

Оригинальная статья

Применение радиолокационных космоснимков Sentinel-1 при картировании наледей Чульманского плато и оценка закономерностей их распространения

Л. А. Гагарин^{✉,1}, Н. Е. Баишев¹, А. Е. Мельников¹, Е.С. Николаева²

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Российская Федерация

✉ gagarinleo@yandex.ru

Аннотация

Исследования наледей в мировой литературе последнего десятилетия сводятся к поиску региональных закономерностей их распространения, составляются каталоги наледей различных регионов. В данной статье рассмотрены новые подходы к картированию наледей с применением разностного снежного индекса NDSI на основе снимков Sentinel-2 и неполно поляризационных радиолокационных снимков Sentinel-1. С помощью поляриметрического разложения радиосигнала и с использованием неконтролируемой классификации выделены контуры наледей в мае 2018–2022 гг., рассчитана их площадь. Проведено сравнение площадей наледей обоими методами, выполнена корреляция данных. Наилучшим временем оконтуривания наледей по радиолокационным снимкам является период начала снеготаяния, первая половина мая. Лишь 10 % всех наледей имели расхождение значений их площадей менее 10 %. Они расположены в долинах рек, в которых границы наледной поляны совпадают с поймой, а ширина их составляет не менее 100 м. Отраженный радиосигнал на таких объектах характеризуется объемным рассеянием с умеренной или высокой энтропией. Основная проблема применения радиолокационных снимков в картировании наледей связана с генерализацией границ в результате классификации полигонов при поляриметрическом разложении радиосигнала. Как правило, растительность и увлажненная поверхность поймы имеют общие черты отраженного радиосигнала с наледными объектами, в связи с чем происходит объединение их границ при классификации. На основе индекса NDSI было дешифровано 237 наледей в пределах Чульманского плато, суммарной площадью 134,44 км². Оценена роль природных факторов в развитии наледообразования. Проведенные исследования являются начальным этапом изучения наледей южной части криолитозоны. В дальнейшем планируется провести классификацию наледей по источникам их питания, детализировать закономерности наледообразования в регионе. Полученные результаты исследований позволят прогнозировать наледообразование при строительстве инженерных сооружений, оценивать ресурсы подземных вод.

Ключевые слова: Sentinel-1, Sentinel-2, наледи, индекс NDSI, радиолокационный снимок, Чульманское плато

Финансирование. Методическая часть исследования выполнена по гранту РНФ (№ 22-27-20118); исследование морфометрических параметров наледей, детализация закономерностей развития наледообразования и географическое положение наледей выполнены в рамках базового проекта ИМЗ СО РАН (№ 122012400106-7).

Для цитирования: 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;29(1):80–95. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95>

Synthetic aperture radar Sentinel-1 for icing mapping of the Chulman Plateau and icing pattern assessment

Leonid A. Gagarin^{✉,1}, Nyurgun E. Baishev¹, Andrey E. Melnikov¹, Elizaveta S. Nikolaeva²

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

✉gagarinleo@yandex.ru

Abstract

Modern research on icing is focused on regional patterns of its distribution and compilation of its catalogs from different regions. This study discusses new approaches to mapping icings using NDSI based on Sentinel-2 and SAR images of Sentinel-1. Using the polarimetric decomposition of a backscatter signal and unsupervised classification, we identified the contours of the icings in May 2018–2022, and calculated their areal extent. We compared the areas of icing using both methods, and correlated the data. Only 10 % of all icings showed a difference of less than 10 % in the area values. It is located in river valleys where the boundaries of the icing field coincide with a flood plain, and their width is at least 100 m. The reflected backscatter signal at such objects is characterized by moderate or high entropy volumetric scattering. On the basis of the NDSI index, 237 icings were identified within the Chulman Plateau, with a total area of 134.44 m². We assessed the main natural controls in the development of the icing process. This is the initial stage of studying icings in the southern part of the permafrost region. Furthermore, we plan to classify icings according to their sources of nutrition and to detail the patterns of icing formation in this region. The research results will make it possible to predict the formation of icing during engineering construction and evaluate groundwater resources.

Keywords: Sentinel-1, Sentinel-2, icing, NDSI, SAR, the Chulman Plateau

Funding. The methodological part of the study was funded by the Russian Science Foundation (Grant No. 22-27-20118); the study of morphometric parameters of icings, detailing the patterns of development of icings formation and location of icings were supported by the basic project of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS (No. 122012400106-7).

For citation: 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;29(1):80–95. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-1-80-95>

Введение

Территория Южной Якутии в последнее десятилетие активно осваивается. Растет количество мест добычи полезных ископаемых, строятся и реконструируются магистральные трубопроводы, железные и автомобильные дороги. Одним из наиболее опасных криогенных инженерно-геологических процессов этой территории является наледеобразование. При взаимодействии с инженерными сооружениями наледи деформируют мостовые опоры, приводят к просадкам насыпей, способствуют заболачиванию участков и избыточному увлажнению несущих грунтов. Для минимизации последствий воздействия наледеобразования на устойчивость линейных и промышленных сооружений необходимо знать закономерности развития этого процесса как в естественных условиях, так и при техногенных воздействиях.

Впервые исследования подземных вод и формируемых ими наледей на территории Чульман-

ского плато были проведены в 50-х г. прошлого столетия Н.А. Вельминой [1]. Ею было установлено, что наледи в пределах этого плато распространены в речных долинах и приурочены к незамерзающим источникам подземных вод. Далее работами Алданской научно-исследовательской мерзлотной станции С.Е. Суходольским, С.М. Фотиевым, В.Р. Алексеевым изучались региональные закономерности развития наледей, оценивалась внутри- и межгодовая динамика наледеобразования [2–4]. При региональных исследованиях наледей в Южной Якутии А.В. Гавриловым была предложена классификационная схема наледных ландшафтов при дешифрировании космических снимков [5, 6]. С помощью этой классификации по ландшафтными признакам А.В. Гаврилову удалось выделить генетический тип наледеобразующих вод и косвенно охарактеризовать тип водовмещающих таликов. Н.И. Чижова [7] рассчитала относительную наледность Алдано-Тимптонского междуречья и отразила ее на соответствующей кар-

те. В ходе этих исследований ею обнаружена закономерность влияния геолого-структурных, геоморфологических и мерзлотно-гидрогеологических факторов на величину наледности. Крупные работы по исследованию региональных закономерностей развития наледей Южной Якутии проводились А.Г. Топчиевым [8, 9]. Им составлена карта распространения наледей Южной Якутии, изучен их внутригодовой режим, проведена оценка естественных ресурсов подземных вод. Несмотря на это в открытом доступе карты наледей Чульманского плато в настоящее время нет.

Региональные исследования наледей южной окраины Алданского щита, начатые еще во времена строительства БАМа и проведенные позднее, обобщены М.Л. Марковым с соавторами [10]. Ими изучены особенности внутри- и межгодовой динамики наледеобразования, уточнены коэффициенты пересчета максимальных площадей наледей в конце зимы в их объемы по формуле Б.Л. Соколова, охарактеризована гидрологическая роль наледей указанной выше территории.

