Научная статья / Scientific paper
УДК: 624.131
DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.74

Природные и антропогенные факторы формирования наледей в пределах водосбора р. Чадан

Л. А. Строкова
Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
e-mail: sla@tpu.ru

Аннотация. Актуальность изучения наледей заключается в том, что они оказывают большое влияние на инфраструктуру и могут приводить к существенному экономическому ущербу, представлять опасность для населения. Анализ факторов, обусловливающих развитие наледей, позволяет предсказывать и предотвращать негативные последствия, своевременно принимая меры для их устранения. Целью данного исследования является выявление факторов, обусловливающих развитие наледей в пределах водосбора р. Чадан по спутниковым данным. Сбор, систематизация и анализ данных дистанционных съемок, результатов инженерных изысканий, имеющихся территориальных геологических, гидрологических, гидрогеологических сведений. Оконтурено 27 крупных и средних наледей, общей площадью 0,483 кв.км. Рассмотрены следующие факторы, влияющие на формирование наледного стока: изменения климата, морфометрические характеристики рельефа (высота местности и уклон), растительный и снежный покровы, типы землепользования и земного покрова, геологические особенности. Использование геоинформационных технологий позволило представить пространственные особенности компонентов геологической среды в едином цифровом формате. Наледи локализуются в двух зонах. В первой зоне наледи встречаются на границе среднегорных ландшафтов с древесным покровом, низкой радиационной температурой поверхности, большим количеством снега и степных низкогорных ландшафтов с небольшим снегонакоплением. Они приурочены к области распространения четвертичных отложений, с отметками поверхности 800–1000 м и уклонами до 2°, формируются за счет криогенного барража грунтовых вод аллювиальных отложений р. Чадан. Во второй зоне наледи приурочены к нижнедевонским отложениям с абсолютными отметками 1600–2100 м. К причинам наледного стока в декабре 2025 г. следует отнести: раннее промерзание почв и водотоков до дна в октябре, нарушение пропускной способности русла и мелиоративной сети и теплое начало зимы.

Ключевые слова: спутниковые снимки; наледи; индекс NDSI; индекс NDVI; водосбор р. Чадан.
Для цитирования: Строкова Л. А. Природные и антропогенные факторы формирования наледей в пределах водосбора р. Чадан // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2026. Т. 8. Вып. 1. С.74–86. DOI: 10.34753/HS.2026.8.1.74.

Natural and anthropogenic factors of icing within the Chadan River catchment

Ludmila A. Strokova
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
e-mail: sla@tpu.ru

Abstract. The relevance of studying icings lies in the fact that they have a great impact on infrastructure and can lead to significant economic damage and pose a danger to the population. The analysis of the factors contributing to the development of ice makes it possible to predict and prevent negative consequences by taking timely measures to eliminate them. The purpose of this study is to identify the factors contributing to the development of icing within the catchment area of the Chadan River. Collection, systematization and analysis of available territorial geological, hydrological, hydrogeological information, engineering survey results, remote sensing data. We contoured 27 large and medium-sized icings with a total area of 0.483 square kilometers. We considered the following factors affecting the formation of ice runoff: climate change, morphometric characteristics of the relief (elevation and slope), vegetation and snow cover, types of land use and land cover, geological features. The use of geoinformation

technologies has made it possible to present the spatial features of the components of the geological environment in a single digital format. Icings are localized in two zones. In the first zone, icings occur at the boundaries of intermediate landscapes with tree cover and abundant snow cover, and steppe-like lower landscapes with light snow accumulation. They are confined to the distribution area of Quaternary deposits, with surface elevations of 800-1000 m and slopes of up to 2°, a low surface radiation temperature, and are determined by cryogenic barrage of groundwater from alluvial deposits of the Chadan River. In the second zone, icings are confined to Lower Devonian deposits with absolute elevations of 1600–2100 m.

Keywords: satellite images; icing; NDSI index; NDVI index; Chadan River catchment.

For citation: Strokova L. A. Natural and Anthropogenic Factors of Icing Within the Chadan River Catchment. Hydrosphere. Hazard processes and phenomena, 2026, vol. 8, iss. 1, pp. 74–86. DOI: 10.34753/HS. 2026.8.1.74. (In Russian; abstract in English).

Введение

Наледи – это ледяные тела обычно плоско-выпуклой формы и различных размеров, формирующиеся зимой в результате многократного излияния подземных, речных, озерных или морских вод на поверхность земли или льда и послойного их замерзания [1]. В изучении наледей наметились разные теоретико-методологические подходы, среди них можно выделить методы оценки запасов подземных вод по наледным ресурсам О. Н. Толстихина, величины подземного стока Б. Л. Соколова, связь наледей с различными типами таликов Н. Н. Романовского, составление кадастров наледей для различных территорий и экспедиционные исследования В. Р. Алексеева, М. Л. Маркова, О. М. Макарьевой, В. Н. Черных, использование спутниковых данных А. Н. Шиховым, А. А. Землянсковой и др.

Наледи оказывают большое влияние на инженерные сооружения и могут приводить к потерям имущества, представлять угрозу жизни и здоровью населения. Отрицательное воздействие наледей проявляется в неожиданном затоплении территории и последующим замерзанием воды в условиях отрицательных температур воздуха, образовании ледовых плотин и барьеров, непредвиденных каналов стока; закупорка водопропускных труб и мостовых пролетов; формирование бугров и площадей пучения, пластов и линз подземного льда, термокарста и термоэрозии [2]. Известны случаи, когда взрывы наледных бугров пучения производили в течение нескольких секунд катастрофические нарушения, описанные в работе [3]. В Забайкалье, Саянах, Северо-Востоке России наледи наносят значительный ущерб инфраструктуре и объектам экономики [4–9]. Особо опасны наледи, которые выходят на дорогу или образуются под мостами, закупоривают водопропускные трубы. Ежегодное формирование – разрушение наледей приводит к износу мостовых опор. Часто весной наледный сток формируется раньше, чем вскрывается русло реки. Это явление регулярно отмечается на территории Магаданской области, когда талые наледные воды текут поверх речного льда, что приводит к подтоплению населенных пунктов, жилых домов и дорог [8]. Характерны наледи и для бассейна реки Чадан в Республике Тыва. Последний сток наледных вод наблюдался в конце декабря 2025 г. из-за перекрытия русла под мостами у села Бажын-Алаак, в некоторых районах г. Чадана (у школы №4 и Гортопа) вода залила придворовые участки 12 домов.

