

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-199-220>

УДК 556.5.04; 556.538; 551.435.162



Сток воды, наносов и растворенных веществ в период снеготаяния в активно растущем овраге на побережье моря Лаптевых

А.М. Тарбеева¹✉, В.В. Шамо́в^{2, 3}, Л.С. Лебеде́ва²

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

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

³ *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия*

✉ amtarbeeva@geogr.msu.ru

ID AMT, 0000-0003-2001-8147; ВВШ, 0000-0001-9310-1836; ЛСЛ, 0000-0002-7498-9902

Аннотация. Для выявления взаимосвязей между динамикой оврага, оттаиванием почвы, стоком воды, наносов и растворенных веществ были проведены наблюдения во время половодья в активно растущем овраге вблизи пос. Тикси. В начале половодья скопление снега в овраге задерживает сток воды и наносов, защищает борта оврага от оттаивания, регулирует температуру воды. На пике половодья малая глубина оттаивания почвы приводит к концентрации поверхностного стока по ложбинам, способствуя росту узкой вершины оврага и размыву дна. По мере оттаивания почвы вода начинает фильтроваться в оттаивающем слое, что приводит к росту ее минерализации. Разгрузка фильтрующихся надмерзлотных вод вдоль бровки оврага способствует увлажнению, оттаиванию и оплыванию отложений на его бортах. После схода снега с водосбора и прохождения пика половодья сохраняющийся в овраге снег становится основным источником питания овражного водотока, способствуя снижению минерализации и охлаждению воды. Однако на фоне снижения расходов воды мощности овражного водотока оказывается недостаточно для выноса поступающего с бортов материала, который откладывается в днище и на конусе выноса. За период половодья из оврага было вынесено 6,4 т наносов, из которых 53 % поступили с водосбора и 47 % из самого оврага. 30 % вынесенных из оврага наносов осели на конусе выноса. Доля органического вещества в составе наносов изменялась от 11 до 80 %, существенно возрастая при малых значениях общей мутности, и в среднем за половодье составила 14 % от стока взвешенных наносов. Вынос растворенных веществ из оврага составил 0,8 т, около 95 % из которых поступили с водосбора.

Ключевые слова: овражная термоэрозия, взвешенные наносы, ионный паводок, динамика оврага, тоннельная эрозия, сезонное оттаивание, поверхностный сток, надмерзлотный сток, взвешенное органическое вещество, снег в овраге

Для цитирования: Тарбе́ева А.М., Шамо́в В.В., Лебеде́ва Л.С. Сток воды, наносов и растворенных веществ в период снеготаяния в активно растущем овраге на побережье моря Лаптевых. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2026;72(2):199–220. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-199-220>

Поступила 19.02.2026

После переработки 20.04.2026

Принята 26.04.2026

© Авторы, 2026

© Authors, 2026

Water, sediment, and dissolved substances runoff during snowmelt in an actively growing gully on the Laptev Sea coast


Anna M. Tarbeeva¹✉, Vladimir V. Shamov^{2,3}, Lyudmila S. Lebedeva²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

³ Pacific Geographical Institute Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

✉ amtarbeeva@geogr.msu.ru

 AMT, 0000-0003-2001-8147; VVS, 0000-0001-9310-1836; LSL, 0000-0002-7498-9902

Abstract. To identify the relationships between gully dynamics, snowmelt, soil thaw, runoff of water, sediment, and dissolved solids, observations were conducted during a snowmelt in a small catchment near the Tiksi settlement (Arctic Siberia). At the onset of the flood, snow filling the gully impedes water runoff, slowing the thawing of the gully sides and sediment supply to the watercourse. The shallow depth of soil thaw facilitates the concentration of surface flow in hollows, the growth of the narrow gully head, and the erosion of the bed. After the snow has melted from the catchment area and the flood peak has passed, the snow remaining in the gully becomes the main source of stream water, reducing mineralization and cooling of the water. Less than half of the suspended sediment passing through the gully mouth originated within the gully itself; most of it was transported from the catchment area. About 30 % of the removed sediment was deposited immediately downstream of the gully. Suspended organic matter accounted for approximately 14 % of the total suspended sediment discharge during the flood. Over 95 % of the dissolved solids discharge is generated in the catchment area and is determined by processes occurring there; only 5 % comes from the gully itself. The chemical composition of the stream water changes as snow melts and the soil in the catchment thaws. Calcium, magnesium, sodium, and sulfate ions are elevated at the very beginning of snowmelt; their concentrations decrease with increasing water flow, and then begin to increase again with soil thawing. Potassium and chloride ions have maximum concentrations at the beginning of the flow, which then decline. Bicarbonate and ammonium ions show no discernible trend. The active influx of sediment and organic matter released by intensified erosion due to permafrost degradation is limited by the frozen state of the sediments and snow filling the gully at the onset of the flood, and by the insufficient transport capacity of the stream during the subsequent warm period, leading to their accumulation. This inhibits downstream sediment transport under conditions of intensified exogenous processes driven by climate change.

Keywords: gully thermal erosion, suspended sediment, salt dilution gauging, gully dynamics, tunnel erosion, seasonal thawing, surface runoff, suprapermafrost runoff, suspended organic matter, snow in the gully

For citation: Tarbeeva A.M., Shamov V.V., Lebedeva L.S. Water, sediment, and dissolved substances runoff during snowmelt in an actively growing gully on the Laptev Sea coast. *Arctic and Antarctic Research*. 2026;72(2):199–220. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2026-72-2-199-220>

Received 19.02.2026

Revised 20.04.2026

Accepted 26.04.2026

Введение

В результате климатических изменений в Арктике меняются сроки и продолжительность фаз водного режима, внутригодовое распределение осадков и их долей в жидкой и твердой фазах, увеличиваются глубина и продолжительность оттаивания почвы, что приводит к увеличению подземной составляющей стока воды, высвобождению из мерзлых толщ углерода и других химических элементов и соединений, имеющих большое экологическое значение [1]. Одновременно отмечается увеличение активности процессов оползания деятельного слоя, образования тоннелей

в подземных льдах и других нарушениях почвенно-растительного покрова, которые служат очагами развития эрозионных форм рельефа — оврагов и рытвин [2–6]. Образование эрозионных форм приводит к увеличению расчлененности рельефа, концентрации поверхностного стока, размыву отложений, усилению транспортировки наносов и растворенных веществ. Эти процессы создают множество положительных и отрицательных обратных связей, требующих выявления и оценки для успешного прогноза изменений природной среды.

Большинство образующихся на фоне потепления эрозионных форм рельефа связаны с вытаяванием подземного льда и обусловлены увеличением тепловой, а не механической энергии водного потока [6]. Так как мощности водотока оказывается недостаточно для выноса сползающего со склонов материала, такие формы рельефа проявляют активность лишь в течение нескольких сезонов, пока обнажающиеся в их бортах подземные льды не окажутся перекрыты толщей сползающих со склонов отложений, превышающей глубину сезонного оттаивания. В результате этого происходит стабилизация и заполнение эрозионных форм. Так, один из оврагов на Аляске, образовавшийся в 2003 г., активно рос в 2004–2006 гг., а в 2007 г. начал зарастать [2]. На севере Якутии на отрогах Хараулахского хребта рост небольших эрозионных форм наблюдался в течение одного-двух сезонов после возникновения [6]. Исследованный в данной работе овраг у пос. Тикси испытывал максимальный рост в 2020–2022 гг., а затем скорости его роста замедлились [7]. Лишь в редких случаях овраги растут длительное время, хотя максимальные темпы их динамики также наблюдаются в первые годы после их возникновения [8].

Имеющиеся оценки выноса наносов из эрозионных форм основаны на расчете их объема. Так, из небольших эрозионных рытвин на севере Якутии за один-два теплых сезона выносятся до 60 м³ горных пород, включая лед [6]. Из оврага на Аляске за три сезона было вынесено 2000 м³ пород, включая лед [2]. Из оврага у пос. Тикси с 2020 по 2022 г. было вынесено около 1000 м³ отложений, не менее 40 % которых составлял лед [7].

Дальность транспортировки материала, поступающего из нарушений поверхности тундры, в том числе из эрозионных форм, зависит от транспортирующей способности водотока и емкости нижерасположенных участков русел [9]. Так как большинство естественных малых эрозионных форм расположены на пологих склонах в истоках рек [2, 6], основная часть выносимого материала оседает на склонах или на ближайших участках русел и пойм малых рек [6, 9]. Транспортировка наносов из оврагов в речную сеть ограничена снижением талого стока на фоне уменьшения снегозапасов и низкой паводковой активностью водотоков в тундре, которая может возрасти при увеличении интенсивности ливневых осадков [9].

Непосредственные наблюдения за стоком воды, наносов, растворенных веществ и динамикой оврагов в тундре, помимо труднодоступности объектов, осложняются неустойчивостью русла, наличием заполняющего русло снега, которые затрудняют измерения и их интерпретацию, в связи с чем оценки объемов и баланса материала и отдельных его составляющих единичны. Оценки выноса наносов на основе мониторинга проводились в связи с антропогенной активизацией эрозионных процессов на месторождениях Ямала [10, 11], а также в Чарской котловине [12, 13]. Часто оценки выноса взвешенных и растворенных веществ из оврагов и эрозионно-термокарстовых форм основываются на немногочисленных пробах, отобранных в летний период [2, 14].

