосборов и определяют места заложения эрозионных форм [Kane et al., 1991; McNamara et al., 1999].

Образование *рытвин* – начальных эрозионных форм, в естественных условиях тундры инициируется морозобойным растрескиванием [Levy et al., 2008], оползанием деятельного слоя [Gooseff et al., 2009], термокарстом [Fortier et al., 2007; Vowden et al., 2008] и другими процессами. Наряду с ложбинами стока рытвины определяют скорости и источники поступления воды, наносов и растворенных веществ в реки.

В более крупных эрозионных формах – оврагах также действуют термокарст, криогенные оползни, солифлюкция, нивация и другие процессы [Любимов, 1970; Основы..., 2001]. Помимо *термоэрозионных оврагов*, формирующихся преимущественно под действием механической энергии водного потока, обусловленной его уклонами и расходами, в криолитозоне выделяют *эрозионно-термокарстовые овраги*, в образовании которых преобладает тепловая энергия воды, расходуемая на вытаивание льда. Они имеют характерные коленообразные изгибы, наследующие полигонально-жильные льды, и развиваются даже при уклонах поверхности в первые градусы [Термоэрозия..., 1982; Основы..., 2001].

Ручьи и малые реки также испытывают влияние криогенных процессов, но в меньшей степени. Образование озеровидных расширений *четковидных русел*, широко распространенных на равнинах криолитозоны, связывают с термокарстом по полигонально-жильным льдам, т. е. с тепловой энергией водного потока [Термоэрозия..., 1982; Arp et al., 2015]. Такие реки характеризуются небольшими уклонами и расходами воды и малым стоком наносов [Тарбеева, Сурков, 2013].

Изменения климата влияют на термический режим мерзлых пород, а через него – на криогенные и флювиальные процессы. В последние десятилетия отмечается повышение температуры

многолетнемерзлых пород [Biskaborn et al., 2019], увеличение глубины сезонного оттаивания [Romanovsky et al., 2020], понижение кровли многолетнемерзлых пород без существенного увеличения толщины сезонноталого слоя за счет уплотнения высокольдистых отложений [Shiklomanov et al., 2013]. Аналогичные процессы отмечены и на севере Якутии [Antonova et al., 2018; Boike et al., 2019]. Таяние жильных льдов приводит к увеличению расчлененности рельефа, неравномерному распределению снежного покрова и росту поверхностного стока даже при неизменном количестве осадков [Liljedahl et al., 2016].

Благодаря флювиальным процессам продукты разрушения мерзлых пород транспортируются, аккумулируются и выносятся в Мировой океан. Между тем влияние климатических изменений на флювиальные процессы исследовано недостаточно.

Наблюдения за ростом оврагов в естественных условиях тундры на территории России и, в частности, на севере Якутии не проводятся, хотя активные овраги отмечены на высоких подмываемых р. Лена уступах о. Курунгнах и абразионных обрывах п-ова Мамонтов Клык, сложенных отложениями ледового комплекса [Morgenstern et al., 2021].

Цель настоящего исследования – установление темпов и механизмов естественных эрозионных процессов на севере Якутии. В задачи исследований входили типизация верхних звеньев флювиального рельефа, выявление взаимосвязи разных звеньев флювиального рельефа между собой, морфологии, условий образования, скоростей и механизмов роста малых эрозионных форм.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в 115 км к северо-западу от пос. Тикси в пределах Усть-Ленского государственного природного заповедника, что позволило наблюдать естественный ход процессов. Ключевые объекты расположены в верховьях р. Крест-Кёнгдэйё и на ее правых притоках – ручьях Крест-Юрях и Нескучном, а также на руч. Метеорологическом (рис. 1).

Погодные и климатические условия анализировались по данным метеостанции “Остров Столб” (полярная станция им. Ю.А. Хабарова) [Архив..., 2023; Температура..., 2023], расположенной в устьевой области руч. Метеорологического (см. рис. 1). Изменение максимальной глубины сезонного оттаивания оценивалось по данным наблюдений на площадке CALM R51, расположенной на останце первой террасы на о. Самойловском в дельте р. Лены [CALM..., 2023]. В качестве факторов эрозионных процессов оценивались средние летние температуры воздуха, суточный максимум осадков теплого периода, сумма осад-



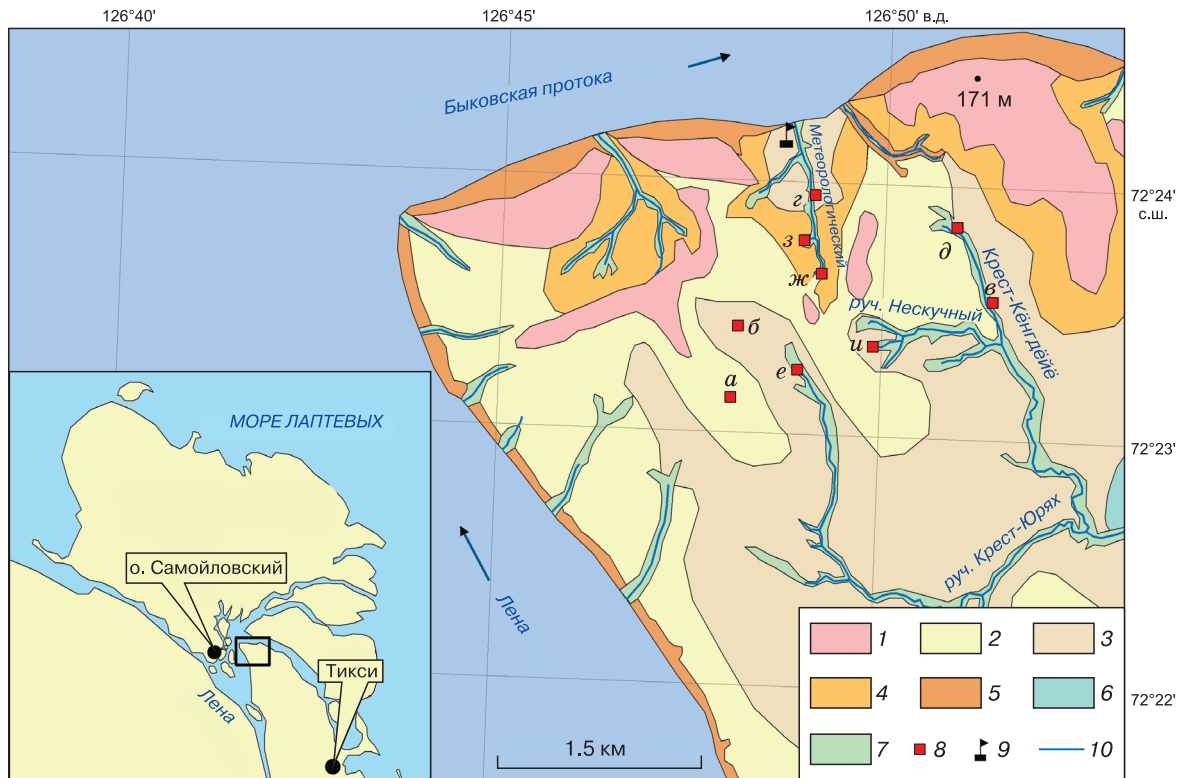


Рис. 1. Схема расположения ключевых объектов исследований на геоморфологической карте.

1–7 – геоморфологическое строение: 1 – привершинные части междуречий (абс. отметки 80–170 м) с выходами коренных аргиллитов, алевролитов и песчаников или грубообломочным чехлом отложений; 2 – привершинные (абс. отметки 70–130 м) склоны междуречий крутизной 1–6° с щебнисто-суглинистым чехлом рыхлых отложений и структурным микрорельефом; 3 – очень пологие (2–4°) склоны, сложенные сильнольдистыми пылеватыми суглинками и супесями с полигонально-жильными льдами и термокарстовыми ложбинами стока (абс. отметки 20–90 м); 4 – средние и крутые склоны 8–20°; 5 – крутые и очень крутые (20–70°) склоны скальные или с грубообломочным чехлом отложений; 6 – заболоченная и заозеренная низменность в низовьях Крест-Кенгдэйё; 7 – водосборные воронки и долины рек и ручьев, включающие террасу, пойму и русло; 8 – ключевые объекты исследований: а – веерная ложбина стока; б – термоэрозионная ложбина стока; в – рытвина № 1; г – рытвина Арбузная; д – эрозионно-термокарстовый овраг в истоках р. Крест-Кенгдэйё; е – эрозионно-термокарстовый овраг в истоках р. Крест-Юрях; ж – термоэрозионный овраг Метеорологический; з – термоэрозионный овраг Левый Метеорологический; и – термоэрозионный овраг Нескучный; 9 – полярная станция им. Ю.А. Хабарова (метеостанция “Остров Столб”); 10 – основные водотоки.

ков холодного периода и максимальная глубина сезонного оттаивания. Эти показатели использовались для оценки характера половодья и паводков, а также степени термического воздействия на мерзлые породы в периоды между наблюдениями.

Полевые работы проводились 2–10 августа 2018 г., 1–14 августа 2019 г., 26 августа – 4 сентября 2020 г., 8–12 июля и 8–10 сентября 2021 г., 27–28 июля 2022 г.

Геолого-геоморфологические условия определялись путем полевого дешифрирования панхроматического снимка WorldView-1©2019. DigitalGlobe, Inc. (19.08.2019, 0.5 м/пиксел), описания разрезов в бортах малых эрозионных форм, берегах рек и в 25 закопашках в деятельном слое, в которых были выборочно проанализированы образцы отложений на влажность (льдистость) и гранулометрический состав. Влажность отложе-

ний определялась весовым методом в поле, гранулометрический состав – ареометрическим и ситовым методами в ИМЗ СО РАН.