В последние годы работы по наледной тематике в мировом масштабе сосредоточены на составлении каталогов наледей и поиск региональных закономерностей их развития на различных континентах и в разных природных условиях [11–14].

Целью настоящей работы является модернизация метода картирования наледей с помощью радиолокационных (РЛ) снимков на примере территории Чульманского плато и применение этого метода для составления карты развития наледей и детализации закономерностей их распространения в современных климатических условиях. Результаты наших исследований будут использованы при составлении каталога наледей, усовершенствовании методики их картирования с помощью дешифрирования РЛ-изображений и оценке ее погрешности относительно общепринятого в настоящее время способа идентификации наледей разностным снежным индексом (NDSI).

Природные условия Чульманского плато

Чульманское плато расположено в пределах Нерюнгринского района Республики Саха (Якутия). Климат региона умеренно континентальный. Лето здесь длится с мая по сентябрь, а средняя годовая температура воздуха, по данным метеостанции в аэропорту г. Чульман, расположенной на высоте 844 м, составляет $-6,9^{\circ}\text{C}$. Из-за расчлененности рельефа в пределах Чуль-

манского плато характерно появление инверсии в формировании температур воздуха. В регионе, по сравнению с северными участками, выпадает повышенное количество летних атмосферных осадков, около 560 мм. Снежный покров достигает толщины в среднем 80 см, однако из-за частых ветров и метелей его мощность значительно дифференцирована в зависимости от ландшафта.

Границы Чульманского плато, расположенного в южной части Алданского щита, выделяются по морфоструктурным признакам и приурочены к контакту юрских и кембрийских отложений с архейскими и протерозойскими породами (рис. 1) [1, 15]. С севера плато ограничивается хребтом Западные Янги, с юга – Становым нагорьем, а с запада и востока – реками Алдан и Тимптон соответственно. Абсолютные высоты водоразделов изменяются от 750 до 950 м. Водоразделы плоские. Глубина вреза крупных речных долин (Чульман, Дурай, Чульмакан, Хатыми и др.) достигает 150–250 м.

В северном обрамлении Чульманского плато с поверхности залегают кембрийские закарстованные известняки. Эти породы погружаются к югу под юрские отложения. Последние представлены переслаиванием песчаников, алевроитов и алевролитов с прослоями углей. В северной части морфоструктуры юрские отложения имеют пологое залегание, в южной части осложняясь пликативной и дизъюнктивной складчатостью. Максимальная мощность этих отложений отмечена на южной границе Чульманского плато и достигает 4,5 км.

В тектоническом отношении современное Чульманское плато представляет собой Южно-Якутскую депрессию, заложенную еще в нижнеюрское время [15]. В кайнозое, на очередном этапе тектонических движений, Амурская плита начала смещаться к северу и произошел надвиг архейских пород на юрские, что и привело их к складчатому залеганию на юге. На севере же, в районе распространения кембрийских отложений, произошел крупный сброс, в результате которого юрские породы оказались опущены по сравнению с северным крылом сброса [15]. Современное положение тектонических разломов ориентировано в основном субширотно и связано с продолжающимся надвигом Амурской плиты на север.

Мерзлотно-гидрогеологические условия территории во многом предопределяются ее геолого-

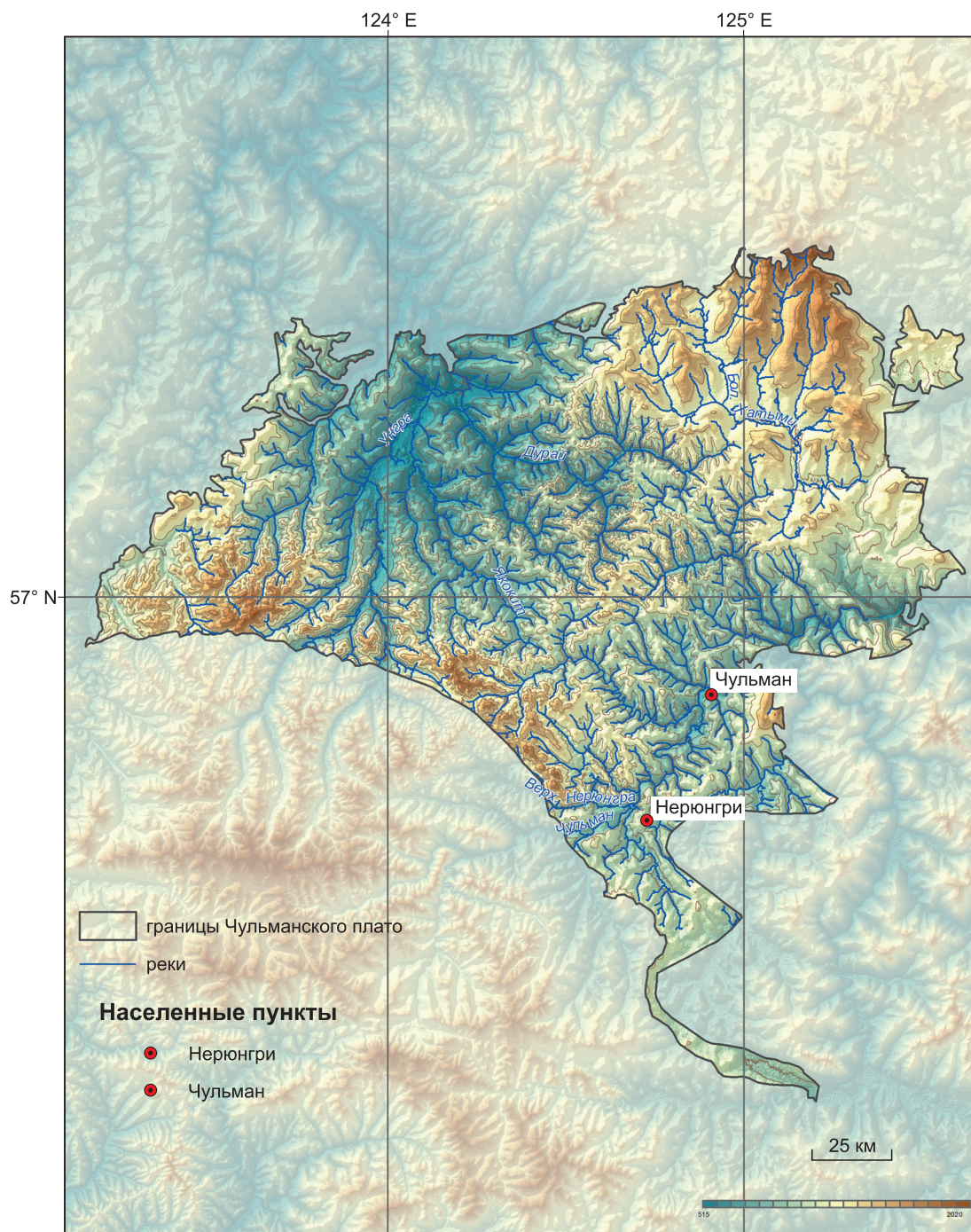


Рис. 1. Обзорная карта Чульманского плато

Fig. 1. Map of the Chulmanskoye Plateau

тектоническим строением. Адартезианский бассейн, приуроченный к Южно-Якутской депрессии (Чульманской впадине), имеет весьма высокие емкостные параметры. По отношению к многолетнемерзлым горным породам выделяются подземные воды над-, меж- и подмерзлотной цирку-