Целью данного исследования является выявление особенностей природных и техногенных факторов, обусловливающих развитие наледей в пределах водосбора р. Чадан по данным дистанционного зондирования Земли.

Насущность темы объясняется сравнительно слабой изученностью региона, негативным влиянием наледей на инфраструктуру, их ролью в стоке малых водотоков, а также практической ценностью для сельского хозяйства. Многочисленность факторов, влияющих на развитие наледей, таких как рельеф, температура воздуха, снежный покров, подстилающие горные породы, особенности речного и подземного стока, неполнота изученности их вклада, дискуссионность некоторых из них, также обусловливает актуальность их изучения.

Материалы и методы исследований

Исследование включало анализ фондовых материалов, полученных при обследовании противопаводковой дамбы в г. Чадан в 2020 г. В ходе изысканий были пробурено 8 скважин глубиной 2–4 м с отбором 8 проб грунта нарушенного сложения для определения гранулометрического состава [10]. На основании полевых наблюдений и лабораторных исследований в пределах площадки выделено два инженерно-геологических элемента: 1 – насыпной грунт (галечниковый грунт с песчаным заполнителем, tQIV) и 2 – галечниковый грунт с песчаным заполнителем 36 % (aQIV). Подземные воды при проходке скважин не встречены.

Анализ и обработка многоспектральных спутниковых снимков проведены в 2026 г. в отделении геологии ТПУ с привлечением сведений о геологическом строении участка.

Для анализа рельефа использовались данные SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) четыре смежных снимков (n50_e091_3arc_v1, n50_e092_3arc_v1, n51_e091_3arc_v1, n51_e092_3arc_v1). С помощью полученной цифровой модели были выделены уклоны поверхности, кривизны и экспозиции склонов.

Для изучения растительного и снежного покровов, а также радиационной температуры поверхности использовались космоснимки Landsat-8, обработанные на платформе Google Earth Engine (GEE). Для пространственно-временного анализа при работе с данными использовалась программа ArcGIS10.4.1.

Для характеристики геологического строения территории, экзогенных геологических процессов и антропогенной нагрузки использовалась единая цифровая модель комплекта листа государственной геологической карты М-46 (Кызыл) масштаба 1:1000000.

Для решения задач проводимого исследования использовались метеоданные о температуре воздуха и осадках за период с 1966 по 2026 г.[1]

Природные условия района

В физико-географическом отношении район исследований находится в пределах Центрально-Тувинской котловины, в ее западной части (Хемчикской котловине). Хемчикская котловина располагается между Западным Саяном на севере и хребтами Западный Танну-Ола на юге, на западе ограничена Шапшальским хребтом, с востока – хребтом Адар-Даш, отрогом хребта Западный Танну-Ола. Котловина вытянута в восточно-северо-восточном направлении на 130 км при ширине от 25 до 40 км. Отметки днища котловины – от 600 до 800 м. Среднегорную часть области образуют хребет Западный Танну-Ола. Хребет длиной около 200 км, на западе его высота достигает 2800–3000 м. В древних ледниковых цирках по северному склону хребта располагаются обширные снежники-перелетки. К востоку высота хребта снижается до 2500–2200 м. Вершинная поверхность здесь уплощенная, покрытая каменистыми россыпями-курумами, с отдельными денудационными останцами относительной высотой до нескольких десятков метров.

Абсолютные отметки района исследований изменяются от 675 м (устье р. Чадан) до 2925 м. В гидрографическом отношении река Чадан относится к бассейну реки Хемчик, которая впадает в реку Енисей.

По степени гидрологической изученности район относится к недостаточно изученным территориям, т. к. регулярные наблюдения за уровенным режимом и стоком проводились на реке Чадана лишь в течение неполных 2-х лет (1951–1953 гг.) в 4-х км от устья. Сток учитывался не полностью, поскольку не принимался во внимание сток, забираемый на орошение. В мае 2003 г. в составе метеорологической станции Чадан был открыт гидрологический пост, который проводит наблюдения по программе гидрологического поста 2 разряда, т.е. пост является уровенным. Стоковые наблюдения не проводятся. Пост расположен в 20 км от устья, в 30 м ниже автодорожного моста по дороге на г. Ак-Довурак [11].

[1] Научно-прикладной справочник «Климат России». Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.pogodaiklimat.ru/history/36087.htm (дата обращения 05.04.2026).

Река Чадан берет начало на северном склоне хребта Западный Танну-Ола. Приустьевой участок заболочен. Впадает в р. Хемчик по правому берегу, в 101 км от устья Хемчика.

На берегах реки стоит г. Чадан, а также селения Теве-Хая, Хайыракан, Бажын-Алаак, в урочище Чайлаг-Алаак расположен буддийский монастырь Устуу-Хурээ. В г. Чадан на реке возведена противопаводковая дамба, в 2024 г. выполнен капитальный ремонт дамбы. На объекте обустроили дренажный канал и установили водопропускную трубу, которая поможет отводить потоки во время паводка. Протяженность восстановленного сооружения превышает 3 км, ширина составляет 4,5 м. Запланированы берегоукрепительные работы на р. Хемчик у с. Баян-Тала. При наступлении паводка возникает угроза соединения р. Хемчик со старым руслом р. Чадан, что может повлечь затопление с. Баян-Тала. Процесс смещения русла р. Хемчик в сторону р. Чадан происходит интенсивно, так, в течение 5 лет произошло перемещение более чем на 100 м. Под угрозу попадают прилегающие угодья, пашни, пастбища, мост через р. Чадан и с. Баян-Тала.

Река Чадан принимает 13 притоков длиной более 10 км. Наиболее крупные притоки: р. Аныяк-Хондергей, р. Кара-Чадана, р. Кара-Суг, р. Эльдиг-Хем, р. Орук-Хем, р. Сайр-Хем. Бассейн реки в плане вытянут с юго-востока на северо-запад. Общая длина реки составляет 98 км, общая площадь водосбора 2671 км^2, средний уклон реки 12,7 промилле; средняя высота водосбора 1418 м; густота речной сети 0,36 км/км^2, в 1952 г. расход воды в 4,1 км от устья – 4,86 м^3/с [11].