Типизация флювиального рельефа основана на разделении водных потоков на звенья [Маккавеев, 1955]. Склоновым безусловным потокам соответствуют ложбины стока, временным русловым потокам – малые эрозионные формы (рытвины, овраги и балки), а постоянным русловым потокам – долины и русла рек. Типы флювиальных форм внутри звеньев определялись исходя из геоморфологических различий, обусловленных геологическим строением и механизмами образования.

На эрозионных формах с признаками размыва в виде незадернованных бортов проводились повторные съемки рельефа. В 2019 г. была проведена тахеометрическая съемка оврагов, в 2020–2022 гг. – аэрофотосъемка оврагов и рытвин с ква-

дрокоптера. Аэрофотосъемка велась с квадрокоптера DJI Mavic mini в ручном режиме с высоты 20–30 м с перекрытием снимков не менее 60 %. В результате обработки снимков в пакете Agisoft были получены ортофотопланы с разрешением около 1 см/пиксел и цифровые модели местности с разрешением 2–4 см/пиксел. По ортофотопланам выделялись бровки эрозионных форм, а по цифровым моделям местности определялись их длина, максимальная ширина, максимальная глубина, площадь и объем в бровках. Средняя глубина эрозионной формы рассчитывалась делением ее объема на площадь. Изменение положения бровок эрозионных форм рельефа определялось путем сопоставления разновременных ортофотопланов, привязанных в программе Agstar по четырем заранее отмаркированным на местности точкам (вбитые в кровлю многолетнемерзлых пород стальные стержни).

Через ложбины стока производились нивелировки поперечных профилей с шагом 0.5–1.0 м и определялась глубина оттаивания при помощи мерзлотного щупа. На характерных участках профиля в шурфах описывались отложения сезонноталого слоя. Скорости фильтрации склоновых потоков определялись при помощи раствора поваренной соли объемом 1 л с концентрацией 100 г/л, который заливался в шурф, вырытый до кровли мерзлых пород и заполненный водой сезонноталого слоя. Через сутки при помощи кондуктометра определялись изменения значений электропроводности воды в серии шурфов, расположенных ниже по склону, а также максимальное расстояние до места, где были зафиксированы превышения фоновых значений. Полученное расстояние делилось на время между измерениями. Единовременные измерения скорости фильтрации потоков позволили сравнить движение воды в ложбинах разных типов.

В долинах малых рек и ручьев, к которым привязаны устья исследованных оврагов и рытвин, определялись типы русел, характер донных отложений, строение берегов, выявлялась задержанность берегов, наличие русловых врезок или аккумулятивных форм.

### ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ

Район дельты Лены характеризуется длительной (с октября по май) суровой зимой и коротким (июнь–август) прохладным летом. Средняя зимняя (декабрь–февраль) температура воздуха постепенно повышалась, составляя: –30.2 °С за 1961–1990 гг., –29.5 °С за 1991–2020 гг., –28.5 °С за 2006–2021 гг. Средняя летняя (июнь–август) температура воздуха также росла, составив: +6.3 °С за 1961–1990 гг., +7.0 °С за 1991–2020 гг., +8.4 °С за 2006–2021 гг. Рост температур воздуха с 1990 г. характерен для всей тундровой зоны Якутии [Горохов, Федоров, 2018]. В 2018–2022 гг. годовые и сезонные температуры воздуха были преимущественно выше среднемноголетних значений (табл. 1).

Среднее годовое количество осадков за период непрерывных наблюдений (2006–2021 гг.) составляет 185 мм. Слой снега, обеспечивающий сток половодья, составляет менее половины годового слоя осадков, но его доля сильно варьирует год от года. За 2019–2022 гг. сумма твердых осадков была максимальной зимой 2020/21 г., минимальной она была в зимы 2019/20 и 2021/22 гг. (см. табл. 1). Суточный максимум дождевых осадков с 2006 по 2021 г. варьировал от 4 до 66 мм. Дожди с интенсивностью более 20 мм/сут наблюдались в 2008, 2012 и 2018 гг. (1 раз в 4–6 лет), более 60 мм/сут – в 1982 и 2018 гг. В 2019–2022 гг. максимальное количество осадков за сутки выпало 27 августа 2021 г. и составило 19 мм. В целом на

Таблица 1. Средние годовые и сезонные температуры воздуха и осадки по данным метеостанции “Остров Столб” [Температура..., 2023] и максимальная глубина сезонного оттаивания по данным площадки R51 (о. Самойловский) [CALM..., 2023] за 2018–2022 гг. и осредненные данные за 2006–2021 гг.

Период	Средняя температура воздуха, °С			Сумма осадков, мм			Суточный максимум осадков теплого периода, мм	Максимальная глубина сезонного оттаивания, см
	годовая	летняя (июнь–август)	зимняя* (декабрь–февраль)	за год (календарный)	холодного периода*	теплого периода		
2006–2021	–10.7	+8.4	–28.5	185	89	104	18	52
2018	–10.3	+9.5	–28.1	338	132	212	66	54
2019	–9.8	+9.8	–27.2	158	104	79	11	51
2020	–7.7	+9.9	–25.6	184	75	36	5	59
2021	–11.0	+10.3	–28.1	195	175	109	19	63
2022	–10.5	+8.9	–26.7	153	45	66	5	52

\* За холодный период, который заканчивается в году, указанном в столбце 1, а начинается в предыдущем.

севере Якутии годовая сумма осадков с 1990 г. испытывает слабый отрицательный тренд [Горохов, Федоров, 2018].

Многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение, их мощность составляет 400–600 м, температура с 2006 по 2021 г. повысилась с  $-9.1$  до  $-7.0$  °C [Global Terrestrial Network..., 2023]. Толщина сезонноталого слоя в 2006–2022 гг. колебалась от 41 до 63 см и в последние годы преимущественно росла (см. табл. 1).

Территория представлена денудационно-эрозионным структурным холмогорьем (максимальная отметка 171 м), образованным северными отрогами Хараулахского хребта. Тектонически обусловленные обрывы вдоль русла Лены и Быковской протоки дельты р. Лены изрезаны крутыми и короткими долинами. Центральные части территории характеризуются округлыми вершинами междуречий (сопками), пологими (менее 6°) вогнутыми или прямыми склонами длиной до 1.5–2 км (рис. 1).

На вершинах сопков, в руслах ручьев, днищах оврагов и береговых обрывах р. Лены обнажаются коренные породы нижнего карбона – алевролиты, аргиллиты и песчаники [Государственная... карта..., 1978]. Видимая мощность рыхлых отложений не превышает 5–6 м, возрастая от водоразделов к нижним частям склонов. В щебнистых суглинках и супесях верхних частей склонов развиваются структурные грунты в виде пятен-медальонов и несортированных полос. В нижних частях склонов, сложенных пылеватыми суглинками и супесями, проявляются полигонально-жильные льды, размеры полигонов 12–15 м. Днище, террасовидная поверхность и водосборные воронки в верховьях долин сложены слоистыми супесями и суглинками. Глубина оттаивания в них больше, чем на прилегающих склонах (до 1 м). Верховья рек центральной части территории заболочены, в них развиты полигонально-жильные льды.

### ТИПИЗАЦИЯ ФЛЮВИАЛЬНОГО РЕЛЬЕФА

На выбранной территории склоновое звено флювиального рельефа представлено двумя типами ложбин стока. К малым эрозионным формам относятся рытвины и овраги двух типов. В долинах малых рек выделяется закономерная смена типов русел (рис. 2, табл. 2).

#### Склоновое звено

*Веерные ложбины стока* на снимках имеют вид часто расположенных полос, расходящихся от вершинных поверхностей вниз по склону (см. рис. 2, 1а; табл. 2).

На правобережье руч. Крест-Юрях веерные ложбины стока шириной от 1 до 5 м образованы понижениями структурного микрорельефа, а межложбинные пространства состоят из серии вытя-