Применение автономных регистраторов уровней, температуры, электропроводности воды упрощает проведение наблюдений, но требует разработки методик оборудования гидропостов и интерпретации получаемых данных в условиях заполненного снегом и неустойчивого русла и отрицательных температур. Целью исследования являлась количественная оценка и выявление взаимосвязей процессов динамики оврага со стоком воды, наносов и растворенных веществ, глубиной оттаивания и температурой почвы во время половодья, что поможет разработать методы мониторинга и прогнозирования изменения стока воды, наносов и овражной эрозии в криолитозоне.

Объект исследований

Исследуемый овраг (71,63° с. ш., 128,88° в. д.) расположен на окраине пос. Тикси (Республика Саха (Якутия)) на побережье одноименной бухты моря Лаптевых (рис. 1). Арктические широты и близость к морю обуславливают относительно влажный, но при этом холодный арктический морской климат исследуемой территории (табл. 1). Около половины годового количества осадков выпадает в виде снега, что определяет преобладание талого стока в питании водотоков. Положительная температура воздуха наблюдается с начала июня до конца сентября. В 2021–2022 гг. среднегодовые температуры воздуха были немного выше климатической нормы, годовое количество осадков было ниже нормы, при этом зима 2021/22 г. была мало-снежной — твердых осадков выпало около 52 мм в водном эквиваленте.

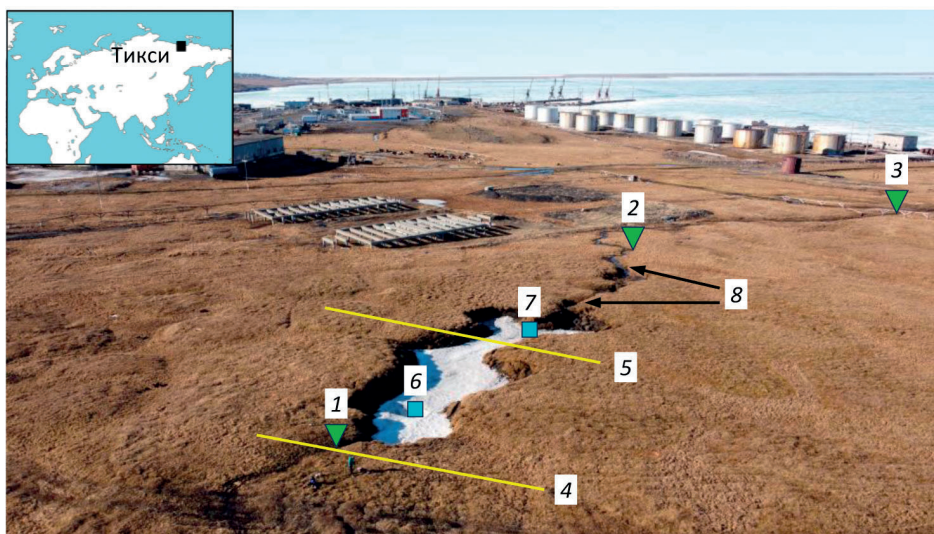


Рис. 1. Расположение исследуемого оврага и участков проведения измерений на панорамном аэрофотоснимке от 11.06.2022: треугольники — створы измерений: 1 — верхний; 2 — средний; 3 — нижний; желтые линии — профили измерения глубины оттаивания: 4 — над вершиной оврага; 5 — через центральную часть оврага; квадраты — снежные шурфы: 6 — верхний; 7 — нижний; 8 — тоннели. На врезке — расположение пос. Тикси на карте Евразии

Fig. 1. The location of the gully studied and the measurement sites on the aerial photo from June 11, 2022: triangles are gauging sections: 1 — upper; 2 — middle; 3 — lower; the yellow lines are thaw depth measurement profiles: 4 — above the top of the gully; 5 — through the central part of the gully; the squares are snow pits: 6 — upper; 7 — lower; 8 — tunnels. The inset shows the location of Tiksi settlement on the map of Eurasia

Таблица 1

Климатические характеристики по метеостанции Тикси¹

Table 1

Climate characteristics according to the Tiksi weather station¹

Климатические характеристики	Норма (1991–2020 гг.)	2021 г.	2022 г.
Среднегодовая температура воздуха, °С	–11,9	–11,4	–10,7
Годовая сумма осадков, мм	300,3	228,2	262,4
Снег, мм	157,2	103,5	72,0
Дождь, мм	143,1	124,7	190,4

Сплошная многолетняя мерзлота вблизи пос. Тикси имеет мощность около 600 м и температуру –11 °С. Толщина слоя сезонного оттаивания колеблется от 25 см в торфе до 1 м в галечно-валунных отложениях, а в суглинистых отложениях составляет 30–40 см [15], что определяет глубину залегания водоупора сезонных надмерзлотных вод, являющихся единственным источником подземного питания малых водотоков.

Исследуемый овраг расположен у подножья сопки Лялькина (абс. отм. вершины 206 м), на северо-западном склоне крутизной 9–11 градусов. Овраг прорезает склоновый шлейф, сложенный оторфованными пылеватыми суглинками мощностью около 4 м, содержащими полигонально-жильные льды, и подстилаемый выветрелыми палеозойскими алевролитами. Нижняя часть склона имеет полигональный рельеф: выпуклые полигоны с шагом 18–20 м чередуются с пологими ложбинами шириной 2–3 м, расположенными над жилами льда. Вверх по склону сопки рыхлый чехол становится грубообломочным, его мощность уменьшается. Уже в 20 м выше вершины оврага щебень вскрывается в дорожной колее на глубине около 40 см от поверхности. В непосредственной близости к оврагу растительный покров представлен осоково-кустарничковой тундрой с осокой и пушицей по ложбинам стока.

Овраг образовался в начале августа 2020 г. в результате обрушения кровли тоннеля, сформированного в голоценовых жильных льдах [7]. Осенью 2021 г. овраг имел длину около 50 м, максимальную ширину 13,7 м, максимальную глубину 4,1 м, объем 1059 м³ [7]. Вершина оврага представляла собой вертикальный уступ, образованный подземным льдом. Ниже открытой части оврага сохранялись остатки тоннеля, из которого поток выходил на поверхность на расстоянии около 120 м от вершины оврага (см. рис. 1). После выхода из тоннеля водоток разделяется на рукава, образуя область аккумуляции наносов — пологий конус выноса, а затем вновь собирается в единое русло, сложенное обломочным материалом, по которому течет до впадения в бухту Тикси.

Площадь водосбора оврага определяется неоднозначно из-за перераспределения склонового стока колеями автотрассы, проходящего в 20 м выше вершины оврага [7]. Естественная площадь водосбора в вершине оврага составляет 0,00079 км², при этом площадь водосбора с учетом полного перехвата стока колеями дороги в 400 раз больше (0,31 км²). При этом не весь сток с этой площади попадает в вершину оврага, т. к. перераспределяется по другим ложбинам, дренирующим склон. Доля стока, попадающего в вершину оврага, может изменяться по мере оттаивания почвы, изменения объема поверхностного стока, а также в зависимости от расположения колеи дороги.

¹ ВНИИГМИ-МЦД. Температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные). Режим доступа: <http://meteo.ru/data/temperature-precipitation/> (дата обращения: 30.11.2025).

Методы исследования

Полевые наблюдения проводились с 26 мая по 12 июня 2022 г. Измерения расходов, мутности, температуры и электропроводности воды, а также отбор проб производились в трех створах ручья (см. рис. 1).

Верхний створ расположен над вершиной оврага. Измерения гидрохимических характеристик и отбор проб воды на мутность производились непосредственно над эрозионным уступом в ложбине стока. Расходы воды до 4 июня измерялись в вершине оврага, а с 5 июня, когда сток над вершиной оврага начал фильтроваться в почву, — в колеях дороги, перехватывающей сток со склона, что позволило учесть весь сток воды, поступающий в овраг, включая фильтрационную составляющую. Средний створ расположен примерно в 10 м ниже выхода ручья из подземного тоннеля, выше участка разделения потока на рукава (конуса выноса). Нижний створ расположен ниже конуса выноса, в 120 м ниже выхода водотока из тоннеля. Здесь поток снова концентрируется в одном русле, сложенном глыбами и щебнем. Между средним и нижним створами ручей принимает справа временный водоток по ложбине стока.

Расходы воды измерялись объемным способом или методом ионного паводка² один раз в сутки в 13–15 часов во всех трех створах начиная с нижнего. Объемным способом измерялись небольшие (менее 1 л/с) расходы воды в вершине оврага в начале стока. При измерении расхода ионным паводком использовался раствор поваренной соли с концентрацией 100 г/л. Объем раствора варьировал в зависимости от расхода воды от 50 до 3000 мл. Длина участка смешения раствора с потоком воды составляла от 2 до 8 м. Значения электропроводности фиксировались каждую секунду с помощью портативного кондуктометра Hydromaster НМ-200. Длительность записи до восстановления исходных значений электропроводности изменялась от 1,5 до 7 минут.