В верхней части река Чадан течет по узкой долине между высоких гор, пойма в долине реки появляется на расстоянии 20–25 км от её истока. Горы покрыты хвойными лесами с преобладанием лиственницы, пойма – лиственными с преобладанием тополя, ивы. Русло реки сложено из гальки и валунов, ширина его в верхней части 5–10 м, у гидропоста 50–55 м. В черте города в межень ширина русла – 2–3 м, скорость течения около 0,74 м/с, глубина – 0,15–0,18 м; в период высоких вод ширина русла – 20–50 м, скорость течения – 3 м/с, глубина 1,5–3,0 м. Глубина и скорость потока изменяются при выпадении интенсивных осадков в виде дождя и мокрого снега. Дно русла сложено песчано-галечными отложениями, деформирующееся.

Гидрологический цикл района изысканий состоит из четырех фаз: весеннее половодье, дождевые паводки, летне-осенняя и зимняя межень. Река Чадан имеет смешанное питание, в котором преобладает дождевое. Во время половодья проходит до 30 % годового стока [10]. После прохождения весеннего половодья устанавливается летне-осенняя межень. Межень, как правило, часто прерывается дождевыми паводками. Меженный период длится с июля по сентябрь. В среднем на этот сезон приходится 1–2 % объема годового стока. Дождевые паводки отмечаются в любом месяце летне-осеннего периода. Большая часть годового стока (около 60–65 %) приходится на дождевые паводки, число их за сезон достигает 10–15. Модуль паводочного стока достигает 20–40 л/сек. км^2 и более. Подъемы и спады выражены резко: за 1–2 дня уровень повышается на 0,3–0,5 м, максимумы наблюдаются в июле-августе. Модуль среднего годового стока колеблется в пределах 1–2 л/сек. км^2, также мал и коэффициент стока (0,1–0,2). Летом в межпаводочные периоды сток несколько уменьшается, составляя в среднем 0,25–0,50 л/сек. км^2. Зимой расходы воды резко понижаются, в среднем на сезон приходится 1–2 % объема годового стока.

Результаты опроса местных жителей в ходе инженерных изысканий для реконструкции дамбы в 2020 г., показали, что подъем уровня воды р. Чадан происходит в период прохождения дождевых паводков и весеннего половодья, высота подъема уровня реки при прохождении пика составляет 1,5–1,7 м. Весеннее половодье на реке начинается в апреле и длится 10 дней. Вода заливает всю пойму. Так же, по словам местных жителей на реке Чадан наблюдается карчеход. Карчеход образуется в результате попадания в русло реки деревьев с корнями и кроной. Попадание деревьев происходит в результате подмыва берегов и естественного падения в водоток [10].

Ледовый режим начинается с появлением первых ледяных образований (заберегов, сала) в конце октября, ледостав обычно наступает в ноябре. При установлении ледостава уровень

поднимается 0,2–0,4 м, после чего в течение всей зимы идет плавное понижение. Средняя продолжительность 126–141 дней. Толщина льда зависит от суровости зимы и влияния местных факторов. Вскрытие происходит во второй половине апреля.

Климат района резко континентальный. Средняя годовая температура воздуха составляет 0,2 °С. Январь является наиболее холодным месяцем года, со средней суточной температурой воздуха -27,9 °С. Переход среднесуточной температуры через 0 °С происходит в третьей декаде апреля, однако ночные заморозки продолжаются до конца мая и часто возможны в начале июня.

Лето наступает в среднем в третьей декаде мая и продолжается 3–4 месяца [10]. Самый жаркий месяц – июль. Среднемесячная температура июля – 18,2 °С, максимальная – в отдельные годы достигает 39,5 °С. Наиболее теплый период года продолжается 76 дней (с 3 июня по 19 августа).

Температурный режим почв находится в тесной зависимости от их гранулометрического состава, степени увлажнения, а также от высоты и плотности снега. На возвышениях почва промерзает на глубину в 2–3 раза большую, чем в более заснеженных понижениях.

Зима продолжительная и холодная. Устойчивый снежный покров образуется в первой декаде ноября. Увеличение запасов снега происходит равномерно, в течение всей зимы до конца третьей декады марта. Глубина снежного покрова в долинно-степной части 10–15 см, в горах на высоте 1200–1500 м до 150 и более сантиметров. Разрушение устойчивого снежного покрова происходит в первой декаде апреля. Число дней со снежным покровом изменяется от 140 до 190 дней с увеличением высоты местности над уровнем моря [10].

В ***тектоническом*** плане район на северо-западе входит в Хемчикско-Систигхемскую структурно-фациальную зону Западно-Саянской каледонской складчатой системы, на юго-востоке относится к Тувинскому палеозойскому прогибу, разделяемых Шуйской зоной разломов [12].

Участок работ находится в сейсмоопасном районе. Сейсмичность по карте А комплекта карт ОСР-2015 равна 8 (в долинах рек Чадан, Хемчик) и 9 баллов (в верховьях р. Чадан).

В ***геологическом*** строении района принимают участие кембрийские, ордовикские силурийские, девонские, каменноугольные и четвертичные образования [12].

Кембрийские представлены серией эффузивно-осадочных образований. Здесь выделяются горизонты порфиритов, туфов, конгломератов, песчаников и известняков. Общая мощность кембрийских отложений достигает 2000 м.

Ордовикские, силурийские отложения в районе встречены в бассейнах рек Чадан и Хемчик и их притоков, представлены осадочными толщами, мощностью от 1,5 до 5,0 км.

Девонские отложения представлены песчаниками, сланцами, туфами и порфиритами. Породы окрашены преимущественно в красный цвет. Мощность их достигает от 1,2 до 1,5 км.

Осадконакопление в Туве закончилось в раннекаменноугольное время, когда установился континентальный режим, и лишь в центральных частях Тувинского прогиба в юрское время продолжалось образование лагунно-континентальных отложений. Днище котловины, длительное время, служившее областью аккумуляции, покрыто чехлом кайнозойских отложений мощностью до 150–200 м.

Четвертичные отложения развиты очень широко. Генетически они представлены аллювиальными и элювиально-делювиальными образованиями. Наиболее широко развиты аллювиальные отложения, слагающие современное русло, пойму и надпойменные террасы р. Чадан, представленные валунами и галькой метаморфических и изверженных пород. Элювиально-делювиальные отложения представлены крупнообломочным материалом с примесью песчано-глинистых грунтов. Они развиты по склонам и у подножий гор и имеют мощность от 1 до 10 метров.