ляции. Однако, по мнению С.М. Фотиева [3], подземные воды на этой территории целесообразней подразделять по условиям их водообмена. Причиной тому служат высокая плотность и глубина проникновения тектонических разломов в пределах Чульманской впадины, способствующие

гидравлической связи указанных выше типов подземных вод. Воды зоны свободного водообмена приурочены к верхнему слою горных пород от водоразделов до уровня местных дрен (днищ рек и ручьев 1 и 2 порядков). Воды зоны затрудненного водообмена – распространены на глубинах от уровня местных дрен до уровня региональных дрен (днище долин рек Алдан и Тимптон). Глубже залегают подземные воды весьма затрудненного водообмена. Гидродинамический режим и химический состав подземных вод выделенных трех зон определяется трещиноватостью горных пород, их составом, условиями дренированности, геокриологическим строением и временем взаимодействия воды с ними. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков и вод поверхностного стока. Разгрузка осуществляется, как правило, в долинах рек и ручьев. Нередко в таких местах зимой формируются полыньи и наледы. Последние, по мнению А.Г. Гаврилова [6], в основном питаются водами напорно-фильтрационных таликов, приуроченных к тектоническим разломам, а также гидрогенных грунтово-фильтрационных таликов, сконцентрированных в аллювиальных отложениях. Часто наледы образуются смешением вод указанных двух типов таликов.

Многолетнемерзлые горные породы в пределах Чульманского плато имеют прерывистое распространение. Ими охвачены склоны (за исключением южной экспозиции) и речные долины. Данными И.Д. Белокрылова и А.И. Ефимова, а позднее сотрудниками МГУ [16] установлено, что для исследуемой территории характерна высотная поясность в распределении температур горных пород. Мощность многолетнемерзлой толщи достигает 150–200 м, а их температуры, в зависимости от типов ландшафта, изменяются от 0 до –2,0 °С. Также выявлено, что на плоских водоразделах плато развиты радиационно-тепловые талики, которые являются областями питания подземных вод зоны свободного водообмена. Азонально талики приурочены к речным долинам и связаны с тепловым воздействием фильтрационного водного потока, движущегося по тектоническим разломам.

Таким образом, пространственное положение наледей в пределах Чульманского плато определяется преимущественно геолого-тектоническим строением, мерзлотно-гидрогеологическими и климатическими условиями.

Материалы исследования

При исследовании наледей нами использовались методы дистанционного зондирования Земли. Картирование наледей осуществлялось двумя способами: первый – с применением разностного снежного индекса – NDSI [11, 13], второй – с помощью поляриметрического разложения радиосигнала на основе радарных космоснимков.

Для расчета NDSI были использованы снимки Sentinel-2 уровня обработки Level-2A, имеющего атмосферную коррекцию. Всего было использовано пять снимков с датой съемки май 2018–2022 гг. (табл. 1). Одним из требований к выбору снимка являлось частичное или полное отсутствие снежного покрова, чтобы выделяемые нами наледные объекты контрастировали на фоне окружающего ландшафта. Для расчета индекса использовались каналы B3 и B11, зеленый и ближний инфракрасный соответственно спутника Sentinel-2. NDSI рассчитывался по формуле

$$NDSI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} = \frac{(B3 - B11)}{(B3 + B11)}.$$

Пороговое его значение, позволяющее оконтуривать наледы, составило более 0,4. Далее проводилась фильтрация полученного раstra путем применения маски, которая представляет собой буферную зону шириной до 200 м, заданную на основе речной сети, так как картируемые нами наледы расположены в долинах рек. Речная сеть рассчитывалась в программе QGIS v.3.16 по данным рельефа SRTM с разрешением 30 м. Итоговый растр с наледями векторизовался, а полученные части полигонов, принадлежащих одной наледи, объединялись. Далее в программе QGIS v.3.16 рассчитывалась их площадь.

Второй способ ранее не применялся для картирования наледей, однако имеет большой потенциал для этого. В качестве исходных данных использованы радарные изображения спутников Sentinel-1. Для поляриметрического разложения радиосигнала применены неполно поляризационные снимки уровня обработки Level-1 Single Look Complex (SLC). Они имеют перекрестную (VH) и согласованную (VV) поляризации, снятые в режиме съемки Interferometric wide swath mode (IW). Этот выбор объясняется наличием информации о фазе радиосигнала, необходимой для анализа (разложения приходящего радиосигнала на составляющие). В исследовании использовано 16 снимков с датой съемки май 2018–2022 гг.

Таблица 1

Количество и даты использованных снимков Sentinel-1 и Sentinel-2

Table 1

Number and date of Sentinel-1 and Sentinel-2 images				
Год / Year	Даты снимков / Date			Облачность, % / Air cover
	Sentinel-1	Количество / Number	Sentinel-2	
2018	11.05.2018	1	18.05.2018	5,6
	09.05.2018	1		
	04.05.2018	1		
2019	16.05.2019	1	20.05.2019	0,1
	18.05.2018	1		
2020	28.04.2020	1	27.05.2020	2,5
	16.05.2020	1		
	17.05.2020	1		
	22.05.2020	1		
	28.05.2020	1		
	03.06.2020	1		
2021	07.05.2021	1	29.05.2021	59,9
	12.05.2021	1		
	24.05.2021	1		
	29.05.2021	1		
2022	07.05.2022	2	19.05.2022	0,1

(см. табл. 1). В этот период года наледи имеют максимальные размеры, и они отображаются контрастно с окружающими ландшафтами из-за растаявшего снежного покрова.

Первичная обработка радарных снимков проведена по следующему алгоритму: уточнение параметров орбиты – радиометрическая калибровка – склеивание отдельных полос съемки – обрезка полученного снимка по полигону (при необходимости) – преобразование пикселя изображения из наклонного в наземный диапазон (Multi-looking) – создание поляриметрической матрицы ковариации и когерентности для неполно поляризационного снимка (C2) – фильтрация спекл-шума – поправка на рельеф – разложение радиосигнала по параметрам H/α – неконтролируемая классификация Уишарта по параметрам H/α для неполно поляризационного снимка. Полученная классификация отраженного радиосигнала экспортировалась в tiff-файл для последующего его анализа в QGIS v.3.16.