Дополнительно в нижнем створе автоматическим барометрическим датчиком (диапазон измерений 0–4 м водного столба) с интервалом в 1 час измерялись уровень и температура воды с компенсацией атмосферного давления, полученного по аналогичному датчику на суше. В среднем и верхнем створах установка уровнемеров оказалась невозможной в связи с малой глубиной потока и неустойчивым руслом, при этом ход уровней в разных створах не был идентичен в связи с задержкой и отдачей стока снегом и запрудами. Поэтому при балансовых расчетах значения стока воды по каждому из створов определялись по измеренным расходам воды, которые принимались за среднесуточные значения. Такие расчеты имеют оценочный характер, но представляются приемлемыми для общей оценки стока в связи с практически одновременным измерением расходов воды во всех створах и отсутствием выраженного суточного хода уровней в течение большей части периода наблюдений (по данным единственного уровнемера). Для оценки точности таких расчетов для нижнего стока дополнительно был рассчитан сток воды по связи расход–уровень с использованием ежечасных показаний уровнемера, по которому был определен сток наносов с часовым разрешением, восстановленный по связи расходов воды с расходом наносов.

Одновременно с измерениями расходов воды при помощи кондуктометра определялись температура, рН и удельная электропроводность, и отбирались пробы воды объемом от 1 до 2 л на мутность и химический состав. Во избежание взмучивания воды при малой глубине потока, отбор проб проводился шприцом объемом 20 мл

² *Руководство по гидрологической практике. Том I. Гидрология: от измерений до гидрологической информации.* ВМО-№ 168. Всемирная метеорологическая организация; 2008. 317 с.

или мерным стаканом объемом 100 мл, с последующим переливанием в емкость для пробы. Все пробы на мутность в течение суток после отбора анализировались при помощи оптического турбидиметра (диапазон измерений 0–1000 NTU), а часть проб — дополнительно путем фильтрации воды и взвешивания остатка. Фильтрация проб проводилась через предварительно высушенные при температуре 105 °С и взвешенные стекловолоконные фильтры с диаметром пор 0,7 мкм. Во взвеси определялась доля органического вещества путем прокаливании фильтров при температуре 550 °С в течение 4 часов. Всего было отобрано 40 проб на мутность, из них профильтровано 23. Для балансовых расчетов оптическая мутность пересчитывалась в весовую путем построения зависимости [16]. Аналогичная зависимость связывала содержание взвешенного органического вещества с массой общей взвеси [17] и использовалась для расчета стока органического вещества. В аналитической лаборатории ИМЗ СО РАН методами титриметрии и капиллярного электрофореза определялось содержание макрокомпонентов химического состава воды в пробах. Всего проанализировано 27 проб, из них 23 пробы воды из ручья, три пробы снежного покрова и одна проба подземного льда.

На хорошо дренированных участках водосбора оврага один раз в 6 часов измерялась температура подстилающей поверхности, для чего под слоем мохово-лишайникового покрова на глубине 1–2 см были установлены логгеры температуры (диапазон измерения от –40 до +85 °С, погрешность 0,5 °С).

По двум профилям один раз в несколько дней проводились нивелировки поверхности рельефа с измерением глубины оттаивания почвы при помощи стального шупа (см. рис. 1). Первый профиль протяженностью 40,7 м пересекал овраг в средней части. Второй профиль протяженностью 30,85 м проходил над вершиной оврага через ложбину, по которой сток воды попадал в вершину оврага. Шаг измерений составлял 1 м.

В двух шурфах, заложенных в центральной и нижней частях заполненного снегом оврага, проводились описания строения снежной толщи и определялось наличие воды под снегом в (см. рис. 1).

Для наблюдения за динамикой оврага и снежного покрова один раз в несколько дней проводились повторные аэрофотосъемки с квадрокоптера. Сопоставление полученных ортофотопланов проводилось по опорным меткам, закрепленным на местности. Из-за наличия снега в овраге оценивались только изменения положения бровки оврага в плане.

Для характеристики метеорологических условий во время половодья использовались данные срочных наблюдений метеостанции Тикси (аэропорт)³, расположенной в 6 км севернее участка исследований.

Результаты

Метеорологические условия

В начале наблюдений температура воздуха колебалась около нулевых значений, опустившись 31 мая до –4,7 °С, когда выпал снег (0,9 мм) (рис. 2а). 1 июня дневная температура воздуха впервые повысилась до +2,2 °С, но 2 июня снова опустилась ниже нуля. С вечера 3 июня начался устойчивый рост температуры воздуха, которая больше не опускалась ниже нуля и достигла максимума в +15,3 °С в ясный день 5 июня. Небольшой дождь (0,5 мм) выпал 4 июня, и до 12 июня осадков не наблюдалось.

³ Архив погоды в Тикси (аэропорт). Режим доступа: [https://tp5.ru/Архив_погоды_v_Тикси_\(аэропорт\)](https://tp5.ru/Архив_погоды_v_Тикси_(аэропорт)) (дата обращения: 30.11.2025).

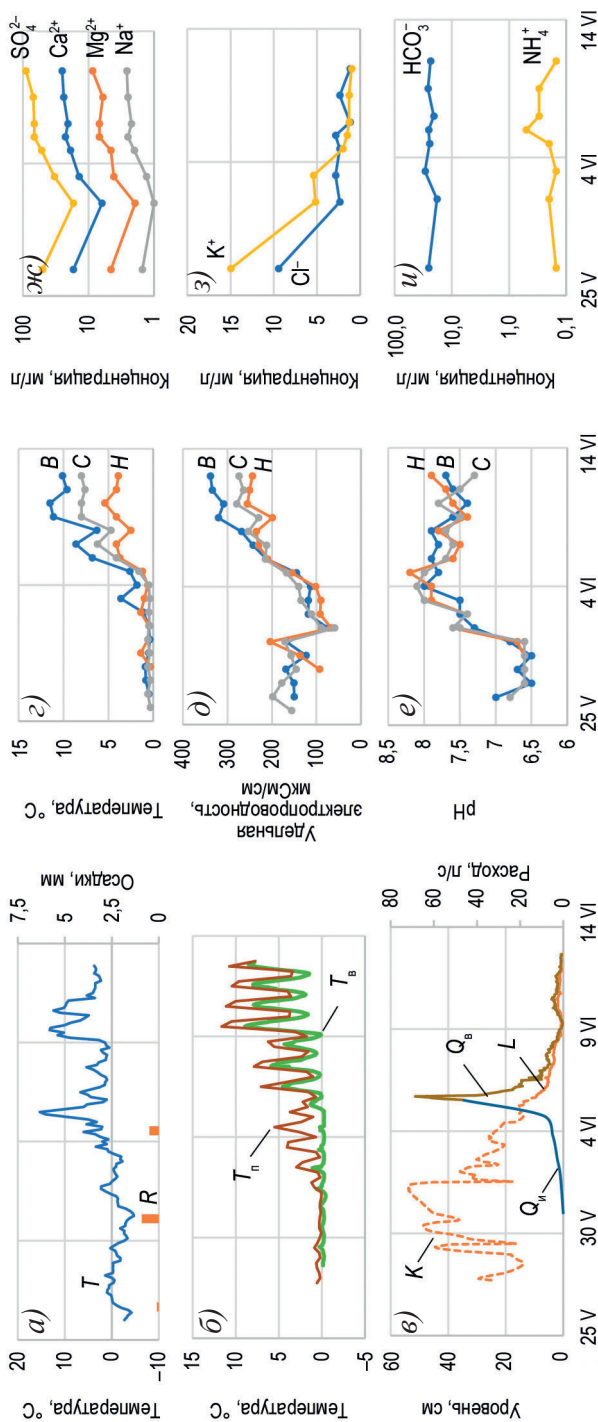


Рис. 2. Гидрологические и метеорологические характеристики периода снеготаяния: а — температура воздуха (T) и осадки (R) по метеостанции Тикси (аэропорт); б — температура воды (T_n) в русле ручья на нижнем створе, °С и температура подстилающей поверхности (T_b) на глубине 1 см (T_n), °С; в — криогенный напор воды в снежной толще до 5 июня (K), см вод. ст.; уровни воды над условной отметкой с 5 июня (L), см; измеренные расходы воды при наличии снега в русле до 5 июня (Q_h), л/с; восстановленные по уровням ежедневных расходов воды с 5 июня (Q_r), л/с; гидрохимические характеристики воды в верхнем (B), среднем (C) и нижнем (H) измерительных створах: z — температура, °С; d — удельная электропроводность, мкСм/см; e — водородный показатель pH; $ж-и$ — изменения концентраций отдельных ионов во времени, сгруппированных по характеру изменений

Fig. 2. Hydrological and meteorological characteristics of the snowmelt period: a — air temperature (T) and precipitation (R) according to the Tiksi weather station (airport); b — water temperature (T_n) in the stream at the lower gauging section, °C and Earth's surface temperature (T_b) at a depth of 1 cm, °C; v — cryogenic water pressure in the snow cover before June 5 (K), cm of water column; water levels above the conditional mark since June 5 (L), cm; measured water discharges in the presence of snow in the channel before June 5 (Q_h), l/s; hourly water discharges reconstructed based on levels since June 5 (Q_r), l/s; $z-e$ — hydrochemical characteristics of water in the upper (B), middle (C) and lower (H) gauging sections: z — temperature, °C; d — specific electrical conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$; e — pH; $ж-и$ — changes in the concentrations of individual ions over time, grouped according to the nature of the changes

Температура поверхности и оттаивание почвы

26 мая почва на водосборе была повсеместно мерзлой. Открытая поверхность торфяно-мохового покрова при этом имела околонулевые значения температуры, ее повышение вместе с выраженными суточными колебаниями началось 1 июня (см. рис. 2б).