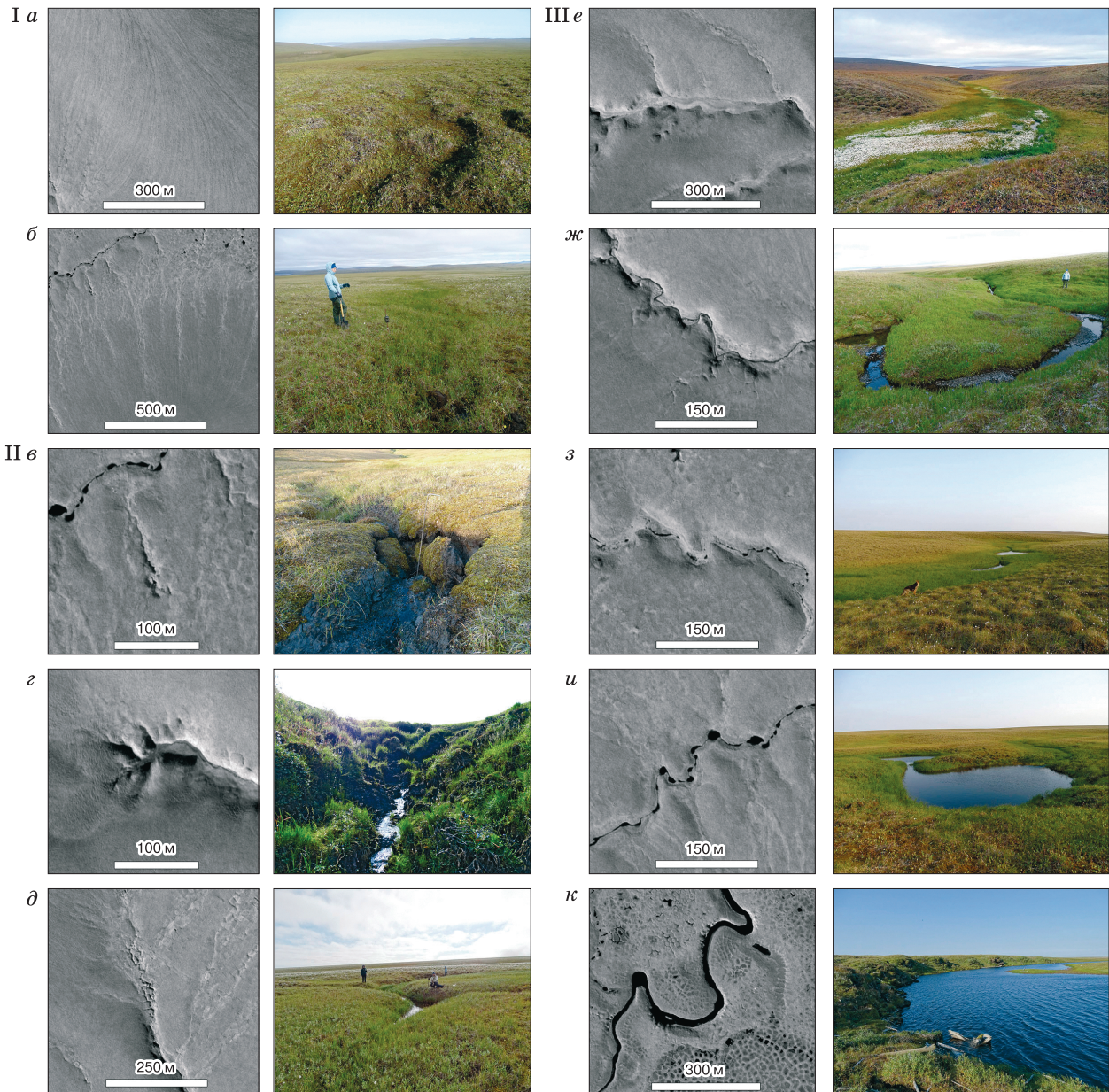
нутых вниз по склону гряд шириной до 2 м, состоящих из слившихся пятен-медальонов (рис. 3). Глубина оттаивания в ложбине в начале августа составляла 20–25 см, что в 2 раза меньше, чем в центре гряды. Гряды сложены сизовато-серым плотным средним суглинком с включением хаотично ориентированных обломков алевролитов размером 5–10 см в поперечнике (шурф 13). Почвенно-растительный покров на вершине гряды несомкнутый, что связано с пучением. В днище ложбины под слоем мха и оглиненного торфа мощностью 12 см был вскрыт горизонт щебня без заполнителя, через который фильтровалась вода (шурф 13а). В шурфе 13б, расположенном в днище ложбины в 4 м ниже шурфа 13а, пустоты в слое щебня были частично заполнены сильнообводненным (разжиженным) суглинком. Вода в днище ложбины фильтровалась в слое щебня со скоростью 14 м/сут, что говорит о наличии путей преимущественного стока воды.

*Термокарстовые ложбины стока* наследуют понижения, расположенные над жилами полигональных льдов, ориентированными вниз по склону. Термокарстовые ложбины стока сменяют веерные вниз по склону вместе с изменением состава отложений и появлением в них жильных льдов. Переходы между веерными и термокарстовыми ложбинами стока нечеткие, поскольку в верхней части склона термокарстовые ложбины стока неширокие и очень плохо выражены в рельефе. Термокарстовые ложбины стока имеют древовидную структуру: вниз по склону, по мере слияния с другими ложбинами, их ширина увеличивается от 1–2 до 10 м (рис. 4). В целом они крупнее и расположены реже, чем веерные (см. рис. 2, 1б; табл. 2). Расстояния между устьями термокарстовых ложбин стока варьируют от 30 до 200 м.

В истоках руч. Крест-Юрях термокарстовая ложбина стока длиной 880 м дренирует склон юго-восточной экспозиции. Ложбина полностью задернована, следы размыва или отложения наносов в ней отсутствуют. Разрез отложений на межложбинном пространстве состоит из плохо разложившегося торфа мощностью 10 см, который подстилается сизовато-серым легким или средним пылеватым суглинком (табл. 3). На разных глубинах встречаются линзы и гнезда торфа толщиной 3–7 см, которые ожелезнены и сильно увлажнены. Влажность отложений варьирует по разрезу, достигая максимальных значений в верхних торфяных горизонтах и в нижней (мерзлой) части деятельного слоя (табл. 4). В ложбинах состав отложений аналогичен, но шурф быстро заполняется водой.

В начале августа 2018 г. средняя глубина оттаивания в днище термокарстовой ложбины стока составляла 28 см, а между ложбинами была равна 21 см. Различия в глубине оттаивания особенно





**Рис. 2. Типы склоновых ложбин (I), малых эрозионных форм (II) и русел ручьев и малых рек (III) на космическом снимке WorldView-1 (слева) и наземном фото А.М. Тарбеевой (справа) в порядке увеличения площади водосбора (сверху вниз по течению):**

*a* – веерные ложбины стока; *б* – термокарстовые ложбины стока; *в* – рытвины; *г* – термоэрозионные овраги; *д* – эрозионно-термокарстовые овраги; *е* – заполненные наносами участки долин (русла не выражены); *ж* – врезанные прямолинейные или извилистые русла; *з* – заполненные наносами днища долин с фрагментами русел; *и* – четковидные прямолинейные и четковидные извилистые русла; *к* – извилистое русло в зоне подпора р. Лены.

заметны в начале лета и связаны с обводненностью ложбин (рис. 5). При отсутствии осадков сток воды в ложбинах фильтруется со скоростью 3–4 м/сут. Поверхностный сток появляется в ложбине только при снеготаянии или обильных осадках, например, 5 августа 2019 г., когда выпало 11 мм дождя за 12 ч.

### Рытвины

*Рытвины* – начальные эрозионные формы глубиной до 1.5 м, с V-образным или каньонообразным поперечным профилем, незадернованными бортами с обнажением жил льда, наличием в устье областей аккумуляции свежих наносов. Обычно рытвины располагаются вдоль термокар-



Таблица 2. Морфология склоновых ложбин и малых эрозионных форм

Тип	Положение	Абс. высотные отметки, м	Состав пород	Уклоны тальвегов, град	Длина, м	Ширина, м	Глубина, м
Веерные ложбины стока	Верхние части склонов	80–110	Щебнистые суглинки	<6	500–1500	1–5	0.2–0.3
Термокарстовые ложбины стока	Нижние части склонов	20–100	Пылеватые супеси и суглинки с включением полигонально-жильных льдов	1–5	1000–1500	2–15	0.2–0.5
Рытвины	Нижние части склонов вдоль термокарстовых ложбин	20–50	Пылеватые супеси и суглинки с включением полигонально-жильных льдов	2–8	30–100	2–7	1.0–1.5
Эрозионно-термокарстовые овраги	Заболоченные верховья долин	60–80	Оторфованные супеси и суглинки с включением полигонально-жильных льдов	1–2	500–2000	3–10	1–2
Термоэрозионные овраги	Водосборные воронки в истоках рек	50–60	Слоистые супеси и суглинки без жильных льдов	4–8	50–100	10–20	3–5

стовых ложбин стока в нижних частях склонов (см. рис. 2, Пв; табл. 2).

Рытвина № 1 сформировалась в 2020 г. на склоне юго-западной экспозиции вдоль правого края термокарстовой ложбины. Площадь водосбора рытвины составляет 0.26 км<sup>2</sup>.

В сентябре 2020 г. верхняя часть рытвины представляла собой частично обвалившийся тоннель (рис. 6). Сразу ниже вершины водоток с расходом около 0.5 л/с уходил под землю в основание ледяной жилы в ее правом борту (рис. 7) и выходил в днище рытвины в 28 м ниже. Жила залегала в слое сизо-серых легких пылеватых суглинков с прослойками торфа, нижняя часть разреза содержала обломки аргиллитов 5–10 см в поперечнике. На пойме р. Крест-Кёнгдэйё наблюдался шлейф свежих наносов.

Максимальной длины рытвина достигла почти сразу после образования при обрушении термоэрозионного тоннеля (табл. 5). К сентябрю 2021 г. обвалившаяся кровля верхней части тоннеля была размыта, площадь, максимальная ширина и объем рытвины увеличивались за счет вытаивания льда и обрушения бортов, вынесенный материал накапливался в днище и устье. Наиболее высокими темпы выноса материала, выражающиеся в увеличении объема рытвины, были в первый год ее существования, а затем вынос сократился (см. табл. 5). К 2022 г. нижняя часть рытвины заросла пушицей и вейником, имеющими на снимке ярко-зеленый цвет (см. рис. 6).

Рытвина Арбузная также приурочена к днищу термокарстовой ложбины. В 2020 г. (до появления рытвины) в днище ложбины существовало два заросших ивой понижения, в которых концентрировался поверхностный сток воды (рис. 8). Рытвина заложилась по краю левого из понижений, вероятно, после паводка в августе 2021 г.