В основе классификационной схемы (рис. 2) лежат такие параметры, как H и α [17]. Первый

характеризует энтропию возвращенного к радару радиосигнала, второй – угол его наклона, описывающий механизм рассеяния. На рис. 2 показаны девять классифицируемых зон. Наледи в момент их таяния (май) представляют собой увлажненные поверхности с неровным микрорельефом из-за включения неоднородностей и неравномерности стаивания. Поэтому на радарных снимках от подобных объектов происходит зеркальное отражение и объемное рассеяние радиосигнала соответственно, реже двойное переотражение радиосигнала. На классификационной схеме (см. рис. 2) это 6, 9, 5, 8 и 4 зоны соответственно.

В программе QGIS v. 3.16 ранее экспортированный классифицированный tiff-файл обрабатывается следующим образом. Не применяемые в исследовании зоны классификации 1–4, 7 удаляются, а к 4, 5, 8, 6 и 9 применяется маска, представляющая собой буферную зону шириной до 200 м, заданную на основе речной сети. Таким образом, мы отфильтровываем отличные от наледей объекты, имеющие аналогичную схему

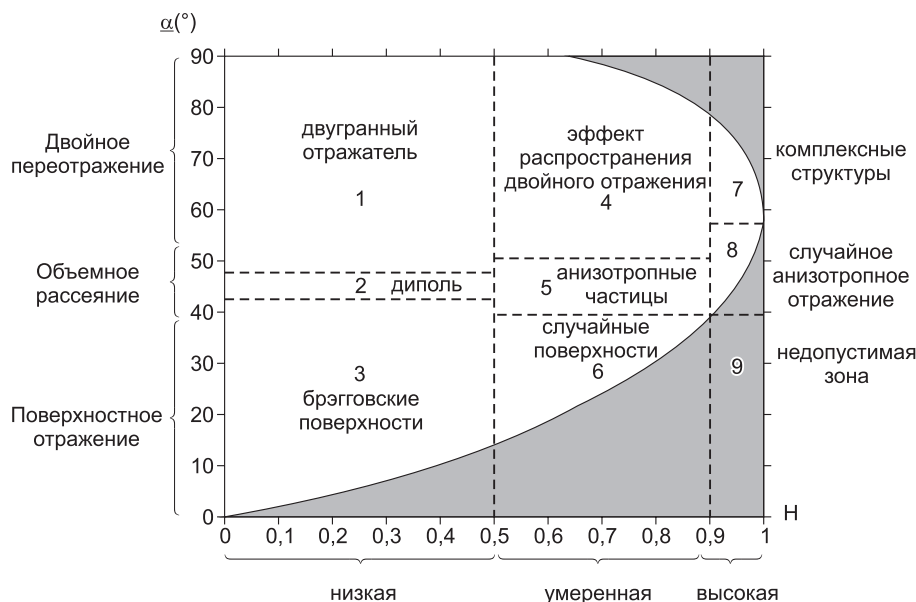


Рис. 2. Классификационная схема поляриметрического разложения радарного сигнала на снимке Sentinel-1

Fig. 2. Polarimetric decomposition classification of backscatter radar signal on Sentinel-1 image

отражения радиосигнала. В конечном итоге пиксели каждой наледи объединяются в группы и для них рассчитывается площадь полигона.

После расчета площадей наледей обоими способами проведено их сравнение между собой. Вычислено расхождение между полученными величинами.

На следующем этапе работ выполнен пространственный анализ расположения наледей Чульманского плато. Проведено исследование высотного их положения. Векторный слой наледей сравнен с слоем тектонических разломов и рыхлых и скальных отложений. Проведен анализ распределения наледей относительно порядков рек. Подобный анализ позволил предварительно оценить тип наледей по условиям их питания: наледи ключевых вод (положение наледей совпадает с разломами), грунтовых вод (положение наледей в пределах аллювиальных отложений) или смешанного типа (сочетание двух предыдущих факторов). Конечно, такая классификация наледей с помощью дистанционных методов является весьма условной и не отражает действительного природного гидрогеологического строения территории. Тем не менее, это позволит предварительно выявить общие закономерности распространения наледей в пределах Чульманского плато, наметить точки для более детального изучения их генезиса.

Для оценки климатического фактора наледообразования выполнен анализ метеоданных по метеостанции в пос. Чульман.

Результаты исследования

Идентификация наледей на РЛ-снимке. При дешифрировании наледей с помощью РЛ-снимков возможны несколько видов отраженного радиосигнала во время их весеннего таяния. Первый (рис. 3, а) обнаруживается в начале весеннего потепления (в нашем случае конец апреля–начало мая), когда средняя суточная температура воздуха еще имеет отрицательное значение, но в дневное время солнечная инсоляция приводит к таянию снежного покрова. В этот период времени наледь представляет собой ледяное тело с неровным микро- и мезорельефом, с отдельными участками излившихся на ее поверхность наледообразующих вод. От подобных объектов происходит преимущественно объемное рассеяние радиосигнала, что соответствует 8, реже 5 зонам классификации его поляриметрического разложения с высокой и умеренной энтропией соответственно (см. рис. 2). Сложнее интерпретируются участки с наледью, где ее мощность невелика и из-под нее оголяется древесная и кустарниковая растительность. Увлажненная поверхность и многочисленные ветви растений создают эффект двойного переотражения радиосигнала, обозначенный в зоне 4 классифика-