Оттаивание почвы происходило неравномерно. Наиболее быстро почва оттаивала по обводненным ложбинам стока над вершиной оврага. К 8 июня глубина оттаивания почвы в ложбинах достигла 25–30 см, а к 12 июня оттаивание охватило межложбинные пространства и достигло 30–32 см (рис. 3а). В то же время в средней части оврага, где сток воды по ложбинам отсутствовал, даже к 12 июня глубина оттаивания почвы не превышала 5–8 см (рис. 3б).

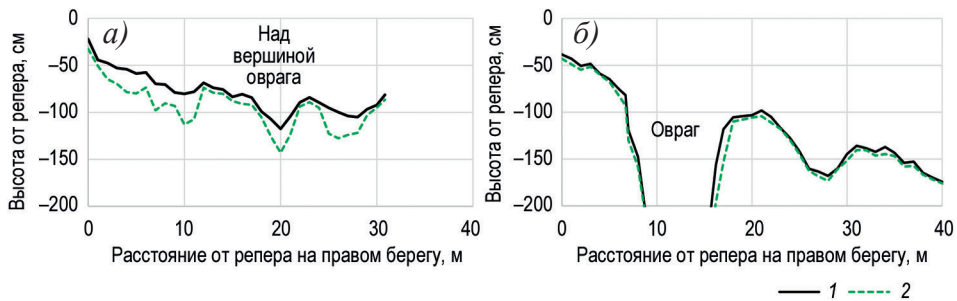


Рис. 3. Глубина оттаивания почвы на 12.06.2022: а — над вершиной оврага; б — в средней части оврага; 1 — поверхность почвы, 2 — подошва оттаявшего слоя

Fig. 3. Depth of soil thawing on 12.06.2022: а — above the gully head; б — in the middle part of the gully; 1 — soil surface, 2 — frost table

Снежный покров и лед в овраге и русле

26 мая снежный покров занимал 40–50 % площади водосбора, заполняя понижения рельефа и зоны ветровой тени, выпавший 31 мая снег быстро растаял. Овраг был заполнен снегом почти на всю глубину (3–4 м), поверхность снега постепенно оседала.

30 мая в шурфе, вырытом в снегу в нижней части оврага над тальвегом, были вскрыты субгоризонтальные прослои и линзы льда мощностью 1–2 см и вертикальные столбы льда шириной 10–15 см, маркирующие пути фильтрации талой воды. Нижние 5–10 см снежной толщи общей мощностью 1,35 м были насыщены водой. На бортах оврага в результате стекания талой воды наблюдалась корка льда толщиной до 2–3 см.

2 июня в другом шурфе, вырытом в центральной части оврага над тальвегом, снежная толща мощностью 2,5 м также содержала многочисленные прослои и линзы льда до 3 см толщиной, в нижней части была насыщена водой. 3 июня уровень воды в шурфе установился в 40 см над дном оврага и наблюдалось слабое течение (рис. 4а). 4 июня вода из шурфа ушла, оставив следы от взвешенных наносов (рис. 4б), водоток тек по дну оврага, сформировав тоннель под толщей снега. В то же время вода заполнила шурф, расположенный ниже по течению.

Русло ручья ниже оврага также было забито снегом почти на всем протяжении. Вблизи нижнего створа ручья 26 мая русло было заполнено льдом толщиной около 0,2 м, перекрытым снегом высотой около 0,5 м (рис. 4в). Нижние 5 см снежной толщи были насыщены водой, уровень которой постепенно повышался, и 3 июня

вода местами вышла на поверхность снега (рис. 4з). Снег и лед в русле ручья вблизи нижнего створа полностью растаяли в результате прохождения пика половодья 5 июня (рис. 4и). К этому времени снег растаял на всем водосборе и сохранился только в самом овраге (см. рис. 1).

5 июня, во время прохождения максимальных расходов воды, ниже открытой части оврага в тальвеге ручья между остатками тоннеля сформировались запруды со стоячей водой (рис. 4б, в). Тоннели были забиты льдом и не могли пропускать возросший объем воды, поэтому над ними сформировался поверхностный переток (рис. 4в). По мере протаивания льда в тоннелях уровень воды в запрудах начал понижаться (рис. 4д), и к 8 июня на участке тоннелей сток полностью перешел в подземный (рис. 4е).

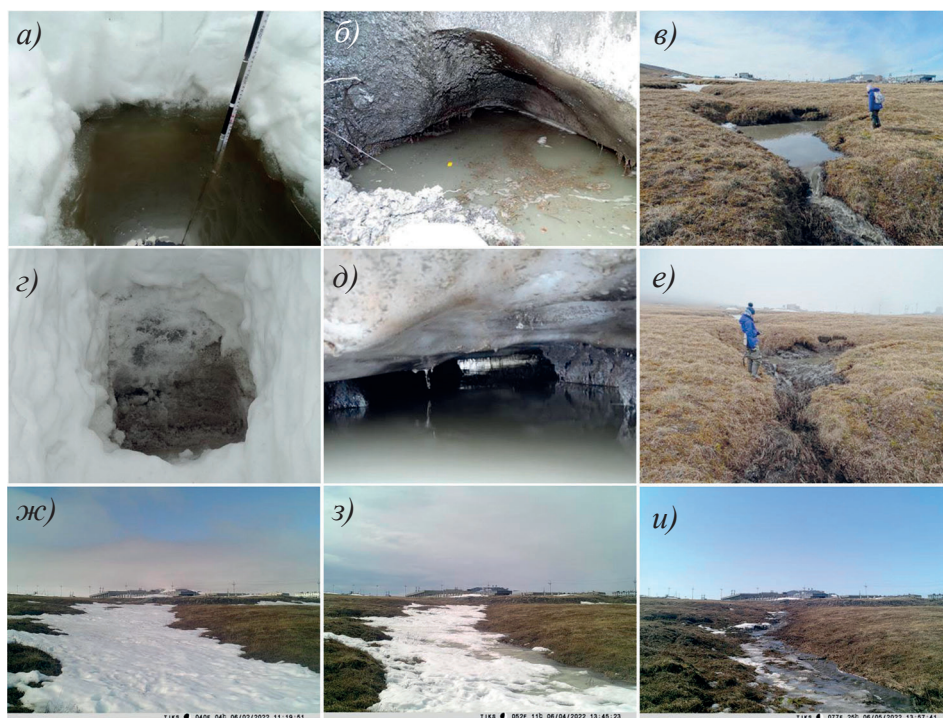


Рис. 4. Задержание воды снегом и льдом в овраге, тоннелях и русле ручья: *а* и *з* — шурф в центральной части оврага: *а* — заполненный водой на 40 см 03.06.2022, *з* — следы ухода воды на 04.06.22; *б* и *д* — оттаивание верхнего тоннеля: *б* — скопление воды перед входом в тоннель 06.06.22, *д* — сквозной тоннель на 7.06.22; *в* и *е* — спуск небольшого озера между тоннелями: *в* — озеро до спуска 06.06.22, *е* — обсохшая котловина после спуска озера 08.06.22; *ж-и* — динамика таяния снега, заполнявшего русло у нижнего створа: *ж* — 02.06.2022, *з* — 04.06.2022, *и* — 05.06.2022

Fig. 4. Water retention by snow and ice in the gully, tunnels and stream channel: *a* and *z* — pit in the central part of the gully: *a* — filled with 40 cm of water on 03/06/2022; *z* — traces of water drainage on 04/06/22; *b* and *d* — thawing of the upper tunnel: *b* — accumulation of water in front of the tunnel entrance on 06/06/22, *d* — through tunnel on 07/06/22; *v* and *e* — drainage of a small lake between the tunnels: *v* — lake before drainage on 06/06/22, *e* — dried-up lake basin on 08/06/22; *ж-и* — dynamics of melting of snow that filled the channel near the lower gauging section: *ж* — 02/06/2022, *з* — 04/06/2022, *и* — 05.06.2022

Изменение уровней и расходов воды

До 31 мая сток воды отсутствовал в вершине оврага — в ложбине наблюдались лишь небольшие обводненные понижения. Слабый (не поддающийся измерению) сток наблюдался в среднем створе. У нижнего створа русло было забито насыщенным водой снегом, в толще которого наблюдалось слабое течение. Даже несмотря на падение температуры воздуха до $-4,7$ °C 31 мая, сток воды в районе среднего и нижнего створов полностью не прекращался, т. к. вода в снежной толще в овраге и в русле у нижнего створа не замерзала.