Подземные воды

Данный район расположен в Саяно-Алтайской гидрогеологической складчатой области, в Тувинском адартезианском бассейне [12]. По условиям залегания и циркуляции в районе работ распространены 2 типа подземных

вод: поровые воды рыхлых четвертичных отложений и трещинные и пластово-трещинные воды коренных пород. Поровые воды приурочены к аллювиальным четвертичным отложениям, представленными песками, супесями, галечниковыми грунтами с валунами. Питание водоносного горизонта осуществляется инфильтрацией атмосферных осадков и речной воды (особенно за время паводков). Разгрузка осуществляется в русло реки. Воды четвертичных отложений пресные, по химическому составу –гидрокарбонатные с переменным катионным составом, умеренно-жесткие.



Рисунок 1. Местоположение водосбора р. Чадан, на карте-врезке - оросительная сеть в долине реки
Figure 1. The location of the Chadan River catchment area; the inset map shows the irrigation network in the river valley

Геологические процессы. На участке развиты: склоновые процессы, многолетнее мерзлые породы (ММП), высокая сейсмическая активность, изредка карст. По геокриологической карте листа М-46 по направлению с ЮЗ на СВ выделяются зоны: *сплошного* (мощностью до 300 м, температурой ММП от -1 до -8 °С), *прерывистого* (мощностью от 100 до 150 м, температурой ММП от 0 до -3 °С), и *островного* (мощностью до 50 м, температурой ММП от 0 до -1 °С) распространения многолетнемерзлых пород [12].

Техногенные условия

На территории проживает почти 15 тыс. человек. Земледелие в Хемчикской котловине тесно связано с организацией оросительной системы, заложенной еще в древности. Причем, по сведениям А. Д. Грача, орошались не только поля, но и луга [13]. Пуск воды в распределительные каналы и в мелкую поливную сеть регулировался посредством временных земляных перемычек. Существовала переложная система земледелия, когда участок пашни после трех-четырех лет использования исключался из оборота на долгий срок. В 1939 г. был сооружен Чаданский оросительный канал длиной 7 км. На протяжении 400 м канал проходил в скальных породах, глубина выемки достигала в некоторых местах 10 м.

Чаданская оросительная система имеет площадь 1253 га (рисунок 1). В последние годы в республике набирает темп работа по восстановлению мелиоративного комплекса к 2030 году. Требуется капитальный ремонт головных водозаборов и реконструкция магистральных и распределительных каналов, очистка земляных каналов от деревьев, кустарника и сорной растительности, которыми они затянуты, лотковые каналы также нуждаются в очистке и ремонте.

Результаты исследования и их обсуждение

Идентификация наледей. Оконтуривание наледей проводилось в ArcGIS в два этапа. На первом этапе в качестве критерия для выделения наледей использовалось наложение карт снежного индекса (*NDSI*>0,4 для льда/снега) и

вегетационного индекса (*NDVI*<0,1 для мест без растительности). Далее проводилась фильтрация полученного растра путем применения маски, которая представляет собой буферную зону шириной до 200 м, в пределах речной сети, установленной инструментом Hydrology ArcGIS, т.к. наледи локализованы в долинах рек. Выделено 18 наледей общей площадью 0,189 км^2. На втором этапе дополнительно оконтурены девять наледей с суммарной площадью 0,294 км^2 вручную по майским снимкам 2025 г. (рисунок 2а,б). Итого выделено 27 наледей с общей площадью 0,483 км^2. Согласно классификации наледей по их площади Н.И. Толстихина [14] в пределах водосбора р. Чадан оконтурено 1 очень крупная, 9 крупных и 17 средних наледей (рисунок 2 в).

а(a)

б(b)

в(c)