К сентябрю рытвина достигла длины 20.5 м (см. табл. 5) и представляла собой остатки тоннеля с частично обвалившейся кровлей. В правом борту рытвины обнажалась жила льда вертикальной

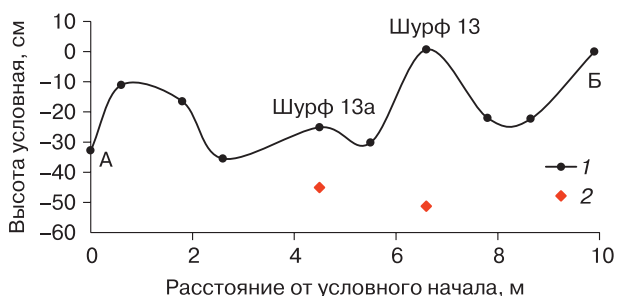
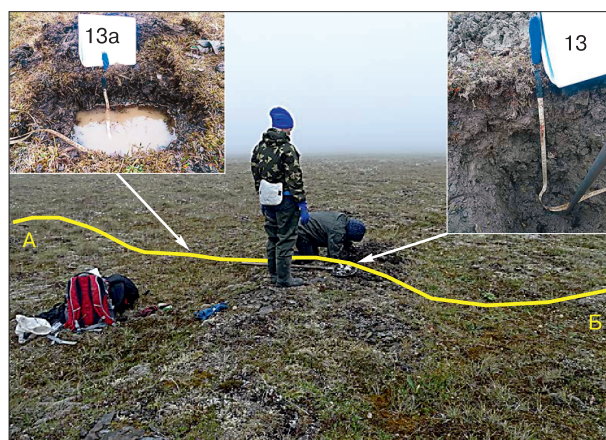


Рис. 3. Веерная ложбина стока на склоне ручья Крест-Юрях.

Вверху – общий вид ложбины вниз по склону с фотографиями шурфов и положением профиля по линии А–Б; внизу – поперечный профиль через ложбину по линии А–Б (1) с положением шурфов 13 и 13а и отметками измеренной глубины оттаивания на 05.08.2018 г. (2).



**Рис. 4. Термокарстовые ложбины стока в истоках ручья Крест-Юрях.**

Вид с квадрокоптера вниз от профиля на рис. 5. Фото А.М. Тарбеевой, 05.09.2022 г.

**Таблица 3. Гранулометрический состав склоновых отложений в закопушке на правом борту термокарстовой ложбины**

Глубина отбора образца, см	Гранулометрический состав отложений, мм						
	1.0–0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.002	<0.002
12–20	0.7	3.1	5.8	18.9	40.5	22.3	8.7
24–29	0.8	4.3	7.0	9.3	50.0	19.1	9.5

Примечание. Анализ выполнен ситовым и ареометрическим методами в лаборатории ИМЗ СО РАН м.н.с. А.Л. Лобановым и вед. инженером Ю.Г. Слепцовой.

**Таблица 4. Изменение влажности отложений (вес. % к сухому остатку) в разрезе склоновых отложений в термокарстовой ложбине (август 2019 г.)**

Глубина отбора	Верхняя часть ложбины		Средняя часть ложбины		Среднее
	днище	левый борт	правый борт	левый борт	
Верхняя часть разреза (глубина 2–12 см, торф талый)	647	258	182	148	309
Средняя часть разреза (глубина 18–23 см, суглинок, супесь талые)	80	217	49	81	107
Нижняя часть разреза (глубина 25–37 см, суглинок, супесь мерзлые)	157	241	125	112	159

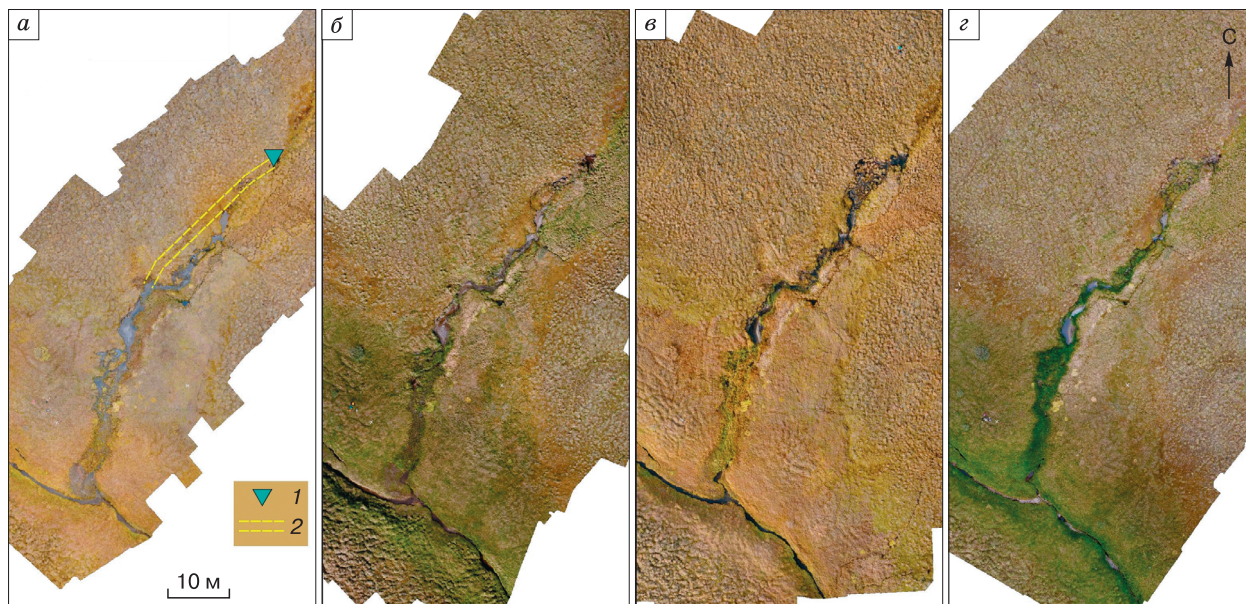
Примечание. Анализ выполнен вед. инженером В.С. Ефремовым.



**Рис. 5. Поперечный профиль через термокарстовую ложбину стока в средней части склона:**

1 – поверхность рельефа; 2, 3 – глубина сезонного оттаивания на середину июля и начало сентября соответственно.





**Рис. 6. Разновременные ортофотопланы рытвины № 1:**

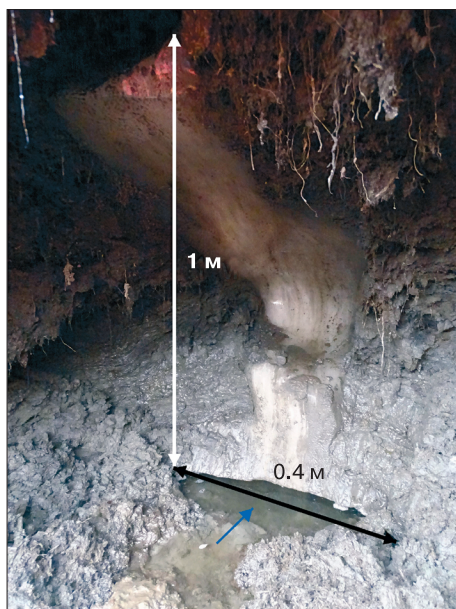
1 – жила льда в борту рытвины (фото на рис. 7); 2 – тоннель; а – 01.09.2020, б – 10.07.2021, в – 10.09.2021, з – 31.07.2022.

мощностью около 0.6 м, видимой шириной 1.5 м, перекрытая метровой толщиной слоистых пылеватых суглинков с прослоями торфа. В основании жилы льда в тоннеле высотой 30 см наблюдался поток воды с расходом около 1 л/с. Шлейф свежих наносов в устье имел площадь 16 м<sup>2</sup>, толщину

до 7 см. С сентября 2021 по сентябрь 2022 г. длина рытвины не изменилась, а ее правый берег за счет таяния льда отступил на 2.5 м, началось зарастание днища и конуса выноса рытвины (см. рис. 8).

### Овраги

Эрозионно-термокарстовые овраги (см. рис. 2, Пд) – более крупные и длительно существующие по сравнению с рытвинами, отрицательные формы рельефа. В отличие от рытвин, приуроченных на данной территории к склонам долин, еще не освоенным эрозией, эрозионно-тер-



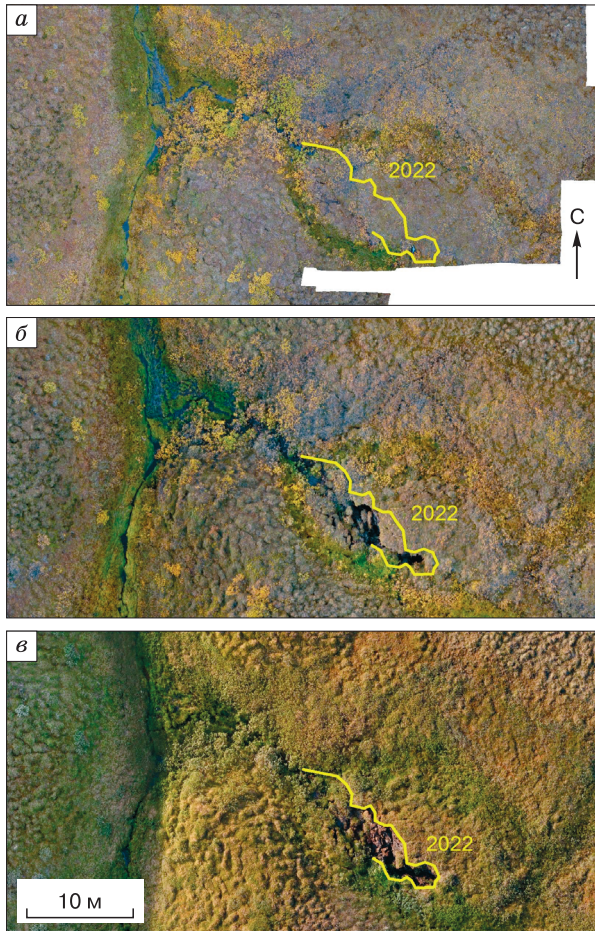
**Рис. 7. Жила в правом борту рытвины № 1, в основании которой уходит водный поток (направление течения показано синей стрелкой).**

Фото А.М. Тарбеевой, 01.09.2020 г.