Стабильный сток воды во всех трех створах ручья начался 1 июня. До 5 июня вблизи нижнего створа на поверхности насыщенного водой снега в ночные часы образовывалась ледяная корка, которая утром оттаивала. Периодическое замерзание и оттаивание ледяной корки приводило к изменению давления на установленном в русле ручья датчике уровня: оно повышалось в ночные часы и резко снижалось утром (рис. 2а). Максимальное повышение давления наблюдалось при опускании температуры воздуха до $-4,7$ °C 31 мая и соответствовало 0,52 м водного столба над условной отметкой, тогда как максимальная глубина воды на пике половодья 5 июня составляла 0,15 м над условной отметкой. Таким образом, показания уровнемера, установленного в заснеженном русле, до 5 июня отражали не изменения расходов воды, а суточные колебания криогенного напора. Начиная с 5 июня суточные колебания уровня воды не прослеживались, что объясняется практически полным сходом снежного покрова с водосбора.

До 4 июня снег, заполнявший овраг, задерживал сток воды, что отражалось в уменьшении расходов воды от верхнего к среднему створу (табл. 2). Задержка стока выражалась в скоплении воды в снежной толще, наблюдавшемся в шурфах в тальвеге оврага. 5 июня наблюдался пик расходов воды, но сток воды в среднем створе стал выше, чем в верхнем, что говорит о спуске воды, накопившейся в толще снега в овраге.

С 6 по 9 июня разница в стоке воды между створами колебалась то в положительную, то в отрицательную сторону, что можно объяснить образованием и спуском запруд перед тоннелями.

С 10 июня сток воды в среднем створе стал устойчиво выше, чем в верхнем и нижнем, что обусловлено сокращением поверхностного стока с водосбора и увеличением стока, поступающего от таяния снега в овраге. Снег становится основным источником питания водотока, отдавая до 180 м³ воды в сутки. Снижение стока воды ниже оврага можно объяснить как недостаточной точностью измерений, так и его рассредоточением и потерей в оттаявшем конусе выноса.

Температура воды

Температура воды по всем створам направленно росла с 1 по 12 июня, при этом ее наибольшие значения наблюдались в верхнем створе, где вода текла по хорошо прогретым дорожным колеям и склону, а минимальные — в среднем створе, где поток выходил из заснеженного оврага и ледяных тоннелей (рис. 2б).

По данным ежечасных измерений в нижнем створе, температура воды имела выраженный суточный ход и до 5 июня, пока в русле сохранялся снег, опускалась в ночные часы до околонулевых значений (рис. 2б). После 5 июня, когда прошел пик расходов воды, минимальные температуры воды, как и максимальные, устойчиво росли и имели положительные значения, что объясняется потерей контакта водотока со льдом и снегом и образованием оттаявшего слоя отложений в русле ручья.

Таблица 2
Динамика суточного объема стока воды, наносов и растворенных веществ по измерительным створам и балансы на участках между ними
Table 2

Дата	Сток воды в створе, м ³ /сут			Сток наносов в створе, кг/сут			Баланс наносов*, кг/сут			Сток растворенных веществ, кг		
	верхний	средний	нижний	верхний	средний	нижний	верхний	средний	нижний	верхний	средний	нижний
31.05.2022	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0	0,0
01.06.2022	26,0	8,6	121,0	0,9	0,0	3,9	-17,4	-0,9	3,9	1,5	-**	6,3
02.06.2022	51,6	17,3	231,6	0,0	0,0	0,0	-34,3	0,0	0,0	3,8	-**	16,5
03.06.2022	82,3	47,5	418,2	2,7	1,9	13,3	-34,8	-0,8	11,3	7,4	2,8	37,8
04.06.2022	152,1	207,4	813,0	5,1	7,8	29,8	55,3	2,7	22,0	14,2	16,1	80,0
05.06.2022	3185,6	3792,1	3467,2	3115,7	4506,8	3290,3	606,5	1391,2	-1216,6	308,7	363,8	369,6
06.06.2022	1275,3	1271,8	1534,5	207,7	1167,5	899,1	-3,5	959,7	-268,4	168,3	146,6	198,6
07.06.2022	598,8	635,9	626,4	37,2	257,7	158,6	37,2	234,0	-99,0	93,5	88,8	75,3
08.06.2022	209,1	222,9	226,4	13,8	55,9	13,1	13,8	48,4	-42,8	35,1	29,2	28,6
09.06.2022	234,1	219,5	214,3	-14,7	44,9	15,2	-14,7	37,3	-29,7	42,0	26,9	28,4
10.06.2022	257,5	339,6	315,4	82,1	99,4	39,8	82,1	91,2	-59,6	46,8	46,4	44,9
11.06.2022	190,1	248,8	128,7	58,8	93,5	26,1	58,8	87,5	-67,4	35,0	37,5	19,6
12.06.2022	88,1	269,6	140,8	181,4	150,3	7,3	181,4	147,5	-143,0	16,2	40,7	21,5
Итого	6350	7281	8237	930,4	6386	4496	2997,8	2997,8	-1889,2	772,6	798,7***	927,1

Примечание. * положительные значения — вынос, отрицательные значения — аккумуляция; ** не измерялся; *** без учета стока до 3 июня.

Note. * positive values — removal, negative values — accumulation; ** not measured; *** excluding runoff until June 3.

Сток растворенных веществ

Удельная электропроводность (являющаяся индикатором минерализации) и концентрации основных ионов в воде ручья даже в начале стока были существенно выше, чем в исходном снеге и льду (табл. 3). При этом удельная электропроводность воды снижалась до 1 июня по мере поступления талой пресной воды (рис. 2д).

С 1 июня, с ростом температуры почвы и увеличением глубины оттаивания, удельная электропроводность и минерализация воды устойчиво росли во всех створах, существенно превысив значения начала снеготаяния. До 6 июня значения минерализации в разных створах были близки, немного повышаясь к нижнему створу, а с 7 июня в верхнем створе ручья стали существенно выше, чем в нижнем и особенно среднем створах. Повышение минерализации в верхнем створе обусловлено переходом поверхностного стока на водосборе в подземный (надмерзлотный), а снижение минерализации в среднем и нижнем створах — существенной долей воды, поступающей от таяния снега в овраге. Аналогичный ход имели концентрации в воде Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ , SO_4^{2-} (рис. 2ж), а также pH (рис. 2е). Иначе вели себя K^+ и Cl^- , максимумы концентрации которых наблюдались в начале снеготаяния, а затем направленно снижались (рис. 2з). NH_4^+ и HCO_3^- не имели выраженных трендов в течение периода наблюдений (рис. 2и).

Таблица 3

Средние концентрации и сумма основных ионов (минерализация) в снеге, во льду и в воде ручья по створам в разные периоды половодья

Table 3

Average concentrations and the sum of major ions (mineralization) in snow, ice, and stream water at gauging sections in different flood stages

	Концентрация, мг/л								Сумма ионов
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	NH_4^+	HCO_3^-	SO_4^-	Cl^-	
27 мая — 1 июня									
Верхний створ	11,3	4,0	1,1	5,5	0,6	41,7	17,5	3,6	85,1
Нижний створ	11,6	3,3	1,3	10,1	0,2	21,9	33,5	5,9	87,7
3–5 июня									
Верхний створ	15,1	4,3	1,3	3,5	0,2	35,7	31,0	2,0	93,0
Средний створ	12,2	3,9	1,3	3,3	0,2	18,7	36,0	2,1	77,8
Нижний створ	16,4	4,3	1,7	3,7	0,2	27,1	42,5	1,9	97,7
6–7 июня									
Верхний створ	24,9	7,5	2,4	1,4	0,1	30,3	75,5	2,0	144,1
Средний створ	22,6	6,8	2,3	1,3	0,5	20,2	71,0	2,8	127,4
Нижний створ	21,6	6,8	2,4	1,4	0,4	23,2	67,0	2,0	124,8
9–11 июня									
Верхний створ	33,9	9,1	3,0	0,9	0,1	37,0	96,0	1,9	181,7
Средний створ	23,5	7,4	2,5	1,0	0,2	20,7	80,0	1,4	136,7
Нижний створ	24,6	7,4	2,6	1,2	0,2	24,9	80,0	1,8	142,5
Лед и снег									
Подземный лед	2,3	0,9	3,2	2,1	1,0	10,8	5,0	7,1	32,4
Снег (28–31 мая)	1,5	0,2	0,4	0,2	0,1	5,8	0,4	0,4	8,9

На протяжении половодья произошла смена преобладающих анионов в составе воды: на ранней стадии преобладали гидрокарбонаты, а с 7 июня во всех створах доминировали сульфаты (табл. 3), что связано с поступлением этих соединений из отложений формирующегося сезонно-талого слоя.

Всего за период половодья сток растворенных веществ в вершине оврага (в верхнем створе) составил около 0,77 т, при выходе из оврага (в среднем створе) — около 0,8 т (до 3 июня на среднем створе измерения не проводились, но объем выноса был небольшим) и 0,93 т ниже конуса выноса в нижнем створе (табл. 3). Таким образом, преобладающая часть растворенных веществ поступила с водосбора, а не из оврага. На пике половодья 5 июня было вынесено 40–46 % (в зависимости от створа) общего стока растворенных веществ за время половодья.