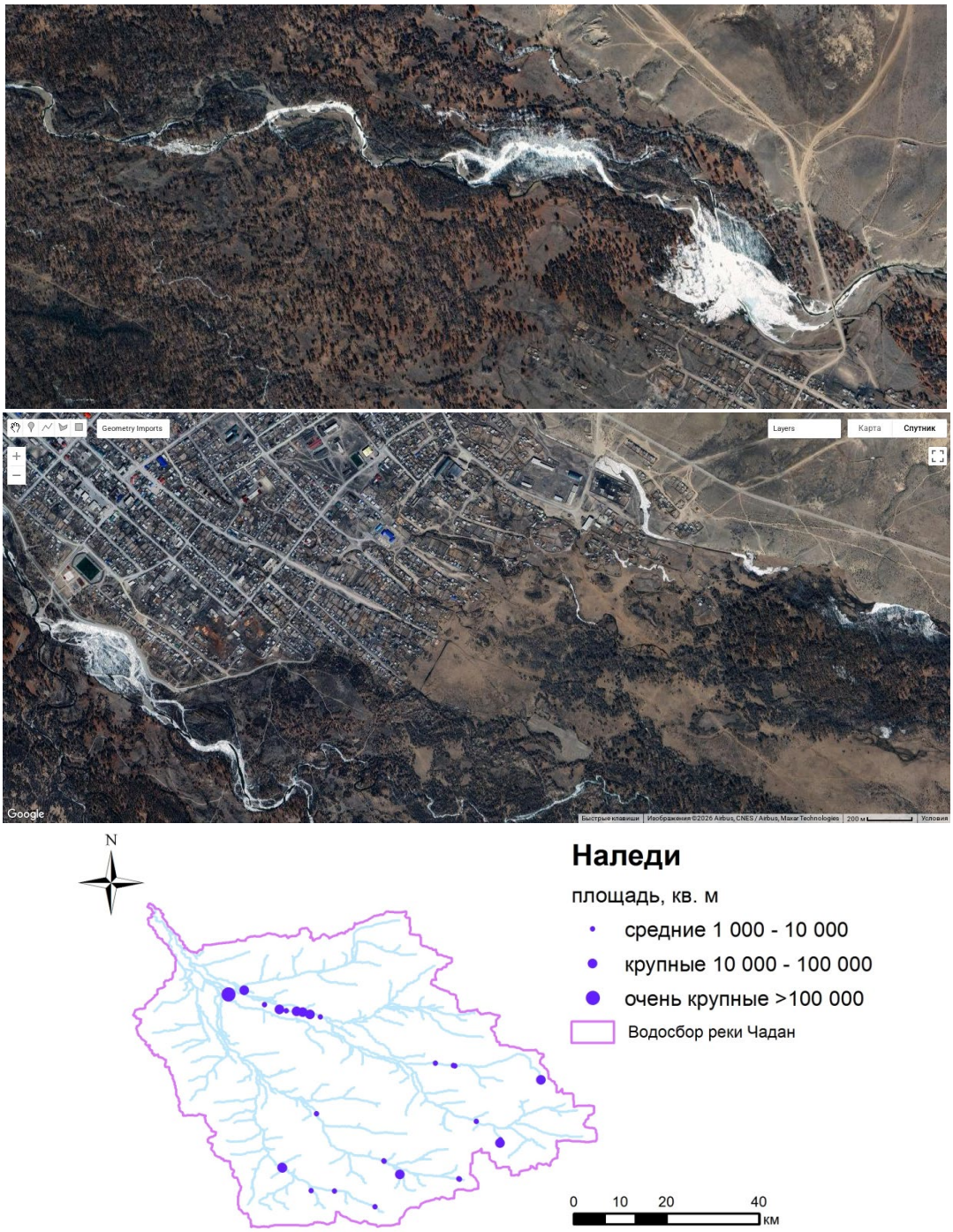

Рисунок 2. Наледи: а – у с.Бажын-Алаак; б – у г.Чадан в окне карты GEE; в – в проекте ArcGIS
Figure 2. Icings: a – near Bazhyn-Alaak; b – Chadan in the GEE map window; c – in the ArcGIS project

Климатический фактор распространения наледей. Для установления причин наледного стока в декабре 2025 г. необходимо рассмотреть гидрометеорологические показатели. Средняя месячная температура воздуха в октябре 2025 г. была ниже нормы на 0,9 °С, а в ноябре и декабре 2025 г. – выше нормы на 1,5 и 1,7 °С соответственно.

Изменения климата: за последние десятилетие наиболее суровые зимы зафиксированы в 2016 и 2022 гг. со значениями температуры ниже нормы на 3 и 2,5°С в октябре, 7 и 4°С ноябре, 2 и 7°С в декабре соответственно. Наиболее благоприятные погодные условия для глубокого сезонного промерзания горных пород, и соответственно, наледеобразования существовали в малоснежные и холодные зимы. Таковыми являлись 2016 и 2022 гг.

По нашим данным среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции Чадан за период 1966–2025 гг., увеличилась на 2,5 °С (рисунок 3). В наибольшей степени потепление затронуло зимние и весенние месяцы года, в результате чего изменяются условия формирования весеннего половодья и режим деятельного слоя почвогрунтов.

Распределение осадков внутри года крайне неравномерное. Общее количество выпадающих за год осадков равняется 248 мм. Из них 206 мм выпадает в теплое время года и 37 мм в холодный период. Годовой пик осадков приходится на июль–август (66 мм), максимум твердых осадков выпадает в декабре (м/ст. Чадан). Оценки изменения осадков показали незначительный положительный вековой тренд.

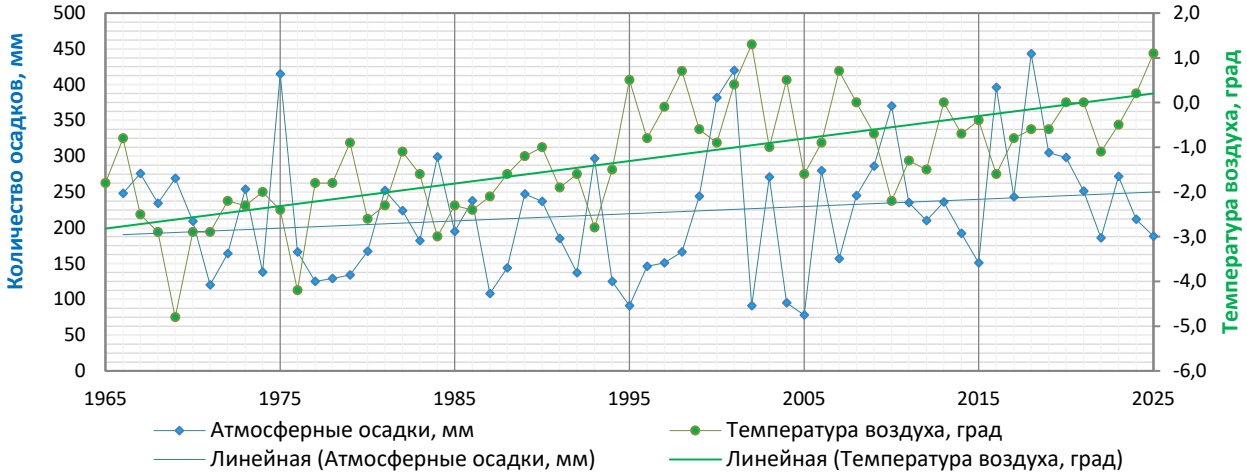

Рисунок 3. Среднегодовые значения параметров по метеостанции Чадан
Figure 3. Annual average values of the parameters for the Chadan weather station

Рельеф. Характер рельефа в активности геологических процессов криолитозоны занимает ведущее место. Экспозиция и крутизна склонов, высота над уровнем моря влияют на распределение поступающей солнечной радиации, температурный режим горных пород, распределение ландшафтов. Рельеф территории преимущественно низкогорный и среднегорный, а высокогорный ограниченно встречается в южной и **восточной частях** (рисунок 4а-г). В результате анализа полученных нами данных установлено, что наледи приурочены к поверхностям с уклонами до 2° и двум зонам по абсолютным отметкам: 800–1000 (9 наледей) и 1600–2100 м (16 наледей).

Анализ покровов (земного, растительного и снежного) был выполнен на платформе Google Earth Engine (GEE) – онлайн-сервис от компании Google с хранилищем геопространственных данных и инструментами их анализа и автоматизированной обработки в облачном сервисе[2].