**Таблица 5. Изменение морфометрических характеристик рытвин**

Дата	Объем, м <sup>3</sup>	Длина, м	Площадь, м <sup>2</sup>	Ширина, м		Глубина, м	
				сред.	макс.	сред.	макс.
<i>Рытвина № 1</i>							
01.09.2020	29.3	40.5	121.3	3.1	5.0	0.2	1.4
10.07.2021	29.9	40.5	128.6	3.1	6.0	0.2	1.0
10.09.2021	48.9	44.4	184.2	4.1	6.6	0.3	0.9
31.07.2022	55.5	45.7	208.2	4.6	6.9	0.3	0.9
<i>Рытвина Арбузная</i>							
01.09.2020	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
08.09.2021	5.1	20.5	27.6	1.3	3.9	0.2	1.1
30.07.2022	9.8	20.5	48.2	2.3	4.4	0.2	1.1
<i>Рытвина № 2</i>							
10.09.2021	63.2	49.1	219.4	4.5	5.9	0.3	0.8
31.07.2022	62.4	51.7	224.1	4.3	5.9	0.3	0.9





**Рис. 8. Разновременные ортофотопланы рытвины Арбузной.**

*a* – 01.09.2020, *б* – 08.09.2021, *в* – 30.07.2022. Желтой линией показано положение бровки 30.07.2022 г.

мокарстовые овраги приурочены к заболоченным верховьям долин с развитой сетью полигонально-жильных льдов и имеют значительную протяженность. Они характеризуются коленообразными изгибами и множеством отвершков, отходящих под прямым углом, каньонообразным поперечным профилем, относительно небольшими уклонами и слабопроточной водой (см. табл. 5).

Склоны эрозионно-термокарстового оврага в истоках р. Крест-Кёнгдэйё на большем протяжении задернованы. Но некоторые его отвершки сформировались в последние десятилетия, так как они отсутствуют на некоторых космических снимках высокого разрешения (рис. 9), но присутствие на снимке WV-1 2019 г. Паводок в августе 2021 г. привел к обнажению жильного льда в верхней части одного из отвершков оврага, но практически не сказался на изменении его длины и объема (см. рис. 9).

Эрозионно-термокарстовый овраг в верховьях руч. Крест-Юрях (см. табл. 5) также имеет задернованные склоны. С 2019 по 2022 г. признаков роста этого оврага не отмечено.

**Термоэрозионные овраги** приурочены к небольшим водосборным воронкам в верховьях долин, в которых отсутствуют мощные полигонально-жильные льды (см. рис. 2, П<sub>2</sub>). Термоэрозионные овраги имеют V-образный поперечный профиль, их глубина, ширина и уклоны больше, чем у эрозионно-термокарстовых (см. табл. 5). Исследованные авторами термоэрозионные овраги имели признаки роста в виде незадернованных уступов, разрывов дерна или сползающих блоков отложений на бортах.

*Метеорологический овраг* вскрывает в днище выветрелые коренные породы – алевролиты и песчаники. Левый борт оврага имеет отвесный уступ, под которым наблюдаются отсевшие и перевернутые блоки отложений с дерниной (рис. 10). В уступе вскрываются горизонтально слоистые (прослой 0.5 см) супеси и суглинки нивально-делювиального происхождения. Глубина сезонного оттаивания этих отложений в днище водосборной воронки достигает 1 м.

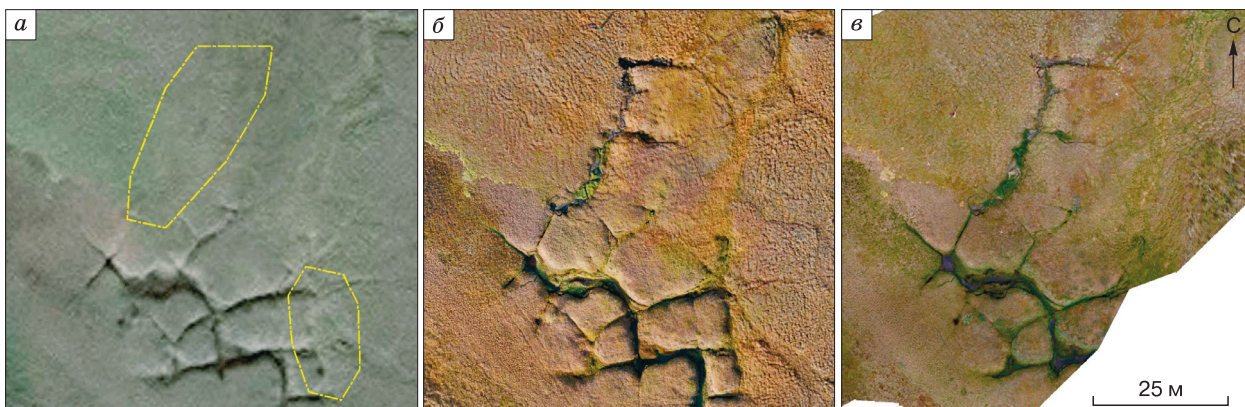
В 2019–2020 гг. за счет обрушения блока отложений левая бровка оврага Метеорологического отступила на 1.6 м (см. рис. 10). Это было максимальным значением за весь период наблюдений. С 2020 по 2022 г. роста оврага не наблюдалось. После максимального за период наблюдений паводка 27 августа 2021 г. отмечалось образование трещин отседания вдоль левой бровки оврага и смещение отдельных блоков отложений.

Вершина *оврага Левого Метеорологического* имеет циркообразную форму и врезана в уплотненную поверхность в нижней части склона долины с признаками нивальной деятельности (рис. 11). Овраг ориентирован на восток в соответствии с преобладающими зимними ветрами, поэтому до середины июля заполнен снегом. Склоны оврага представлены серией сползающих блоков дернины, в днище оврага высачивается вода. С 2019 по 2022 г. рост оврага не зафиксирован, наблюдалось зарастание склонов.

*Овраг Нескучный* ориентирован на восток, поэтому до середины июля также заполнен снегом. Борты и вершина оврага образованы серией кулисообразно сползающих блоков дернины (рис. 12). Изменения бровок оврага за 2019–2022 гг. не зафиксировано, но побочно выявлены специфические процессы в пределах его водосборной воронки.

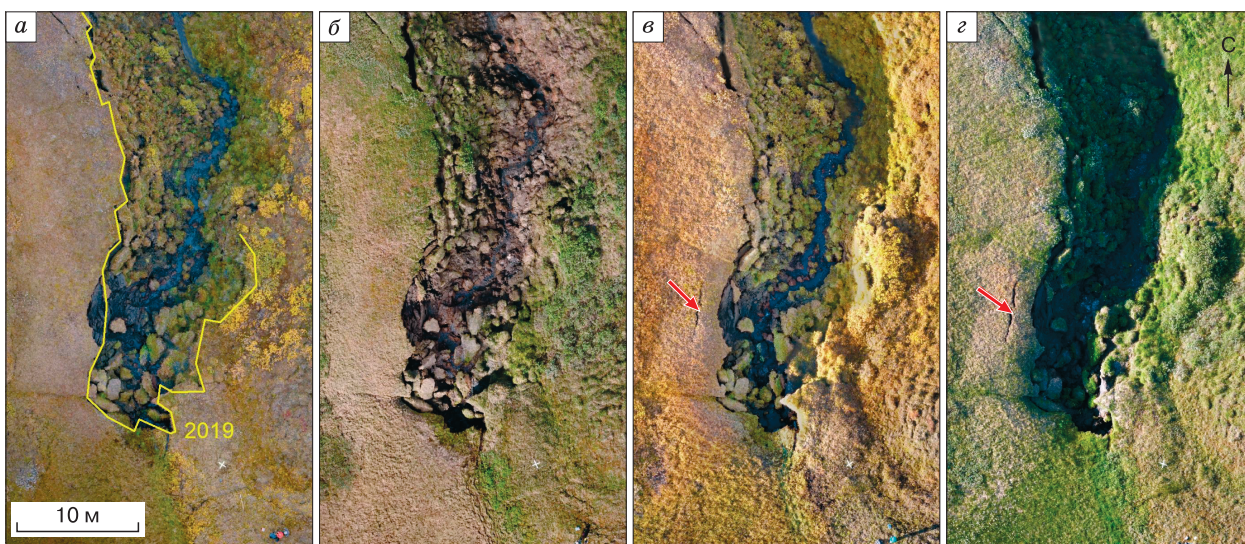
В 2019 г. в верхней части неглубокой ложбины длиной около 100 м, глубиной 0.2–0.3 м и шириной 1–2 м, подводящей сток в вершину оврага, наблюдались выходы напорного мутного потока воды, а на поверхности мха образовался неболь-





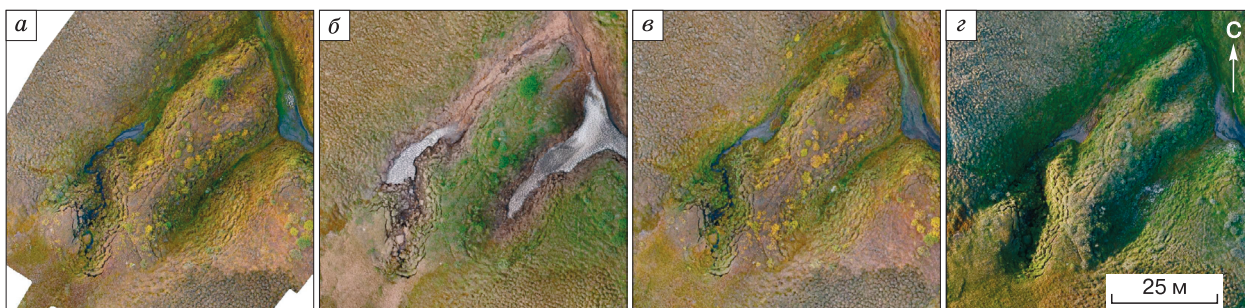
**Рис. 9.** Космический снимок (*а*) и разновременные ортофотопланы (*б, в*) верхней части эрозивно-термокарстового оврага в истоке р. Крест-Кёнгдэйё.