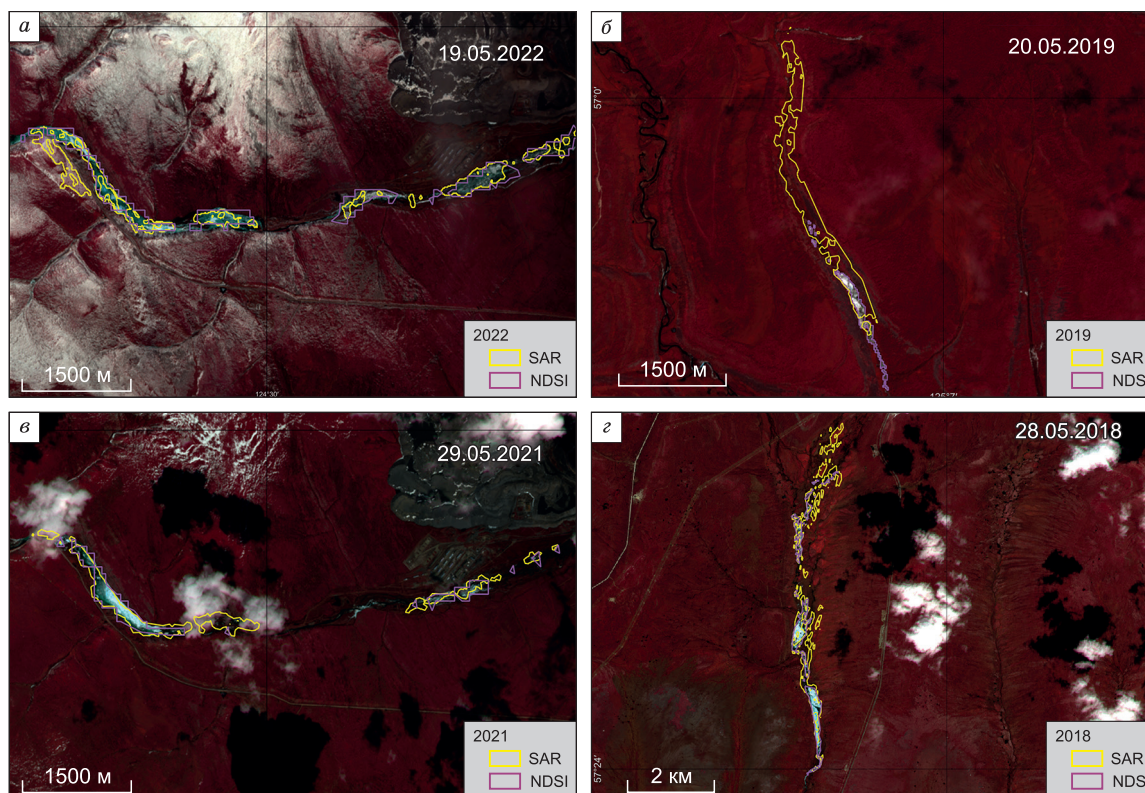


Рис. 3. Мультиспектральные изображения Sentinel-2 (синтез 3, 4 и 8 каналов) долин рек Верхняя Нерюнгра (а, в), Ынгир (б), Улахан-Муркугу (г) и границы наледей по данным РЛ-снимков (SAR) и индекса NDSI

Fig. 3. Multispectral imagery Sentinel-2 (bands 3, 4, 8) of the Verkhnyaya Nerunga River (a, в), Ingir River (б), Ulakhan-Merkugu River (г) valleys and icing areal extent based on SAR images and NDSI

ции при поляриметрическом его разложении (см. рис. 2). Также осложняют интерпретацию РЛ-снимков склоны, покрытые растительностью и увлажненные. На них создаются такие же эффекты отражения сигнала.

Второй тип отраженного радиосигнала (рис. 3, б–г) наблюдается во время активного весеннего таяния снега и начала половодья на реках (середина–конец мая). Наледь, как правило, находится в активной фазе деградации. Ее поверхность либо увлажнена (слои воды в трещинах или ее пленки на поверхности наледи), либо вовсе покрыта слоем воды (локальные озера, участки руслового стока). При поляриметрическом разложении радиосигнала от таких объектов происходит зеркальное его отражение с умеренной или высокой энтропией, что соответствует зонам 6 и 9 классификации (см. рис. 2).

Наледи в пределах Чульманского плато расположены преимущественно в долинах рек. В связи с этим при дешифрировании наледей с помощью РЛ-снимков на речных поймах имеются объекты, схожие по характеристикам отражен-

ного от них радиосигнала. Например, влажные участки с растительностью, расположенные на поверхностях с малым уклоном (см. рис. 3, б). При поляриметрическом разложении радиосигнала они имеют черты объемного его рассеяния или двойного переотражения, что затрудняет идентификацию границ наледи в их пределах.

Также важно отметить, что контуры наледей, отрисованные по РЛ-снимкам, фиксировались площадью не меньше 10^4 м^2 . Причина этого лежит в основе применяемой методики поляриметрического разложения неполно поляризованного РЛ-изображения (перекрестной и согласованной поляризаций). Согласно расчетному алгоритму, данный способ разложения радиосигнала позволяет качественно установить его механизм без детализации его природы [18]. В связи с этим наледи среднего размера (10^3 – 10^4 м^2) и меньше на РЛ-снимках затушевываются на фоне окружающего ландшафта, происходит осреднение контуров.

Морфометрические и количественные характеристики наледей. В ходе исследования были дешифрированы контуры наледей в пределах

Таблица 2
Количество наледей и их суммарная площадь
по данным дешифрирования РЛ-снимков
и индекса NDSI

Table 2
The number of icings and their total area
according to the interpretation
of radar images and the NDSI index

Год / Year	Количество / Number		Площадь, км ² / Area, sq. km	
	SAR	NDSI	SAR	NDSI
2018	74	137	32,49	23,85
2019	47	146	34,96	23,90
2020	99	53	38,62	10,64
2021	99	46	51,48	30,10
2022	137	60	63,55	49,84

Чульманского плато по состоянию на май 2018–2022 гг. Результаты расчета их площадей отражены в табл. 2. За исследуемый отрезок времени было идентифицировано 237 наледей. Из года в год их количество различалось значительно. Причиной тому служат как естественные природные условия, глубина сезонного промерзания горных пород, дебит родников и др.), так и облачность и не стаявший снежный покров на космических изображениях. В связи с этим, количество наледей, рассчитанных по индексу NDSI и указанных в табл. 2 по каждому году, оказалось, вероятно, заниженным.

Суммарная максимальная площадь всех наледей Чульманского плато за 2018–2022 гг. составила 134,44 км². Площади наледей в разные годы, оцененные первым и вторым методами, различаются в 1,5–3 раза (см. табл. 2). Это связано с несоответствием дат используемых РЛ- и мультиспектральных снимков. Наибольший промежуток времени съемки составлял до 7 и 12 дней в 2020 и 2022 гг. соответственно. Причиной тому, во-первых, являлась высокая облачность над объектом исследования в течение мая на мультиспектральных снимках Sentinel-2. Во-вторых, неоднозначность интерпретации изображений Sentinel-1 на участках увлажненной поймы, граничащей с наледями.

Согласно классификации наледей по их площади Н.И. Толстихина [19] в пределах Чульманского плато получены следующие данные (рис. 4). Больше всего наледей очень крупных (141 на-