[2] Earth Engine от Google – уникальная платформа для анализа больших геоданных [Электронный ресурс]. //URL: https://habr.com/ru/post/500020/. (дата обращения: 17.02.2026)

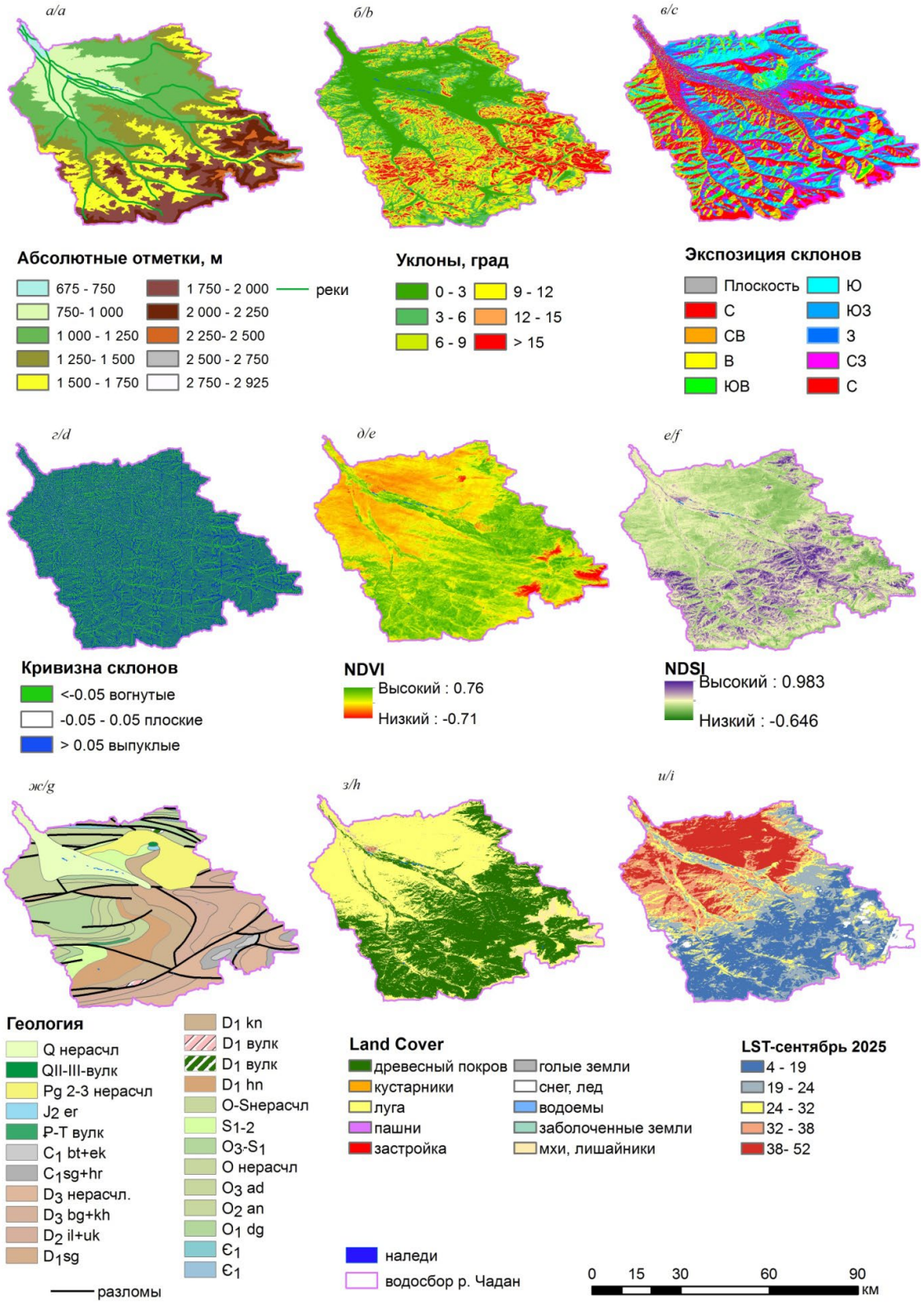

Рисунок 4. Факторы, определяющие формирование наледей: а) абсолютные отметки; б) уклоны; в) экспозиция склонов; г) кривизна склонов; д) растительный покров (NDVI); е) снежный покров (NDSI); ж) геология; з) использование земель (Land Cover); и) радиационная температура поверхности (LST, сентябрь 2025)

Figure 4. Factors determining the formation of icings: a) elevation; b) slope; c) aspect; d) curvature; e) NDVI; f) NDSI; g) geology; h) Land Cover; i) LST, September 2025

Растительный покров играет значительную роль в теплообмене земной поверхности с атмосферой, участвуя в поглощении радиации и встречном излучении [15–19]. При прочих равных условиях под любым растительным покровом температура почвы летом оказывается ниже, а глубина протаивания меньше, чем на участках, где растительность отсутствует. Но особенно сильно этот эффект проявляется под хвойной растительностью, когда накопление подстилки, состоящей из опада хвои мощностью 3–5 см, замедляет прогревание почвы [16].

Вегетационный индекс NDVI был определен по снимку LANDSAT/LC08/C02/T1_TOA/LC08_142024. Время снимка выбрано по рекомендациям [19], так в период со второй половины августа по первую половину сентября радиационная температура поверхности имеет взаимосвязь с температурой пород на подошве годовых теплооборотов, т.е. в указанный период в горных районах сезонно-талый слой достигает максимальных значений, а сезонно-мерзлый полностью оттаивает. А также, в этот период исключается маскирующее влияние активно вегетирующей растительности и аномальные температурные контрасты за счет солнечного нагрева будут минимальными. Был отобран снимок от 20.09.2024, т.е. поздней осенью до выпадения снега. Положительные значения (0,44) в *NDVI* показывают леса, кустарники (рисунок 4д), в то время как отрицательные значения (-0,25) соответствуют воде, (-0,5) – бетону, асфальту.

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}, \quad (1)$$

где *NIR* – коэффициент спектральной яркости в ближней инфракрасной зоне, *RED* – в красной.

Результаты *NDVI* показывают, что территории, заросшие лесом, имеют более высокие значения (зеленый цвет), а более низкие значения соответствуют лугам, пастбищам (желтый цвет). Застроенные территории и голые земли (курумники в высокогорной части) обозначены красным цветом. Визуально наледи приурочены к зеленой зоне по индексу *NDVI*.