Мутность и взвешенное органическое вещество

Мутность воды на подъеме половодья мало отличалась по длине ручья и росла синхронно с расходами воды до 5 июня (рис. 5). Высокие расходы воды на пике половодья привели к увеличению мутности в верхнем и среднем створах, где располагались основные источники наносов — колеи дороги, а также борта и днище оврага. Максимум мутности наблюдался 5 июня и в среднем створе превысил 1270 мг/л. По мере удаления от источников наносов и уменьшения уклонов потока к нижнему створу мутность воды снижалась. На спаде половодья мутность воды в целом понижалась, но различия в ее значениях между створами усиливались. В верхнем створе общее снижение расходов воды и переход значительной части поверхностного стока в подземный (надмерзлотный), а также наличие шероховатой травянистой растительности в ложбине, подводящей воду к вершине оврага, привели к резкому сокращению мутности — ее минимальные измеренные значения 10 июня составили 5,3 мг/л. Снижению мутности способствовало также формирование отстойки из щебня в колеях дороги, собиравшей сток воды выше оврага. Тогда как в среднем створе ручья, расположенном ниже оврага и тоннелей, где началось оттаивание и оплывание отложений на склонах, на спаде половодья мутность воды была выше, чем в других створах. Вероятно, спуск запруд привел к замедлению снижения мутности воды в среднем створе 7 июня (см. рис. 5а). По мере удаления от оврага часть наносов аккумулировалась, и к нижнему створу мутность воды снижалась, хотя оставалась существенно выше, чем в вершине оврага. Несмотря

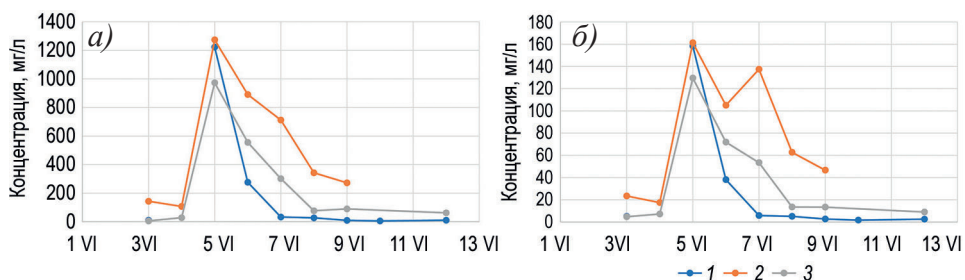


Рис. 5. Изменение общей мутности *а*) и взвешенного органического вещества *б*) во время половодья в трех измерительных створах: 1 — верхнем; 2 — среднем; 3 — нижнем

Fig. 5. Changes in total suspended matter *a*) and suspended organic matter *b*) during snowmelt at three gauging sections: 1 — upper; 2 — middle; 3 — lower

на общую связь мутности с расходами воды, в среднем и нижнем створах на спаде половодья не произошло уменьшения мутности до значений, соответствовавших аналогичным расходам воды на подъеме половодья, т. е. для связи расхода и мутности воды наблюдался гистерезис против часовой стрелки.

Содержание взвешенного органического вещества имеет прямую связь с общей мутностью и в целом аналогичный режим изменения по мере прохождения половодья и между створами (рис. 5б). При этом доля органического вещества при уменьшении мутности возрастает, что можно объяснить его меньшей плотностью и большей подвижностью при малых скоростях потока по сравнению с минеральными частицами. Максимальная концентрация в потоке взвешенного органического вещества, как и общей мутности, наблюдалась на пике половодья и достигла в среднем створе 161,2 мг/л, что составляло 12,7 % от общей мутности. Тогда как в начале стока 3 июня при низких значениях мутности доля органики доходила до 80 % от общей взвеси.

При этом во время подъема мутности 7 июня повышение концентрации органического вещества было выражено гораздо сильнее, чем рост общей мутности в среднем створе (см. рис. 5), что можно связать с повышенной долей органического вещества в воде спущенных запруд и тоннелях ниже оврага, возможно в связи со спецификой его накопления в запрудах.

По данным расчетов по измеренным значениям, за период половодья (с 1 по 12 июня) из оврага было вынесено 6,4 т наносов, из которых из самого оврага и тоннелей поступило 3,0 т, а еще 3,4 т поступили с расположенной выше части водосбора, в основном из дорожных колеи. 1,9 т наносов осели на конусе выноса (на участке между средним и нижним створами протяженностью 120 м) (табл. 2). Около 70 % всего стока взвешенных наносов было вынесено 5 июня. Около 14 % от общего стока взвешенных наносов за половодье составило органическое вещество.

Через нижний створ, расположенный ниже конуса выноса, согласно расчетам по измеренным значениям, прошло 4,5 т наносов, тогда как по данным расчетов по восстановленным ежечасным значениям расходов и мутности, сток взвешенных наносов за период половодья на нижнем створе составил 4,2 т. Таким образом, разница в расчетах разными методами не превышает 7 %.

Динамика оврага

Динамика вершины оврага не наблюдалась до 8 июня, когда в ложбине, по которой сток попадал в вершину, произошел обвал блока льда и перекрывающих его отложений. Длина обвалившегося блока составила около 2 м, ширина около 1 м и высота около 2 м. Упавший блок образовал узкий «нос» оврага, продвинувшийся вверх по ложбине стока (рис. 6). Вероятно, вода, поступающая в овраг в начале стока преимущественно по ложбине, и дальнейшая ее фильтрация под днищем ложбины приводили к постепенному расширению трещин в подземных льдах, что и стало причиной обрушения блока. В дальнейшем рассредоточение стока в оттаявшем слое почвы привело к высачиванию воды по кровле мерзлых пород по всему фронту уступа в вершинной части оврага, что способствовало оттаиванию и оплыванию поверхностного слоя отложений на незадернованных бортах оврага. Борты оврага также оттаивали от воздействия прямых солнечных лучей, но большая часть их поверхности была закрыта снегом. Поэтому общая динамика бортов оврага за период половодья была незначительной.



Рис. 6. Обрушение блока отложений в вершине оврага (вертикальная стрелка): а — 04.06.2022; б — 08.06.2022

Fig. 6. Collapse of a sediment block at the gully head (vertical arrow): а — 04.06.2022; б — 08.06.2022

Основная динамика оврага была сосредоточена в его тальвеге, и именно оттуда был вынесен основной объем наносов половодья. Активные процессы шли под снежной толщей в днище оврага и в ледяных тоннелях ниже него. 4 июня после ухода воды из днища оврага в тальвеге на дне шурфа наблюдался слой талых илстых наносов мощностью около 10 см, что свидетельствует о перемещении наносов под снегом. Тепловая и механическая энергия водного потока также расходовалась на расширение подземных тоннелей, по которым происходил спуск временных запруд, наиболее активное с 6 по 8 июня.

Обсуждение результатов

Несмотря на то, что в отдельные годы объем ливневого стока может превышать объем талого [9], в многолетнем плане половодье остается основным гидрологическим событием в арктических широтах [10, 18, 19]. При этом процессы формирования стока воды и наносов в половодье существенно отличаются от процессов, происходящих во время летних паводков. Важнейшими факторами, влияющими на сток воды, наносов и растворенных веществ, а также изменения уровня, температуры, минерализации воды и динамику исследуемого оврага во время половодья, являются снегозапасы и режим оттаивания почвы (табл. 4).

Запас снега с точки зрения его влияния на указанные процессы можно разделить на две составляющие: снежный покров на водосборе и снег, накопленный непосредственно в овраге и русле ручья. Снег на водосборе сходит в первую очередь и обеспечивает максимальные расходы воды половодья, тогда как снег в русле и овраге оказывает регулирующее влияние на сток воды и наносов.

В начальной фазе половодья снег в русле сдерживает сток фильтрующейся через него воды, не дает ей существенно прогреться, но также и замерзает при непродолжительном понижении температуры воздуха. На спаде половодья, когда сток воды в вершину оврага сильно сокращается, снег в овраге становится основным источником питания водотока.

Если считать, что овраг у пос. Тикси был заполнен снегом по бровки, то при объеме оврага около 1000 м³ [7] и средней плотности снега в овраге 0,5 г/см³ [10] запас воды в снеге оврага до начала снеготаяния можно оценить в 500 м³, что составляет

Таблица 4

Принципиальная схема соотношения динамики снежного покрова, оттаивания почвы, стока, стока наносов, растворенных веществ и динамики оврага по мере прохождения половодья

Table 4

Schematic diagram of the relationship between the dynamics of snow cover, soil thawing, runoff of water, sediment and dissolved solids, and gully dynamics during the spring flood progress

	Начало половодья	Пик половодья	Спад половодья
Снег в овраге	Много (задерживает сток воды и наносов)	Средне (защищает борта от оттаивания)	Мало (служит основным источником воды)
Снег на водосборе	Формирует пик расходов половодья, дает суточный ход уровня	Отсутствует	Отсутствует
Оттаивание почвы	Отсутствует	Неглубокое	Среднее
Сток воды на водосборе	Низкий поверхностный	Высокий поверхностный	Средний подземный
Сток наносов	Низкий, с водосбора	Высокий, размыв дна и вершины оврага	Средний, с бортов оврага
Сток растворенных веществ	Низкий, из снега и с поверхности почвы	Средний, из оттаивающей почвы	Высокий, из почвы и с бортов оврага
Динамика оврага	Отсутствует	Рост вершины, углубление оврага	Оплывание бортов, расширение оврага

около 7 % от общего стока воды из оврага за половодье. Разница в стоке между верхним и средним створами по балансовым расчетам дает более высокое значение — около 900 м³ (табл. 2). При этом последняя оценка включает воду, поступившую с водосбора и накопившуюся в овраге под снегом до начала стока. Задержание свежевыпавшим снегом до 10 м³ воды отмечалось ранее на оврагах Чарской котловины [12].