*а* – космический снимок получен из сервиса Sakhagis.ru, дата съемки неизвестна (до 2019 г.); желтым пунктиром отмечены места, где к 2021 г. появились новые отвершки; ортофотопланы: *б* – 10.09.2021, *в* – 31.07.2022.



**Рис. 10.** Разновременные ортофотопланы вершины Метеорологического оврага.

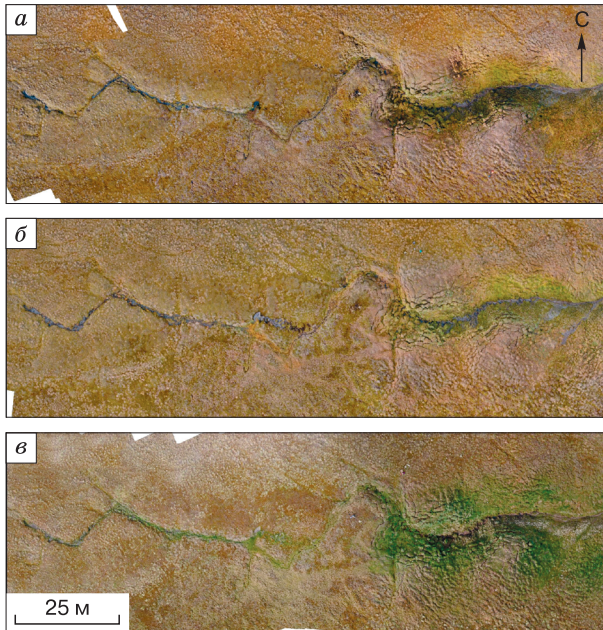
*а* – 31.08.2020, *б* – 08.07.2021, *в* – 08.09.2021, *г* – 30.07.2022; *а* – желтая линия – положение бровки в 2019 г., *в, г* – красными стрелками показана трещина отседания.



**Рис. 11.** Разновременные ортофотопланы Левого Метеорологического оврага.

*а* – 30.08.2020, *б* – 08.07.2021, *в* – 08.09.2021, *г* – 30.07.2022.





**Рис. 12. Разновременные ортофотопланы вершины оврага Нескучного в 2020–2022 гг.**

*а* – 03.09.2020, *б* – 10.09.2021, *в* – 31.07.2022.

шой конус суглинистого материала (рис. 13). В 2020 и 2021 гг. вынос и накопление наносов продолжилось в разных частях ложбины. К осени 2021 г. днище ложбины на всем протяжении было заполнено наносами, толщина слоя которых достигала 20 см, а площадь, покрытая наносами, составила 63 м<sup>2</sup>. Отложения свежих наносов на растительном покрове наблюдались также на бортах Нескучного оврага. В 2022 г. наносы в днище ложбины начали зарастать пушицей и вейником, что выражено ярко-зеленым цветом на снимке (см. рис. 12).

Свежие наносы на поверхности растительного покрова наблюдались авторами в 2019, 2020 и 2021 гг. и в соседних долинах исследованной территории, а также на о. Курунгах в дельте р. Лены. Как правило, выходы мутных вод были приурочены к микропонижениям на склонах долин.

#### Типы русел в малых долинах

Верховья речных долин на протяжении верхних 0.5–1.5 км заполнены слоистыми супесями и суглинками с включением щебня в нижней части разреза (см. рис. 2, IIIe). Днища долин плоские, заболоченные, шириной до 30–50 м, преимущественно покрыты растительностью (пушица, осока, ива), поток на них расплывается. Слой свежих наносов ниже Метеорологического оврага после паводка августа 2021 г. достигал 10 см мощности и протягивался на первые десятки метров.



**Рис. 13. Наносы на поверхности растительного покрова выше вершины оврага Нескучного.**

*а* – 14.08.2019, дневник для масштаба; *б* – 09.09.2021, мерзлотный щуп длиной 1.5 м для масштаба. Фото А.М. Тарбеевой.

В нижних частях заполненных наносами участков долин наблюдаются вторичные донные врезы, переходящие в прямолинейные или извилистые русла, ограниченные массивами поймы (см. рис. 2, IIIж). Эти русла галечные, местами врезаны до коренных пород, со слабыми признаками размыва и обрушения пойменных берегов. Ниже по течению такие участки вновь сменяются заполненными наносами участками долин с фрагментами четковидных русел с заросшими берегами (см. рис. 2, IIIз).

В среднем течении р. Крест-Кёнгдэйё, где она имеет второй (по Стралеру) порядок, формируются четковидные извилистые русла (см. рис. 2, IIIи). Расширения русел – чётки имеют округлую или овальную форму, их ширина 10–15 м, длина до 20 м, глубина около 1.0–1.5 м. Перетоки между ними имеют ширину около 1 м и глубину 0.5 м, берега заросли осокой. На дне чёток и перетоков наблюдаются глыбы и щебень алевритов, свиде-

тельствующие о близком залегании коренных пород и отсутствии влекомых наносов.

На приустьевом участке р. Крест-Юрях река приобретает третий порядок, ширина русла возрастает до 20–25 м. Здесь развиты обычные для равнинных рек излучины (см. рис. 2, IIIк). Весной эта часть долины затапливается водами р. Лены. Пойма имеет наклон в сторону русла и полигонально-валиковый микрорельеф. Вогнутый берег представлен первой надпойменной террасой высотой до 2.0–2.5 м, уступ которой изрезан заросшими понижениями по вытаявшим жилам. Повсеместная задернованность вогнутых берегов излучин и отсутствие отмелей на выпуклых берегах свидетельствуют об отсутствии существенного смещения русла на этом участке.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Современные изменения климата на севере Якутии заключаются в увеличении температуры воздуха, тогда как количество атмосферных осадков снижается. Температуры воздуха влияют на глубину оттаивания и термокарст через прогревание поверхности и склоновых вод. Усиливается тепловое, а не механическое воздействие водных потоков, что по-разному сказывается на динамике различных типов флювиальных форм.

Образование веерных ложбин стока связано с развитием структурных грунтов. Процессы пучения, о которых свидетельствуют пятна-медальоны на вершинах гряд, определяют морфологию ложбин и направление стока воды. Фильтрация воды в щепнистых горизонтах перераспределяет суглинистый заполнитель в днище ложбины, меняя направление стока. Аналогичные процессы в ложбинах описаны на севере Канады [Paquette et al., 2017].

Термокарстовые ложбины стока не имеют видимых следов размыва или отложения наносов. По мере движения вниз по склону, вода в них прогревается от 0...+1 до +4...+8 °С [Tarbeeva et al., 2020], за счет слияния ложбин объем воды возрастает, что способствует увеличению глубины оттаивания. Углубление термокарстовых ложбин происходит за счет оттаивания верхних горизонтов мерзлых пород, в том числе жильных льдов, чему способствуют повышение температур воздуха, склоновых вод и концентрация склонового стока. Появление новых ложбин стока вдоль полигонально-жильных льдов за период с 1972 по 2010 г. отмечалось на севере Канады [Godin et al., 2014].

Попадание потока воды в морозобойные трещины в днищах термокарстовых ложбин приводит к образованию тоннелей во льду, при обрушении которых развиваются рытвины [Fortier et al., 2007]. Рытвины являются наиболее динамичными эрозионными формами флювиального рельефа исследуемой территории. Они достигают макси-

мального объема за один-два сезона, за которые выносятся до 50–60 м<sup>3</sup> материала, включая лед, минеральное и органическое вещество.

Активизация эрозионных процессов наблюдалась после выпадения интенсивных осадков 27 августа 2021 г. Однако появление рытвины № 1 в 2020 г. не было связано с паводками и половодьем. Сумма твердых осадков в предшествующую зиму была существенно ниже нормы, а максимальная суточная величина летних осадков составила всего 5 мм. Между тем лето 2020 г. отличалось высокими температурами воздуха (средняя за июнь–август равна 9.9 °С) и максимальной глубиной сезонного оттаивания (59 см). Образованию рытвины могло способствовать изменение путей стока в питающей ее термокарстовой ложбине за счет неравномерного вытаивания льдов. Формирование подземного тоннеля во льдах могло также произойти за один-два сезона до проявления рытвины на поверхности [Fortier et al., 2007].

Высокие летние температуры воздуха и склоновых вод должны способствовать вытаиванию подземных льдов и образованию рытвин, поэтому частота их образования при потеплении должна возрастать. На Аляске более 60 % рытвин, сформированных в отложениях с полигонально-жильными льдами, появилось с 1980 по 2006 г. [Bowden et al., 2008].