Земной покров (Land Cover). Для характеристики землепользования и земного покрова территории использован продукт ESA WorldCover 10m – глобальный набор данных о классах земного покрова для 2020 и 2021 гг. с разрешением 10 м. Получены на основе данных спутников Sentinel-1 и Sentinel-2. Выделено 10 типов земного покрова (рисунок 4з). На карте земного покрова наледи приурочены к голым землям, причем три наледи пересекают дороги.

Снежный покров. Влияние снежного покрова на глубину сезонного промерзания, температуру горных пород и наледеобразование рассмотрены в работах [1–9]. Отепляющий эффект снежного покрова растет с повышением его мощности и уменьшением плотности. На снегонакопление оказывает микрорельеф поверхности, а также лесной и кустарниковый ярусы растительного покрова.

Для изучения снежного покрова использован нормализованный разностный снежный индекс (*NDSI*):

$$NDSI = \frac{GREEN-SWIR_1}{GREEN+SWIR_1}, \quad (2)$$

где *GREEN* – коэффициент спектральной яркости в зеленой зоне спектра с длиной волны 0,525–0,600 мкм, $SWIR_1$ – в коротковолновой инфракрасной зоне с длиной волны 1,56–1,66 мкм.

Пиксели со значениями снежного индекса *NDSI* больше 0,4 принимаются за заснеженные не менее, чем на 50 % [2]. Расчет *NDSI* произведен на платформе GEE по снимку 28.05.2017 с нулевой облачностью. Максимальные значения индекса *NDSI* характерны для среднегорного пояса, минимальные для низкогорного (рисунок 4е). Снегонакопление в низкогорной части составляет в среднем 4–6 см, в среднегорной в среднем до 15 см и в высогорной более 20 см. Большая часть наледей приурочена к границам среднегорных зон с древесным покровом, большим количеством снега и низкогорных степных зон с небольшим снегонакоплением (с индексом *NDSI* от -0,2 до 0,6 – оттенки фиолетового цвета на карте).

Радиационная температура *(тепловое инфракрасное излучение поверхности, LST*) определялась на платформе GEE по средним

(медиана) сентябрьским снимкам с 2015 по 2025 гг., с использованием индекса *NDVI* и канала 10 Landsat 8 (рисунок 4и). В низовьях реки (до отметок 1250 м) температура составляет 30–40 °С, в среднегорной склоновой части, покрытой густой хвойной растительностью, температура значительно снижается и составляет часто 4–19 °С, голые высогорные территории со значительными уклонами лучше прогреваются и имеют температуры 24–32 °С. Все наледи приурочены к зонам с низкой температурой 19–24 °С.

Геологический фактор распространения наледей. Согласно составленной карте распространения наледей, основная часть крупных наледей приурочена к четвертичным отложениям низкогорья (рисунок 4ж) и формируется за счет криогенного барража грунтовых вод аллювиальных отложений р. Чадан. Наледи среднегорной зоны приурочены к нижнедевонским отложениям, две из них локализуются вдоль тектонических нарушений (разломов, трещин) и стратиграфических контактов, что косвенно подтверждает предположение о питании наледей за счет подземных вод. Наледи, образующиеся в таких местах, обычно имеют небольшие размеры. На некоторых притоках р. Чадан формируются наледи, которые можно отнести к наледям речных вод. Они наблюдаются на реках Улуг-Хондергей, Кара-Адыр, Бугалыг. Их формирование происходит при промерзании воды в руслах до дна на мелких участках и перекатах. На одном водотоке может быть несколько таких наледей (рисунок 2в). В их питании, вероятно, участвуют не только речные, но и подземные воды. В связи с этим вопрос определения принадлежности наледей к разным генетическим типам, в зависимости от источников питания, является сложным и нерешенным.

Техногенный фактор. Наличие дорог, разветвленной мелиоративной сети, безусловно, влияет на формирование наледей. Так мостовые конструкции у с. Бажын-Алаак спровоцировали формирование крупных наледей ниже по течению. Однако важно отметить, что для характеристики влияния техногенных факторов на образование наледей недостаточно только спутниковых данных, необходимы экспедиционные исследования.

К причинам наледного стока в декабре 2025 г. следует отнести: раннее промерзание почв и водотоков до дна в октябре, нарушение пропускной способности русла и мелиоративной сети, теплое начало зимы. Отсутствие или неполные ряды метеонаблюдений за стоком воды, снежным покровом осложняют составление моделей для прогнозирования наледного стока, что таит реальную угрозу безопасности инфраструктурным объектам.

Заключение

1. На основе спутниковых данных с помощью индексов *NDSI* и *NDVI* выделено 27 наледей суммарной площадью 0,483 км^2. Рассмотрены факторы, обусловливающие формирование наледей, а именно: климат, рельеф (высота местности и уклон), растительный и снежный покровы, характер и тип использования земель, состав горных пород.
2. Наледи локализуются на поверхностях с низкой радиационной температурой 19–24 °С (середина сентября) в двух зонах. В первой зоне наледи встречаются на границе среднегорных ландшафтов с древесным покровом, большим количеством снега и степных низкогорных ландшафтов с небольшим снегонакоплением. Они приурочены к области распространения четвертичных отложений, с отметками поверхности 800–1000 м и уклонами до 2°. Во второй зоне наледи приурочены к нижнедевонским отложениям с абсолютными отметками 1600–2100 м. Вопрос определения принадлежности наледей к разным генетическим типам, в зависимости от источников питания, на данный момент является нерешенным. Наличие дорог, разветвленной мелиоративной сети, безусловно, влияет на формирование наледей в этом районе. Для всестороннего изучения наледеобразования только спутниковых данных недостаточно, необходимы наземные наблюдения.
3. К причинам наледного стока в декабре 2025 г. следует отнести: раннее промерзание почв и водотоков до дна в октябре, нарушение пропускной способности русла и мелиоративной сети и теплое начало зимы.