Лед, заполняющий тоннели и подземные полости в толще мерзлых пород, образование которого происходит как осенью, так и в начале стока [13], также регулирует сток воды, создавая временные плотины и изменяя пути течения воды по сравнению с теми, которые формируются к концу теплого сезона. На таяние льда, так же как и снега, расходуется значительное количество тепловой энергии водного потока, что приводит к тому, что прогревание воды в русле начинается на несколько дней позже, чем прогревание поверхности почвы на водосборе.

Заполняющий овраг снег замедляет оттаивание бортов оврага, снижает площадь и время контакта водотока с отложениями, что приводит к уменьшению стока наносов в начальной фазе половодья и образованию петли гистерезиса связи расхода и мутности воды, направленной против часовой стрелки [20]. Задержка снегом от 83 до 97 % стока наносов на начальных этапах половодья отмечалась в оврагах Ямала и выражалась в существенном уменьшении мутности выше и ниже заполненного снегом оврага [11].

Менее половины (47 %) взвешенных наносов, вынесенных из оврага, поступили из самого оврага, а 53 % наносов были принесены с водосбора, в основном из дорожных колея. Эту часть наносов можно считать антропогенной составляющей, т. к. сток

наносов из ненарушенных участков тундры — минимален [10]. Максимальная мутность потока и 70 % стока взвешенных наносов наблюдалась 5 июня на пике половодья при максимальной транспортирующей способности потока, несмотря на еще неглубокое оттаивание почвы, снижавшее их мобильность. Увеличение поступления твердого материала при оттаивании склонов оврага не привело к увеличению стока наносов, т. к. на фоне снижения транспортирующей способности потока поступающий материал оседал в самом овраге или на конусе выноса, где аккумулировалось 30 % объема поступающих наносов. Дальнейшая транспортировка этого материала возможна только при летних паводках, если он не будет закреплен растительностью. Это еще раз подтверждает, что поступление наносов из оврагов, образующихся на фоне деградации мерзлых пород, ограничивается задерживающим влиянием снега в овраге и русле в начале половодья и недостаточной транспортирующей способностью водотоков в последующий теплый период, что может измениться в условиях увеличения интенсивности летних осадков [9].

Диапазон изменения доли взвешенного органического вещества от общей мутности (от 11 до 80 %) согласуется с оценками для других водотоков криолитозоны (16,4–74,1 %) [17]. При этом среднее за половодье содержание органического вещества в наносах соответствует среднему его содержанию в размываемых в овраге отложениях, изменяющемуся по разрезу от 7 до 20 % [7].

Более 95 % растворенных веществ, вынесенных из оврага, поступили с водосбора, что объясняется более длительным контактом воды с отложениями на водосборе, по сравнению с быстрым прохождением потока по руслу оврага. Поэтому изменения состава и концентраций растворенных веществ в значительной степени определялись процессами на водосборе, а не в овраге, по крайней мере во время половодья. Существенное увеличение концентраций отдельных химических элементов ниже оврага на Аляске отмечалось в летний период [2], что, вероятно, объясняется более долгим присутствием воды в овраге в связи с большей глубиной оттаивания его бортов в летний период в отличие от периода половодья, когда глубина оттаивания склонов оврага минимальна и происходит значительное опреснение воды в результате таяния снега в овраге.

Гидрохимические характеристики водотоков являются индикаторами смены процессов формирования стока. Повышенные значения электропроводности, рН и концентрации ряда растворенных веществ в самом начале половодья (рис. 2*д–ж*) согласуются с эффектом первоочередного вымывания химических соединений, накопленных за зимний период в снежной толще [21]. Этот эффект усиливается вблизи моря, где осадки имеют повышенные содержания отдельных элементов [22], а также на участках с повышенной аккумуляцией снега [23] — а именно такими участками являются заполненные снегом овраг и русло ручья. Высокие концентрации химических элементов в начале снеготаяния могут быть также связаны с вымыванием талой водой веществ, накопившихся в осеннее и весеннее время на поверхности почвы [23]. Направленный рост минерализации и преобладание сульфат-кальциево-магниевого состава воды на спаде половодья отражают переход от поверхностного к подземному стоку по мере оттаивания почвы [23]. По-видимому, такие изменения химического состава воды являются типичными, т. к. аналогичный ход изменения концентрации веществ и рН отмечался на водотоках вблизи северного побережья Канады [23, Fig. 6]. В отличие от процессов на севере Канады, где в начале снеготаяния преобладали ионы натрия и хлора, а в конце — кальция и магния, в на-

шем случае в начале стока вместо натрия преобладал калий, тогда как натрий, как и большинство остальных ионов, возрастал на спаде половодья (рис. 2ж–и). Поскольку на спаде половодья преобладали растворенные вещества, поступающие из оттаявшей минеральной почвы, а в начале снеготаяния — из снега и с поверхности почвы, можно предположить, что калий и хлор имеют атмосферное происхождение и накапливаются в снежном покрове и на поверхности почвы. Отсутствие явной направленности изменения концентраций аммония и гидрокарбонатов связывают с их вовлеченностью в биологические процессы, регулирующие их содержание [23].

При малой глубине оттаивания почвы в начале половодья вода концентрированно поступает в вершину оврага по ложбине, что приводит к локальному усилению теплового и механического воздействия потока на почву, ее размыву, оттаиванию и регрессивному отступанию вершины оврага и его глубинной эрозии. По мере увеличения глубины оттаивания почвы талая вода фильтруется и поступает в овраг широким фронтом по кровле мерзлых пород, не производя эрозионной работы, но способствуя оттаиванию и оползанию отложений на бортах оврага, т. е. расширению оврага. Такая закономерность — рост узкой вершины оврага в начале лета и расширение оврага к осени — отмечалась и в другие годы [7]. В целом за время половодья динамика бровок оврага была незначительной. Основная эрозия во время половодья была сосредоточена в тальвеге оврага под снегом.

Проведенное исследование охватило лишь отдельно взятое половодье, при этом предшествовавшая ему зима была малоснежной. Многолетние наблюдения на оврагах Ямала [10, 11] и на малых бассейнах арктической Канады [9, 20] показали большие различия в характере снеготаяния, режиме стока воды и наносов в зависимости от погодных условий и снегозапасов. Однако решающую роль в объеме выноса наносов из оврагов играет стадия их развития. Большинство оврагов, в формировании которых значительная роль принадлежит вытаиванию подземных льдов, активно растут всего несколько сезонов, в течение которых выносятся большая часть материала, вне зависимости от характера водности или снежности конкретного года. То есть ограничение в развитии оврагов тундры определяется средними многолетними характеристиками стока воды, определяющими возможность транспортировки поступающего со склонов оврага материала. Рост оврага у пос. Тикси, образовавшегося в 2020 г., уже в 2022 г. сильно замедлился, что выразилось в уменьшении его максимальной глубины и незначительном приросте его объема, даже несмотря на прохождение высокого летнего паводка [7].

Овраг у пос. Тикси был выбран для исследований из-за хорошей доступности в период половодья и активной стадии его развития. При этом исследованный овраг не является полностью естественным. Сток наносов в вершину оврага поступал преимущественно из дорожных колеи, т. е. 53 % всех наносов, вынесенных из оврага, можно считать антропогенными. Переменная площадь водосбора оврага у пос. Тикси также обусловлена антропогенным влиянием — перехватом склонового стока колеями дороги.

Однако для большинства оврагов в тундре нельзя полностью исключить антропогенного влияния, т. к. почвенно-растительный покров тундры чувствителен даже к однократному проезду транспорта. Так, авторы отмечают возможную роль дорожной колеи в возникновении исследованного оврага на Аляске [2]. Описанные нами ранее малые эрозионные формы в Усть-Ленском заповеднике [6] только

условно можно отнести к естественным, т. к. до 1983 г. территория не являлась заповедником, на ней сохранились следы проезда техники, геодезические пункты и буровые скважины. При этом не стоит недооценивать роль природных факторов, т. к. не любой проезд техники приводит к образованию оврага, а явление переменного водосбора может наблюдаться и на ненарушенных водосборах криолитозоны, где поверхностный сток перераспределяется по ложбинам, расположенным над неравномерно вытаявающими полигонально-жильными льдами.

Выводы

Снег в овраге оказывает регулирующее влияние на сток воды, задерживая воду в начале половодья и отдавая на спаде, влияет на температуру и минерализацию воды, а также замедляет оттаивание бортов оврага и поступление наносов в русло. При понижении температуры воздуха в заснеженном обводненном русле под коркой льда создается криогенный напор, который дает высокие пики давления, не связанные с ростом расходов. Это явление широко распространено на малых водотоках тундры и должно учитываться при интерпретации данных, получаемых с барометрических регистраторов уровня.