Эрозионно-термокарстовые овраги также развиваются за счет вытаивания жильных льдов. Однако после полного вытаивания льдов или образования бронирующего талого слоя их рост останавливается. Развитие оврагов исследованной территории в глубину ограничено близким залеганием коренных пород и небольшой мощностью ледяных жил. На севере Канады максимальные темпы роста длины оврагов, заложившихся по полигонально-жильным льдам, достигают 300 м в год, но отмечается их неравномерный рост [Godin et al., 2014].

Исследованные термоэрозионные овраги не испытали существенного роста за 2019–2022 г. Максимальное отступление бровки Метеорологического оврага, зафиксированное с 2019 по 2020 г., нельзя объяснить высоким половодьем (зимние осадки были минимальными) или паводками (максимум суточных осадков составил 5 мм). Вероятно, оно связано с запоздалым обрушением берега, подмытого в паводок 2018 г., когда за сутки выпало 66 мм осадков. С 2019 по 2022 г. все термоэрозионные овраги испытывали зарастание склонов. Даже при максимальных осадках 19 мм за сутки (близко к повторяемости 1 раз в 5 лет) изменения положения бровок оврагов не отмечалось, хотя наблюдалась аккумуляция наносов в днищах долин. Наибольший вклад в динамику термоэрозионных оврагов вносят аномально вы-



сокие паводки или половодья, а в остальное время происходит медленное оползание склонов за счет нивальной деятельности и размыв отложений в днище оврага.

Основная часть наносов, вынесенных из оврагов и рытвин, оседает в днищах долин на протяжении 0.5–1.5 км. Большой объем отложений, заполняющих верхние части речных долин, свидетельствует о существенном и, вероятно, длительном поступлении наносов из оврагов. Мощности современного водного потока недостаточно для их перемещения ниже по течению. Русла рек второго-третьего порядков стабильны. Отсутствие размыва берегов самых малых рек отмечалось и в тундре Аляски [Scott, 1978].

Вынос наносов на поверхность растительного покрова, наблюдавшийся на водосборе Нескучного оврага, – специфический суффозионный процесс, не образующий явных форм рельефа, но приводящий к перераспределению наносов на склоне и влияющий на структуру почвенного покрова. Этот процесс начался в 2019 г., его активность нарастала по мере увеличения глубины сезонного оттаивания с 2019 по 2021 г. и достигла максимума после паводка 27 августа 2021 г.

Похожие процессы описаны и на севере Канады [Holloway et al., 2016]. Они возникают после интенсивных дождей, выпадающих в конце периода сезонного оттаивания почвы в годы с высокими летними температурами воздуха. Выброс материала на поверхность происходит под давлением с нижней границы деятельного слоя. Механизмы этого процесса заслуживают более детального изучения, как и влияние на него изменений климата.

## ВЫВОДЫ

1. Современные климатические изменения на севере Якутии заключаются в повышении среднегодовых и среднелетних температур воздуха, тогда как количество осадков не повышается. В этих условиях усиливается тепловое, а не механическое воздействие водных потоков на размываемые отложения, что по-разному сказывается на динамике разных типов флювиальных форм.

2. Наиболее активными эрозионными формами являются рытвины, образующиеся вдоль термокарстовых ложбин стока при вытаивании жильных льдов. За один-два года из рытвин выносятся до 50–60 м<sup>3</sup> отложений, включая лед, минеральные и органические вещества, а затем их борта оплывают и зарастают. Развитию таких форм, помимо сильных осадков, способствуют высокие летние температуры воздуха и склоновых вод, увеличение глубины сезонного оттаивания, неглубокое залегание оголовков ледяных жил. Термоэрозионные овраги, образованные в отложениях

без жильных льдов, развиваются при интенсивных летних осадках, а в остальное время подвержены нивальным процессам.

3. Большая часть твердого материала, вынесенного из оврагов и рытвин, оседает в долинах водотоков первого порядка, что приводит к образованию плоских днищ долин. Мощности водотоков недостаточно для их транспортировки ниже по течению. Это подтверждается и низкими темпами смещения русел малых рек.

4. Специфический суффозионный процесс в деятельном слое, приводящий к выносу наносов на растительный покров, не приводит к образованию выраженных форм рельефа, но имеет большое значение для перераспределения наносов на склонах и формирования почвенного профиля. Механизмы этого процесса, как и его связь с климатическими изменениями, требуют дальнейших исследований.

**Благодарности.** Авторы благодарят сотрудников НИС “Остров Самойловский”, полярной станции им. Ю.А. Хабарова и Усть-Ленского заповедника, руководство Российско-немецкой экспедиции “Лена”, а также коллегу канд. техн. наук О.М. Макарьеву за помощь в проведении полевых работ.

Полевые работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-05-00840), анализ структуры флювиальной сети выполнен по теме госзадания географического факультета МГУ (проект 121051100166-4). Гидрологические работы и обработка образцов выполнены по теме госзадания ИМЗ СО РАН (проект № АААА-А20-120111690008-9).

## Литература

- Архив погоды на острове Столб. – URL: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_на\\_о\\_Столб](https://rp5.ru/Архив_погоды_на_о_Столб) (дата обращения: 24.03.2023).
- Воскресенский С.С.** Динамическая геоморфология. Формирование склонов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1971, 230 с.
- Горохов А.Н., Федоров А.Н.** Современные тенденции изменения климата в Якутии // География и природ. ресурсы, 2018, № 2, с. 111–119.
- Государственная** геологическая карта м-ба 1:200 000, лист S-52-XXXI, XXXII. Первое изд. / Н.И. Гогина. Л., ВСЕГЕИ, 1978, 1 л.
- Катасонова Е.Г.** Роль термокарста в развитии деллей // Условия и особенности развития мерзлых толщ в Сибири и на Северо-Востоке. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 91–100.
- Любимов Б.П.** Типы оврагов и балок в тундре на севере Печорской низменности и Гыданского полуострова // Эрозия почв и русловые процессы. М., МГУ, 1970, вып. 1, с. 160–171.
- Маккаев Н.И.** Русло реки и эрозия в ее бассейне. М., Изд-во АН СССР, 1955, 346 с.
- Митт К.Л.** К вопросу о природе деллей Даалдынского района // Вопросы географии. М., Географгиз, 1959, сб. 46, с. 28–34.



- Основы** геоэрологии. Ч. 4. Динамическая геоэрология / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, 688 с.
- Тарбева А.М., Сурков В.В.** Четковидные русла малых рек зоны многолетней мерзлоты // География и природ. ресурсы, 2013, № 3, с. 27–32.
- Тарбева А.М., Трегубов О.Д., Лебедева Л.С.** Структура склоновой ложбинной сети криолитозоны в окрестностях г. Анадыря // Геоморфология, 2021, т. 52, № 1, с. 110–122.
- Температура** воздуха и осадки по месяцам и годам: Столб Остров (Якутия, Россия). – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history/21721.htm> (дата обращения: 24.03.2023).
- Термоэрозия** дисперсных пород / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 1982, 194 с.
- Antonova S., Sudhaus H., Strozzi T. et al.** Thaw subsidence of a yedoma landscape in Northern Siberia, measured in situ and estimated from TerraSAR-X Interferometry // Remote Sens., 2018, vol. 10, No. 4, 494.
- Arp C.D., Whitman M., Jones B. et al.** Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes // Biogeosciences, 2015, No. 12, p. 29–47.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J. et al.** Permafrost is warming at a global scale // Nature Commun., 2019, vol. 10, 264.
- Boike J., Nitzbon J., Anders K. et al.** A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River Delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote sensing data and land surface, snow, and permafrost models // Earth Syst. Sci. Data, 2019, vol. 11, p. 261–299.
- Bowden W.B., Gooseff M.N., Balsler A. et al.** Sediment and nutrient delivery from thermokarst features in the foothills of the North Slope, Alaska: Potential impacts on headwater stream ecosystems // J. Geophys. Res., 2008, vol. 113, G02026.
- CALM** North Summary Data Table. – URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm> (дата обращения: 11.03.2023).
- Fortier D., Allard M., Shur Y.** Observation of rapid drainage system development by thermal erosion of ice wedges on Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago // Permafr. Periglac. Process., 2007, vol. 18, p. 229–243.
- Global Terrestrial Network for Permafrost** – Database. – <http://gtnpdatabase.org/boreholes/view/53> (дата обращения: 07.03.2023).
- Godin E., Fortier D., Coulombe S.** Effects of thermo-erosion gullyng on hydrologic flow networks, discharge and soil loss // Environ. Res. Lett., 2014, vol. 9, 105010 (10 p.).
- Gooseff M.N., Balsler A., Bowden W.B., Jones J.B.** Effects of hillslope thermokarst in northern Alaska // Eos. AGU, 2009, vol. 90, No. 4, p. 29–30.
- Hall K.** Zoological erosion in permafrost environments: A possible origin of dells? // Polar Geogr., 1997, vol. 21, No. 1, p. 1–9.
- Holloway J.E., Lamoureux S.F., Montross S.N., Lafrenière M.J.** Climate and Terrain Characteristics Linked to Mud Ejection Occurrence in the Canadian High Arctic // Permafr. Periglac. Process., 2016, vol. 27, p. 204–218.
- Kane D.L., Hinzman L.D., Benson C.S., Liston G.E.** Snow hydrology of a headwater Arctic basin // Water Resour. Res., 1991, vol. 27, No. 6, p. 1099–1109.
- Levy J.S., Head J.W., Marchant D.R.** The role of thermal contraction crack polygons in cold-desert fluvial systems // Antarctic Sci., 2008, vol. 20, No. 6, p. 565–579.
- Liljedahl A., Boike J., Daanen R. et al.** Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nature Geosci., 2016, vol. 9, p. 312–318.
- McNamara J.P., Kane D.L., Hinzman L.D.** An analysis of an Arctic channel network using a digital elevation model // Geomorphology, 1999, No. 29, p. 339–353.
- Morgenstern A., Overduin P.P., Günther F. et al.** Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost // Permafr. Periglac. Process., 2021, vol. 32, p. 59–75.
- Paquette M., Fortier D., Vincent W. F.** Water tracks in the High Arctic: a hydrological network dominated by rapid subsurface flow through patterned ground // Arctic Sci., 2017, vol. 3, p. 334–353.
- Romanovsky V.E., Smith S.L., Isaksen K. et al.** Terrestrial Permafrost (in “State of the Climate in 2019”) // Bull. Am. Meteorol. Soc., 2020, vol. 101, No. 8, p. 265–270.
- Scott K.M.** Effects of permafrost on stream channel behavior in Arctic Alaska // Geol. Survey Professional Pap. 1068. Washington, U.S. Govern. Print. Office, 1978, 19 p.
- Shiklomanov N.I., Streletskiy D.A., Little J.D., Nelson F.E.** Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes // Geophys. Res. Lett., 2013, vol. 40, p. 6356–6361.
- Tarbeeva A., Lebedeva L., Efremov V. et al.** Water tracks in the lower Lena River basin // E3S Web. of Conf., 2020, vol. 163, 04007.
- Trochim E.D., Jorgenson M.T., Prakash A., Kane D.L.** Geomorphic and biophysical factors affecting water tracks in northern Alaska // Earth and Space Sci., 2016, No. 3, p. 123–141.