Литература / References

1. Алексеев В. Р. Наледеведение: словарь-справочник. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния РАН, 2007, 429 с.
2. Гагарин Л. А., Баишев Н. Е., Мельников А. Е., Николаева Е. С. Применение радиолокационных космоснимков Sentinel-1 при картировании наледей Чульманского плато и оценка закономерностей их распространения. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. Т. 29. №1. С.80–95. DOI:10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95.
   Gagarin L.A., Baishev N.E., Melnikov A.E., Nikolaeva E.S. Synthetic aperture radar Sentinel-1 for icing mapping of the Chulman Plateau and icing pattern assessment. Arctic and Subarctic Natural Resources. 2024, vol. 29, iss.1, pp. 80–95. (In Russian; abstract in English). DOI:10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95.
3. Васильчук Ю. К., Гинзбург А. П., Токарев И. В., Буданцева Н. А., Васильчук А. К., Паламарчук В. А., Блудушкина Л. Б., Слышкина Е. С. Морфология наледи Булуус, Улахан-Тарын, условия ее залегания и распределение стабильных изотопов кислорода и водорода в нижней части // Арктика и Антарктика. 2024. № 1. DOI:10.7256/2453-8922.2024.1.70079.
4. Алексеев В. Р. Подземные льды и гидротермическое движение грунтов на наледных участках речных долин // Лёд и Снег. 2015. № 1 (129). С.69–88. DOI: 10.15356/IS.2015.01.07.
   Alekseev V.R. Ground ice and hydrothermal ground motions on aufeis plots of river valleys. Ice and Snow. 2015, vol. 1, iss.129, pp.69–88. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.15356/IS.2015.01.07.
5. Менчук В. В., Кондратьев А. В. Источники гидрологических опасностей на территории Республики Бурятия // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления. 2013. №. 6 (45). С. 221–226.
6. Рыбальченко С. В., Верховов К. В. Природные наледи селевых бассейнов среднего и южного Сахалина // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. №. 1. С. 24–41. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-2.
   Rybalchenko S. V., Verkhovov K. V. Natural Ice Mounds of the Middle and Southern Sakhalin Mudflow Basins // Water Sector of Russia. 2021. No. 1. P. 24–41. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-2.
7. Выркин В. Б., Шеховцов А. И., Белозерцева И. А., Алёшина И. Н., Захаров В. В., Кичигина Н. В., Черкашина А. А. Современное состояние ландшафтов Окинской котловины (Восточный Саян) // География и природные ресурсы. 2012. №. 4. С. 98–107.
8. Землянскова А. А., Шихов А. Н., Макарьева О. М., Никитина П. А. Закономерности распространения наледей подземных вод, их связь с формированием речного стока и опасных явлений в Магаданской области // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. №. 1. С. 57–75. DOI: 10.35567/19994508-2025-1-57-75.
   Zemlianskova A. A., Shikhov A. N., Makarieva O. M., Nikitina P. A. The patterns of spring aufeis distribution, their relation with river runoff formation and hazardous phenomena in the Magadan region. Water Sector of Russia: Problems, technologies, Management. 2025, iss. 1, pp. 57–75. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.35567/19994508-2025-1-57-75.
9. Черных В.Н. Распространение и динамика наледей в Селенгинском среднегорье. Известия Русского географического общества. 2024. Т. 156. №2. С.155–168. DOI: 10.31857/S0869607124020055.
   Chernykh V. N. Distribution and Dynamics of Icings in the Selenga Middle Mountains. Proceedings of the Russian Geographical Society. 2024, vol. 156, iss.2, pp.155–168. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.31857/S0869607124020055.
10. Технический отчет по инженерным изысканиям по объекту: «Капитальный ремонт защитной дамбы на р. Чадана в г. Чадан Дзун-Хемчикского кожууна» Республики Тыва. Кызыл: ООО «Тывагипрозем», 2020. 314 с.

11. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 16. Ангаро-Енисейский район. Выпуск 1. Енисей. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 374 с.
12. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Ред. Блюман Б.А. Серия Алтае-Саянская. Лист M-46 – Кызыл. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 349 с.
13. Прокофьева Е. Д. Процесс национальной консолидации тувинцев. СПб.: Наука, 2011. 538 с. [Электронный ресурс] // Онлайн библиотека: Проект Музея антропологии и этнографии (Кунсткамера). 2011. https://lib.kunstkamera.ru/files/lib/978-5-02-038280-0/978-5-02-038280-0.pdf (дата обращения: 20.03.2026).
14. Толстихин Н. И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. Л., М.: Госгеолиздат; 1941. 204 с.
15. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова // Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. 191 с. URL: http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifrovanie-i-interpretaciya-kosmicheskih-snimkov.pdf. (дата обращения: 10.01.2026).
16. Гулый С. А., Скачков Ю. Б., Рожина М. С. Анализ причин продолжающегося формирования многолетней мерзлоты под хвойными лесами в условиях глобального потепления // Лесоведение. 2022. № 4. С. 419-431. DOI: 10.31857/S0024114822040039.
Gulyi S. A., Skachkov Yu. B., Rozhina M. S. Analysis of the causes of the ongoing formation of permafrost under coniferous forests in conditions of global warming // Forestry science. 2022, No. 4, pp. 419-431. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.31857/S0024114822040039.
17. Самбуу А. Д. География и ландшафты Тувы. Кызыл: Изд-во ТувГУ, 2018. 116 с.
18. Черноусенко Г. И. Засоленные почвы котловин юга Восточной Сибири. Москва: МАКС Пресс, 2022. 480 с. DOI:10.29003/m2657.978-5-317-06783-0.
19. Калиничева С. В. Методика выявления мерзлых и талых пород с использованием тепловых космических снимков в горных районах Южной Якутии. Дисс. … канд. геол.-мин. наук. – Якутск, 2019. 132с.
Kalinicheva S. V. Methodology for detecting frozen and thawed rocks using thermal satellite images in mountainous areas of South Yakutia. Ph.D (Geological and mineralogical sciences) Thesis]. Yakutsk, 2019. 132 p. (In Russian; abstract in English).

Поступила в редакцию / Received 22.02.2026
Принята к публикации / Accepted 19.05.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Строкова Людмила Александровна, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия; SPIN-code: 9050-1995, AuthorID: 144181, WoS ResearcherID: E-7332-2014, Scopus Author ID: 35073051700, ORCID: 0000-0001-9302-0630; e-mail: sla@tpu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ludmila A. Strokova, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia; SPIN-code: 9050-1995, AuthorID: 144181, WoS ResearcherID: E-7332-2014, Scopus Author ID: 35073051700, ORCID: 0000-0001-9302-0630; e-mail: sla@tpu.ru.