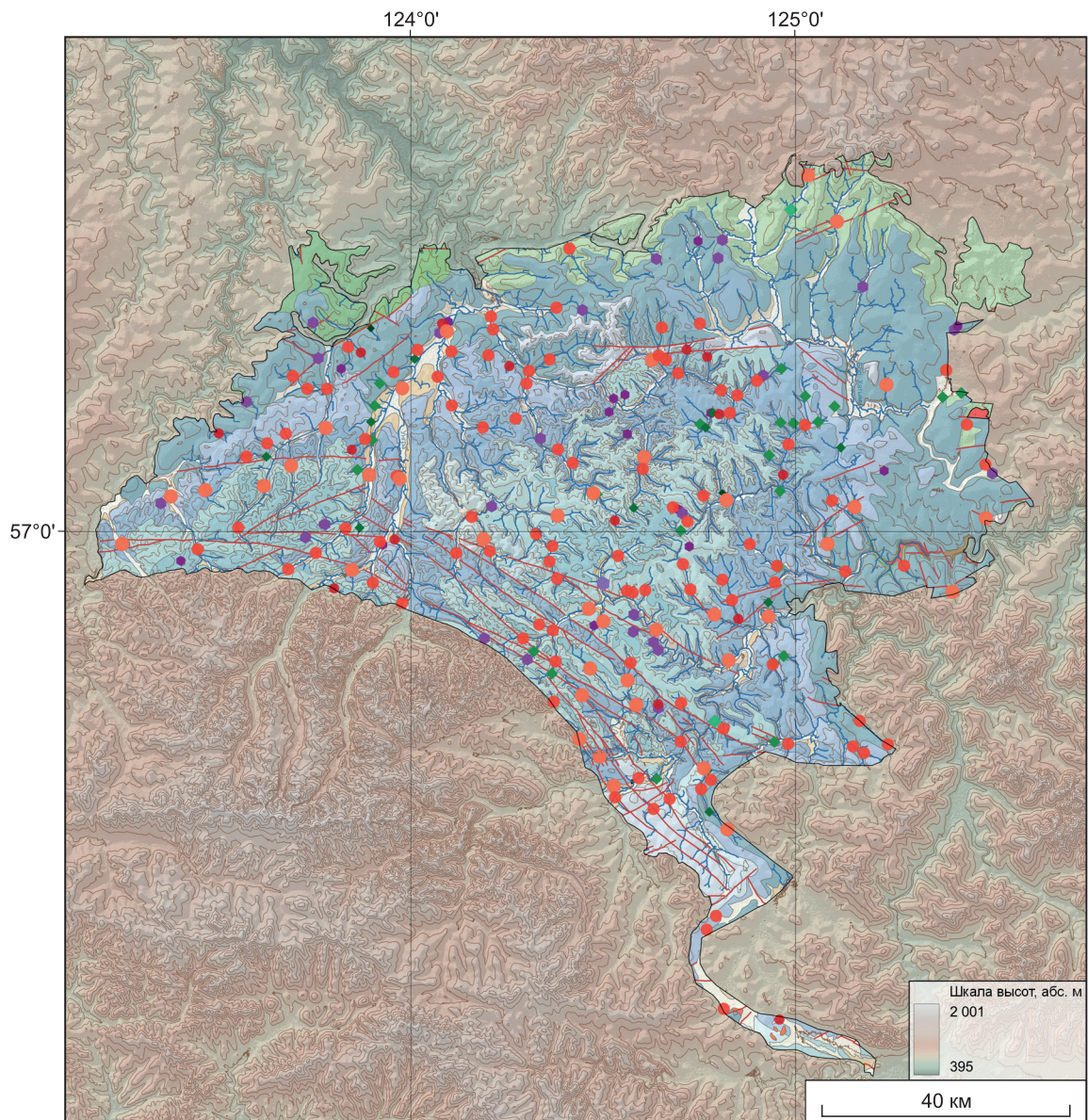
ледь), с площадью 10⁵–10⁶ м². Это порядка 59 % всех наледей этой территории. Наледи крупные (10⁴–10⁵ м²) и гигантские (>10⁶ м²) распределены в соотношении 21 и 18 % соответственно. Важно отметить, что наледи средние (10³–10⁴ м²) и меньше широко распространены на исследуемой территории, однако их идентификация по неполно поляризационным РЛ-снимкам затруднительна в силу генерализации параметров радиосигнала при его поляриметрическом разложении.

Обсуждение

Преимущества и ограничения применения РЛ-снимков в картировании наледей. Наилучшим временем определения плановых границ наледей подземных вод в пределах Чульманского плато является период начала снеготаяния (конец апреля–начало мая). В этот момент наледные объекты становятся наиболее контрастными по отношению к окружающему их ландшафту на РЛ-изображениях. Обратный радиосигнал, приходящий к спутнику от их контуров, характеризуется обратным его рассеянием с умеренной и высокой энтропией (5 и 8 сектор на рис. 2).

На рис. 5 представлены графики, отражающие разницу в площадях наледей, определенных по РЛ-снимкам и индексу NDSI. Согласно полученным результатам, коэффициент детерминации (R^2) низкий, 0,16–0,37. Во-первых, алгоритм разложения неполно поляризационного РЛ-снимка приводит к генерализации схожих свойств отраженных радиосигналов различных объектов. Это ведет к завышению площадей наледей. Во-вторых, использовались мультиспектральные и радарные изображения, полученные с небольшой разницей времени съемки. Тем не менее, существуют наледи, площади которых весьма близки. Подобных объектов обнаружено менее 10 %. Они приурочены к участкам долин, где границы поймы реки совпадают с границами наледной поляны. При этом их ширина составляет не менее сотни метров, что позволяет отчетливо выделить их на радарных изображениях (см. рис. 3, а, з).

Климатический фактор распространения наледей. С целью выявления причин разного количества и площадей наледей необходимо привести сведения о гидрометеорологических параметрах, которые напрямую влияют на интенсивность наледообразования. В период исследований средняя месячная температура воздуха с октября по



Наледи:

по РЛ-снимкам и индексу NDSI:

- гигантские ($> 1\,000\,000\text{ м}^2$)
- очень крупные ($100\,000\text{--}1\,000\,000\text{ м}^2$)
- крупные ($10\,000\text{--}100\,000\text{ м}^2$)

по индексу NDSI:

- ◆ гигантские ($> 1\,000\,000\text{ м}^2$)
- ◆ очень крупные ($100\,000\text{--}1\,000\,000\text{ м}^2$)
- ◆ крупные ($10\,000\text{--}100\,000\text{ м}^2$)
- ◆ средние ($1000\text{--}10\,000\text{ м}^2$)

по РЛ-снимкам

- гигантские ($> 1\,000\,000\text{ м}^2$)
- очень крупные ($100\,000\text{--}1\,000\,000\text{ м}^2$)
- крупные ($10\,000\text{--}100\,000\text{ м}^2$)
- средние ($1000\text{--}10\,000\text{ м}^2$)
- границы Чульманского плато
- реки
- тектонические разломы

γPt	$J_2 dr_1$
Q_3	$\gamma_2 A$
$J_3 gr$	Cm_{jd}
$J_1 +_2 \tilde{cl}$	$gn-\gamma A$
$J_1 jt$	J_2-3gr
Q_4	$J_2 dr$
$J_2 dr_2$	$J_1-2 \tilde{cl}$