Менее половины вынесенных из оврага взвешенных наносов образовались в самом овраге, их большая часть была принесена с водосбора. Около 30 % вынесенных наносов осели сразу ниже оврага. Взвешенное органическое вещество составило около 14 % всего стока взвешенных наносов половодья. Активный вынос из оврагов наносов и органического вещества в нижние звенья гидросети ограничивается недостаточной транспортирующей способностью водотоков. Это сдерживает эффект от активизации экзогенных процессов на фоне климатических изменений.

Более 95 % стока растворенных веществ во время половодья формируется на водосборе и определяется происходящими там процессами, и только 5 % поступает из самого оврага. Химический состав воды меняется по мере таяния снега и оттаивания почвы на водосборе. Выделены три группы ионов по характеру изменения их концентрации во время половодья: 1) ионы кальция, магния, натрия и сульфат-ион имеют повышенные значения в самом начале снеготаяния, с ростом расходов воды их концентрации снижаются, а затем снова начинают расти с оттаиванием почвы; 2) ионы калия и хлора имеют максимальные концентрации в начале стока, которые затем снижаются; 3) динамика гидрокарбонат-иона и иона аммония не имеет выраженного тренда. Эти группы химических элементов могут быть использованы для индикации процессов оттаивания почвы и путей стока воды на малых водосборах и для прогноза распространения загрязняющих веществ в условиях криолитозоны.

Для периода половодья в условиях промерзшей почвы характерной особенностью динамики оврага является рост узкой вершины и углубление оврага, тогда как снижение поверхностного стока, оттаивание и оплывание бортов оврага в летнее время способствуют росту оврага в ширину.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено по плану НИР (ГЗ) научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова «Эрозионно-русловые системы: гидрологический режим, природно-антропогенные трансформации и прогноз опасных проявлений» и в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН № 126020516689-6 «Подземные воды криолитозоны, особенности их взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами».

Вклад авторов. АТ — общая концепция исследования, полевые работы, обработка данных по динамике оврага и стоку наносов, написание текста; ВШ — гидрологические полевые исследования и обработка данных; ЛЛ — обработка данных по химическому составу воды. Все авторы участвовали в интерпретации данных, обсуждении и редактировании окончательной версии статьи.

Благодарности. Авторы благодарят Ф.В. Селляхова за помощь в организации полевых работ.

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out according to the State Task of the Makkaveev Laboratory of Soil Erosion and Fluvial Processes at Moscow State University “Erosion-channel systems: hydrological regime, natural and anthropogenic transformations, and forecast of hazardous processes” and within the Fundamental Scientific Research Program of the Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences No. 126020516689-6 “Groundwater of the cryolithozone, features of their interaction with surface waters and frozen rocks”.

Authors’ contribution. АТ — general study concept, fieldwork, data processing on gully dynamics and sediment yield, writing the text; VS — hydrological fieldwork and data processing; LL — data processing on water chemistry. All the authors participated in data interpretation, discussion, and editing of the final version of the article.

Acknowledgments. The authors thank F.V. Selyakhov for his assistance in organizing the field work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Lafrenière M.J., Lamoureux S.F. Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes. *Earth-Science Reviews*. 2019;191:212–223. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.018>
2. Bowden W.B., Gooseff M.N., Balsler A., Green A., Peterson B.J., Bradford J. Sediment and nutrient delivery from thermokarst features in the foothills of the North Slope, Alaska: Potential impacts on headwater stream ecosystems. *Journal of Geophysical Research*. 2008;113 (G02026). <https://doi.org/10.1029/2007JG000470>
3. Gooseff M.N., Balsler A., Bowden W.B., Jones J.B. Effects of hillslope thermokarst in Northern Alaska. *Eos*. 2009;90(4):29–36.
4. Rowland J.C., Jones C.E., Altmann G., et al. Arctic landscapes in transition: responses to thawing permafrost. *Eos*. 2010;91(26):229–236.
5. Zhang T., Li D., East A.E., Walling D.E., Lane S., Overeem I., Beylich A.A., Koppes M., Lu X. Warming-driven erosion and sediment transport in cold regions. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022;3:832–851. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00362-0>
6. Тарбева А.М., Ефремов В.С., Лебедева Л.С., Шамов В.В. Эрозионные процессы на малых тундровых водосборах севера Якутии (район дельты р. Лены). *Криосфера Земли*. 2023;27(3):15–30. <https://doi.org/10.15372/KZ20230302>
Tarbeeva A.M., Efremov V.S., Lebedeva L.S., Shamov V.V. Erosional processes in small tundra catchments in the north of Yakutia. *Earth’s Cryosphere*. 2023;3:14–27. <https://doi.org/10.15372/KZ20230302>
7. Tarbeeva A., Tikhonravova Y., Lebedeva L., Kut A., Shamov V. Causes and processes of thermo-erosional gully initiation near Tiksi settlement, arctic Eastern Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2024;35(3):357–372. <https://doi.org/10.1002/ppp.2229>
8. Godin E., Fortier D. Geomorphology of a thermo-erosion gully, Bylot Island, Nunavut, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 2012;49:979–986. <https://doi.org/10.1139/e2012-015>
9. Beel C. R., Lamoureux S.F., Orwin J.F. Fluvial response to a period of hydrometeorological change and landscape disturbance in the Canadian High Arctic. *Geophysical Research Letters*. 2018;45. <https://doi.org/10.1029/2018GL079660>

10. Сидорчук А.Ю., Баранов А.В. (ред). *Эрозионные процессы центрального Ямала*. СПб.: РНИИ Культурного и природного наследия; 1999. 350 с.
11. Сидорчук А.Ю. Антропогенная овражная эрозия и термоэрозия в западной части центрального Ямала. *Геоморфология*. 2000;3:95–103.
Sidorchuk A.Y. Human-induced gully erosion and thermoerosion in the west part of Central Yamal. *Geomorfologiya = Geomorphology*. 2000;3:95–103. (In Russ.).
12. Познанин В.Л. Влияние снежного покрова на некоторые криогенные процессы в зоне БАМ. *Материалы гляциологических исследований*. 1986;56:125–128.
13. Познанин В.Л. Льдообразование в процессе развития овражной термоэрозии. *Материалы гляциологических исследований*. 1988;64:53–58.
14. Chalov S., Prokopenko K., Efimov V., Ivanov V., Koffi B., Botavin D., Babinski Z., Zimov N., Pavlyukevich E., Habel M. Implications of Yedoma bank outcrop on the Arctic river sediment transport. *Scientific Reports*. 2025;15:19320. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02614-7>
15. Konstantinov P., Basharin N., Fedorov A., Iigima Y., Andreeva V., Semenov V., Vasiliev N. Impact of climate change on the ground thermal regime in the lower Lena region, Arctic Central Siberia. *Land*. 2023;12(1):19. <https://doi.org/10.3390/land12010019>
16. Белозерова Е.В., Чалов С.Р. Определение мутности речных вод оптическими методами. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2013;6:39–45.
Belozerova E.V., Chalov S.R. Assessment of river water turbidity using the optic methods. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya = Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*. 2013;6:39–45. (In Russ.).
17. Тананаев Н.И., Лебедева Л.С. Органическая составляющая взвешенного вещества малых водотоков Енисейского Севера в летне-осенний период. *География и природные ресурсы*. 2018;2:87–95. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2\(87-95\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-2(87-95))
Tananaev N.I., Lebedeva L.S. The organic component of particulate matter in small streams of the Northern Yenisei region during the summer-autumn period. *Geography and Natural Resources*. 2018;39(2):140–147. <https://doi.org/10.1134/S1875372818020063>
18. Woo M-K. Hydrology of a drainage basin in the Canadian High Arctic. *Annals of the Association of American Geographers*. 1983;73(4):577–596.
19. Favaro E.A., Lamoureux S.F. Downstream patterns of suspended sediment transport in a High Arctic river influenced by permafrost disturbance and recent climate change. *Geomorphology*. 2015;246:359–369. <https://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.038>
20. McDonald D.M., Lamoureux S.F. Hydroclimatic and channel snowpack controls over suspended sediment and grain size transport in a High Arctic catchment. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2009;34:424–436. <https://doi.org/10.1002/esp.1751>
21. Costa D., Sexstone G.A., Pomeroy J.W., Campbell D.H., Clow D.W., Mast A. Preferential elution of ionic solutes in melting snowpacks: Improving process understanding through field observations and modeling in the Rocky Mountains. *Science of the Total Environment*. 2020;710(136273). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136273>
22. Chen Q., Mirrielees J.A., Thanekar S., et al. Atmospheric particle abundance and sea salt aerosol influence from blowing snow and leads at an Arctic coastal tundra site. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022;22:15263–15283. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15263-2022>
23. Quinton W.L., Pomeroy J.W. Transformations of runoff chemistry in the Arctic tundra, Northwest Territories, Canada. *Hydrological Processes*. 2006;20(14):2901–2919. <https://doi.org/10.1002/hyp.6083>