## References

- Weather archive on Stolb Island. – URL: [https://rp5.ru/Weather\\_archive\\_on\\_Stolb\\_Island](https://rp5.ru/Weather_archive_on_Stolb_Island) (last visited: 24.03.2023).
- Voskresenskij S.S. Dinamicheskaya geomorfologiya. Formirovanie sklonov [Dynamic geomorphology. Formation of slopes]. Moscow, Izd-vo Mosk. Univ., 1971, 230 p. (in Russian).
- Gorokhov A.N., Fedorov A.N. Current trends in climate change in Yakutia. Geography and Natural Resources, 2018, vol. 39, No. 2, p. 153–161.
- State Geological Map 1:200 000, sheet S-52-XXXI, XXXII. First edition. Author: N.I. Gogina. Leningrad, VSEGEI, 1978, 1 sheet (in Russian).
- Katsonova E.G. The role of thermokarst in the development of dells. In: Usloviya i osobennosti rasvitiya merzlykh tolshch v Sibirii i na Severo-Vostoke [Conditions and special features of the formation of frozen horizons in Siberia and the Far-East]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1963, p. 91–100 (in Russian).
- Lyubimov B.P. Types of gullies and valleys in the tundra in the north of the Pechora lowland and the Gydan peninsula. In: Eroziya pochv i ruslovyje processy [Soil erosion and fluvial processes]. Moscow, MGU, 1970, iss. 1, p. 160–171 (in Russian).
- Makkaveev N.I. Ruslo reki i eroziya v ee bassejne [River bed and erosion in its basin]. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1955, 346 p. (in Russian).
- Mitt K.L. On the question of the nature of dells in the Daaldynskiy region. In: Voprosy Geografii. Moscow, Geografiz, 1959, vol. 46, p. 28–34 (in Russian).
- Fundamentals of geocryology. Part 4. Dynamic geocryology. E.D. Ershov (Ed.). Moscow, Izd-vo Mosk. Univ., 2001, 688 p. (in Russian).
- Tarbeeva A.M., Surkov V.V. Beaded channels of small rivers in permafrost zones. Geography and Natural Resources, 2013, vol. 34, No. 3, p. 216–220.
- Tarbeeva A.M., Tregubov O.D., Lebedeva L.S. Patterns of the slope drainage network of the permafrost in the area of Anadyr. Geomorphology, 2021, vol. 52, No. 1, p. 110–122 (in Russian). DOI: 10.31857/S0435428121010132.

- Temperatura vozduha i osadki po mesyacam i godam: Stolb Ostrov (Yakutiya, Rossiya). Pogoda i Klimat [Air temperature and precipitation by month and year: Stolb Ostrov (Yakutia, Russia). Weather and Climate]. – URL: <http://www.pogodai-klimat.ru/history/21721.htm> (last visited: 24.03.2023).
- Termoeroziya dispersnyh porod [Thermal erosion of loose sediments]. E.D. Ershov (Ed.). Moscow, Izd-vo Mosk. Univ., 1982, 194 p. (in Russian).
- Antonova S., Sudhaus H., Strozzi T. et al. Thaw subsidence of a yedoma landscape in Northern Siberia, measured in situ and estimated from TerraSAR-X Interferometry. *Remote Sens.*, 2018, vol. 10, No. 4, p. 494. – <https://doi.org/10.3390/rs10040494>
- Arp C.D., Whitman M., Jones B. et al. Distribution and biophysical processes of beaded streams in Arctic permafrost landscapes. *Biogeosciences*, 2015, No. 12, p. 29–47.
- Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Commun.*, 2019, vol. 10, 264. – <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- Boike J., Nitzbon J., Anders K. et al. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River Delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote sensing data and land surface, snow, and permafrost models. *Earth Syst. Sci. Data*, 2019, vol. 11, p. 261–299. – <https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019>
- Bowden W.B., Gooseff M.N., Balsler A. et al. Sediment and nutrient delivery from thermokarst features in the foothills of the North Slope, Alaska: Potential impacts on headwater stream ecosystems. *J. Geophys. Res.*, 2008, vol. 113, G02026. DOI: 10.1029/2007JG000470.
- CALM North Summary Data Table. – URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.htm> (last visited: 11.03.2023).
- Fortier D., Allard M., Shur Y. Observation of rapid drainage system development by thermal erosion of ice wedges on Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago. *Permafr. Periglac. Process.*, 2007, vol. 18, p. 229–243.
- Global Terrestrial Network for Permafrost – Database. – <http://gtnpdatabase.org/boreholes/view/53> (last visited: 07.03.2023).
- Godin E., Fortier D., Coulombe S. Effects of thermo-erosion gully on hydrologic flow networks, discharge and soil loss. *Environ. Res. Lett.*, 2014, vol. 9, 105010 (10 p.). – <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105010>
- Gooseff M.N., Balsler A., Bowden W.B., Jones J.B. Effects of hillslope thermokarst in northern Alaska. *Eos AGU*, 2009, vol. 90, No. 4, p. 29–30.
- Hall K. Zoological erosion in permafrost environments: A possible origin of dells? *Polar Geogr.*, 1997, vol. 21, No. 1, p. 1–9.
- Holloway J.E., Lamoureux S.F., Montross S.N., Lafrenière M.J. Climate and Terrain Characteristics Linked to Mud Ejection Occurrence in the Canadian High Arctic. *Permafr. Periglac. Process.*, 2016, vol. 27, p. 204–218.
- Kane D.L., Hinzman L.D., Benson C.S., Liston G.E. Snow hydrology of a headwater Arctic basin. *Water Resour. Res.*, 1991, vol. 27, No. 6, p. 1099–1109.
- Levy J.S., Head J.W., Marchant D.R. The role of thermal contraction crack polygons in cold-desert fluvial systems. *Antarctic Sci.*, 2008, vol. 20, No. 6, p. 565–579. DOI: 10.1017/S0954102008001375.
- Liljedahl A., Boike J., Daanen R. et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geosci.*, 2016, vol. 9, p. 312–318.
- McNamara J.P., Kane D.L., Hinzman L.D. An analysis of an Arctic channel network using a digital elevation model. *Geomorphology*, 1999, No. 29, p. 339–353.
- Morgenstern A., Overduin P.P., Günther F. et al. Thermo-erosional valleys in Siberian ice-rich permafrost. *Permafr. Periglac. Process.*, 2021, vol. 32, p. 59–75.
- Paquette M., Fortier D., Vincent W.F. Water tracks in the High Arctic: a hydrological network dominated by rapid subsurface flow through patterned ground. *Arctic Science*, 2017, vol. 3, p. 334–353.
- Romanovsky V.E., Smith S.L., Isaksen K. et al. Terrestrial Permafrost (in “State of the Climate in 2019”). *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2020, vol. 101, No. 8, p. 265–270.
- Scott K.M. Effects of permafrost on stream channel behavior in Arctic Alaska. In: *Geological Survey Professional Pap.* 1068. Washington, U.S. Govern. Print. Office, 1978, 19 p.
- Shiklomanov N. I., Streletskiy D.A., Little J.D., Nelson F.E. Isotropic thaw subsidence in undisturbed permafrost landscapes. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, p. 6356–6361.
- Tarbeeva A., Lebedeva L., Efremov V. et al. Water tracks in the lower Lena River basin. In: *E3S Web. of Conf.*, 2020, vol. 163, 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/202016304007.
- Trochim E.D., Jorgenson M.T., Prakash A., Kane D.L. Geomorphic and biophysical factors affecting water tracks in northern Alaska. *Earth and Space Sci.*, 2016, No. 3, p. 123–141.

*Поступила в редакцию 21 августа 2021 г.,  
после доработки – 2 мая 2023 г.,  
принята к публикации 16 мая 2023 г.*