Рис. 4. Карта распространения наледей Чульманского плато

Fig. 4. Map of icing distribution within the Chulmansky Plateau

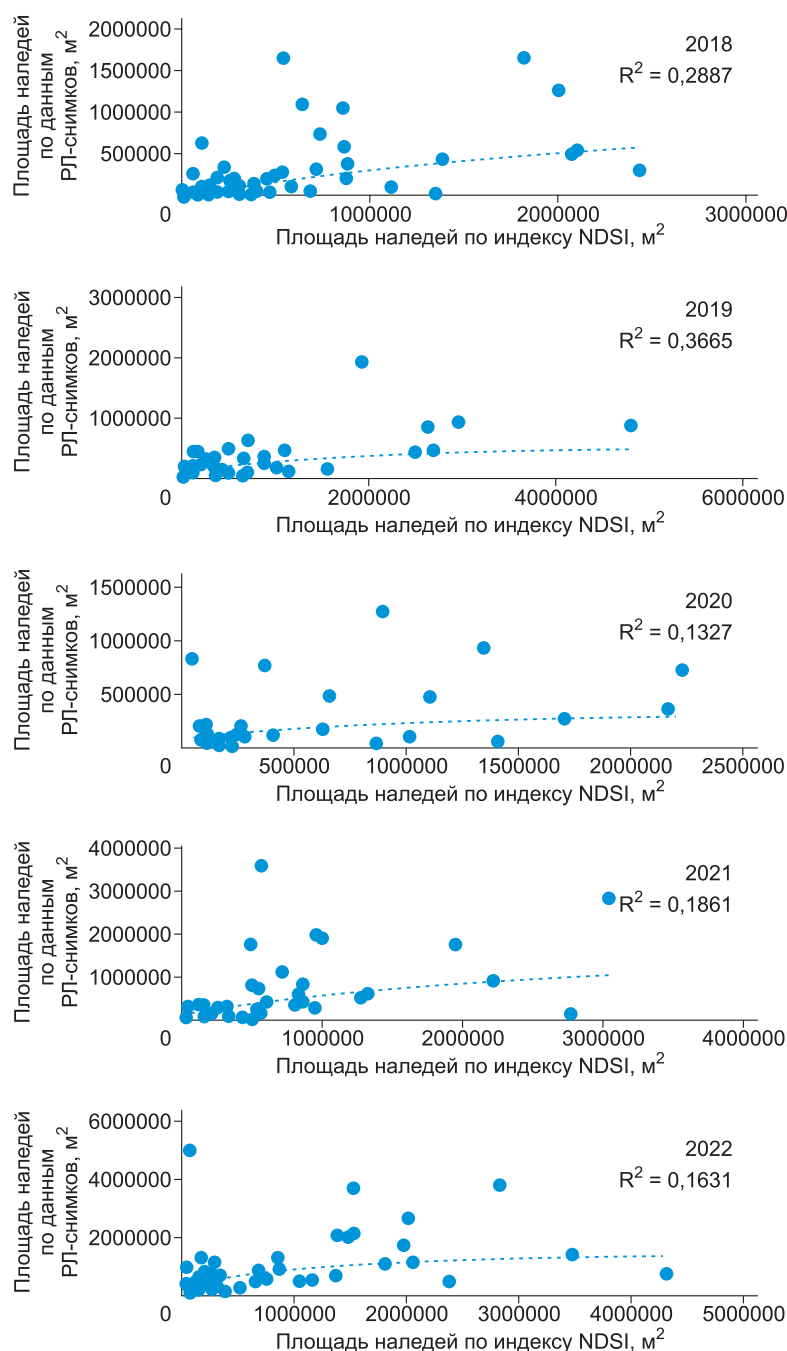


Рис. 5. Графики корреляции данных площадей наледей Чульманского плато, определенные методами дешифрирования РЛ-снимков и индекса NDSI за 2018–2022 гг.

Fig. 5. Graph of icing areal extent correlation of the Chulmanskoye Plateau determined by SAR and NDSI (2018–2022)

декабрь 2018–2021 гг. была выше нормы на 0,1–4,5 °С (рис. 6). Лишь начало зимы 2017 г. выдалось холоднее на 0,8–1,8 °С. Вторая половина зимы с января по май была теплее средней многолетней нормы на 0,1–5,5 °С в 2019 г. и 2020 г. Наиболее суровые зимы зафиксированы в 2018,

2021 и 2022 гг. со значениями температуры ниже нормы на 0,1–1,6, 1,2–5,6, 0,2–2,0 °С соответственно. Стоит повторить, что для исследуемой территории характерна высотная поясность в распределении температур воздуха, в связи с чем в речных долинах значения их

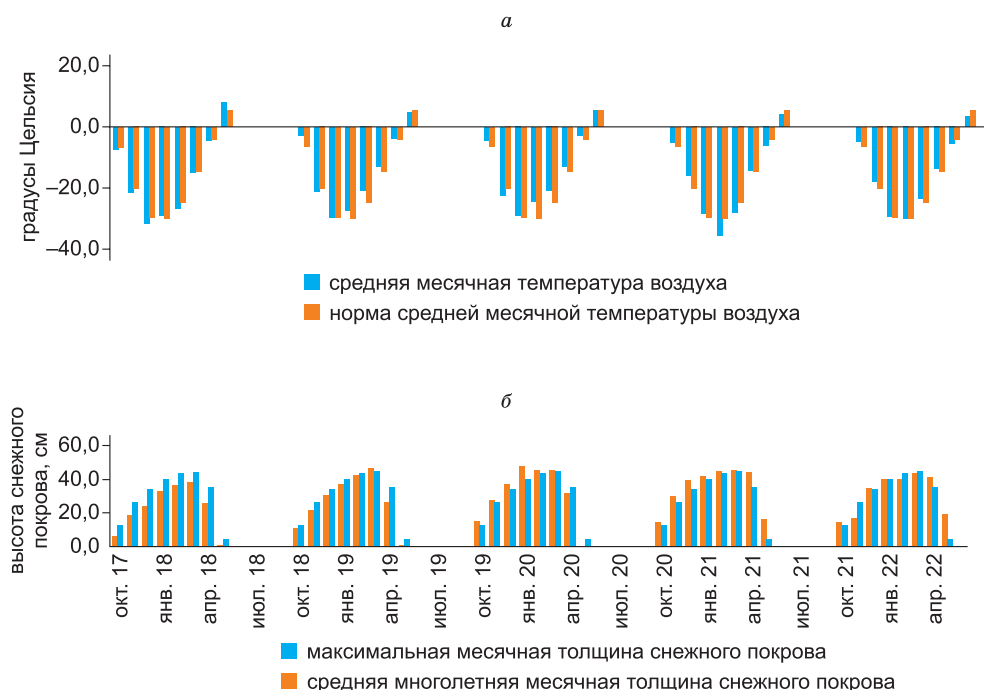


Рис. 6. График распределения средних месячных температур воздуха (а) и высоты снежного покрова (б) по данным метеостанции в пос. Чульман за 2017–2022 гг.

Fig. 6. Graph of mean monthly air temperature distribution (а) and snow depth (б) based on the Chulman weather station (2017–2022)

должны быть несколько ниже, чем на водоразделах.

Мощность снежного покрова на территории Чульманского плато зависит от местных ландшафтных условий. Значительным фактором является также ветровой перенос снега. При отсутствии фактических данных о снегонакоплении в речных долинах в период исследований приведем лишь общую тенденцию распределения высоты снега по годам на основе сведений по метеостанции на водоразделе (пос. Чульман). По данным рис. 6, по мощности снежного покрова наиболее близкими к его средней многолетней норме выдались зимы 2019–2022 гг. Однако в эти годы толщина снежного покрова была в целом выше средней на 0,7–6,3 см. Малоснежными выдались зимы 2017–2018 и 2018–2019 гг. Разница со средней многолетней нормой достигала 6,3–10,5 см и 0,9–9,2 см соответственно.

Величина снежного покрова и зимние температуры воздуха являются одними из главных факторов формирования глубины сезонного промерзания горных пород. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее благоприятные погодные условия для глубокого сезонного промер-

зания горных пород, и соответственно, наледеобразования существовали в малоснежные и холодные зимы. Таковыми являлись 2017–2018 гг., в меньшей степени 2021 и 2022 гг.

Геологический и мерзлотно-гидрогеологический факторы распространения наледей. Согласно составленной карте распространения наледей Чульманского плато (см. рис. 4), основная часть очень крупных и гигантских наледей приурочена к зонам тектонической трещиноватости горных пород. Вместе с этим, большую роль в активизации наледеобразования играют расчлененность рельефа территории и наличие сезонных и многолетнемерзлых горных пород. Последние обеспечивают напорный режим подземных вод. При этом разгрузка их осуществляется не обязательно по напорно-фильтрационным таликам, пространственно приуроченным к тектоническим разломам, но и в руслах рек через грунтово-фильтрационные талики (центральная часть Чульманского плато). На севере исследуемой территории, где расположена граница юрских и кембрийских отложений, наледей мало, несмотря на несогласное залегание и различие в литологическом составе горных пород. Рельеф здесь более сглаженный. Косвенным признаком важности

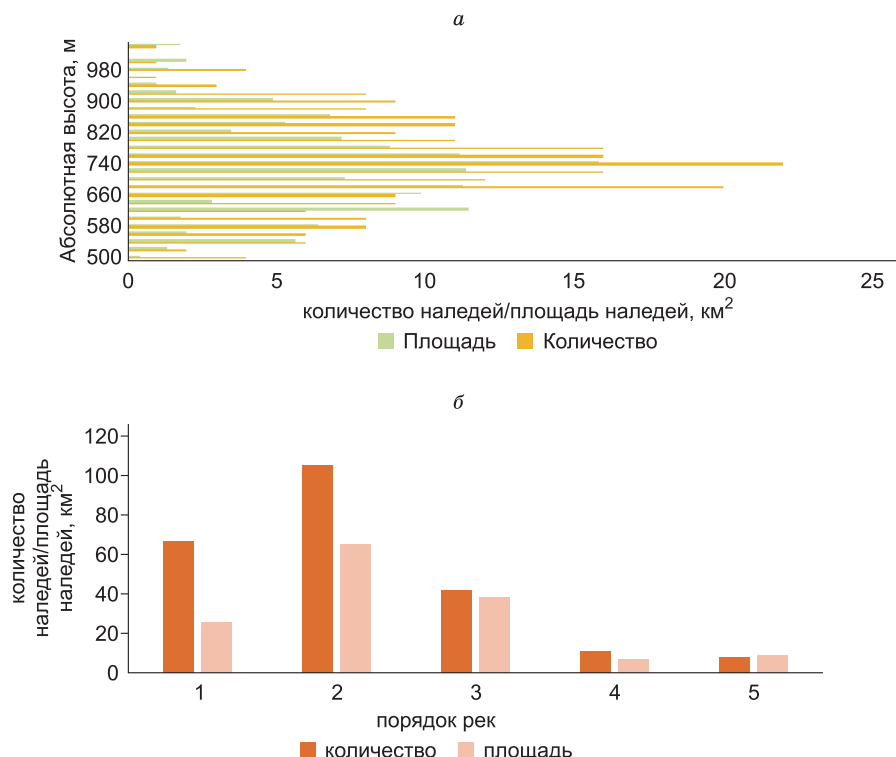


Рис. 7. Графики распределения количества и площади наледей Чульманского плато по высоте местности (а) и порядкам рек (б)

Fig. 7. Graph of amount and areal extent of icings distribution of the Chulmanskoye Plateau versus elevation (a) and river orders net (б)

роли сезонного промерзания водоносных таликов в наледеобразовании является его межгодовая динамика. Она проявляется в относительно теплые зимы: в 2019 и 2020 гг., когда глубина сезонного промерзания грунтово-фильтрационных таликов невелика, суммарная площадь наледей почти в 2 раза меньше, чем в более холодные зимы (см. табл. 2). Все эти выводы вполне согласуются с полученными ранее А.В. Гавриловым и А.Г. Топчиевым [6, 8, 9].

Режим подземных вод, участвующих в формировании наледей, играет важную роль в межгодовой динамике наледеобразования. Многолетними исследованиями установлено, что наледы, питающиеся совместно водами напорно-фильтрационных и грунтово-фильтрационных таликов, формируют, как правило, очень крупные и гигантские наледы [1–3, 6, 8, 20]. Из года в год отмечена значительная вариативность их морфометрических параметров, однако четкой связи этих изменений с основными показателями климата не обнаружено [2, 20]. Лишь небольшие наледы, питающиеся подземными водами зоны свободного водообмена, отчетливо реагируют на количество выпав-

ших атмосферных осадков за предыдущий теплый сезон [21].

Географическое положение наледей. В результате анализа полученных нами данных установлено, что наледный пояс в пределах Чульманского плато приурочен к абсолютным отметкам рельефа 520–1060 м (рис. 7, а). Наибольшее количество наледей (~60 %) расположено в диапазоне высот 680–860 м. Стоит отметить, что верхняя граница этого диапазона совпадает с отметками водоразделов Чульманского плато (820–1000 м). Наледи, фиксируемые на верхней границе диапазона их наибольшего скопления, располагаются в основном на юге и севере плато, где оно граничит с более высокими Становым и Западные Янги хребтами соответственно. Нижняя граница диапазона наибольшего развития наледей совпадает с глубинами вреза большинства местных водотоков. В связи с этим можно сделать вывод, что в питании большего количества наледей Чульманского плато участвуют, согласно разделению С.М. Фотиева [3], подземные воды зоны свободного водообмена, которые в этих долинах разгружаются.

Наледи, образующиеся в более глубоких долинах (реки Левая и Правая Унгра, Дурай и др.) на отметках 500–680 м немногочисленны, составляют около 24 % всего их количества. В днищах этих рек осуществляется разгрузка подземных вод зоны затрудненного и весьма затрудненного водообмена. По данным С.М. Фотиева [3], некоторые родники, формирующие наледи в глубоких долинах рек, имели сульфатный и хлоридный составы воды, что свидетельствует об их длительном периоде взаимодействия с горными породами. Дебиты источников этих вод высокие, а формируемые ими наледи классифицируются как очень крупные и гигантские. Эта закономерность отображается на рис. 7, а: при сравнительно небольшом количестве наледей на высотах до 680 м их суммарная площадь составляет более 28 % площади всех наледей. Подобная зависимость также отражается на графике распределения количества и размеров наледей относительно порядков рек (рис. 7, б). В более глубоких долинах (от 3-го порядка и выше) малому количеству наледей соответствует около половины их суммарной площади.

Выводы

Проведенные исследования по применению радарных изображений для картирования наледей подземных вод Чульманского плато являются первой попыткой и требуют дальнейшего усовершенствования. Несмотря на существенные ограничения в определении плановых границ наледей с помощью поляриметрического разложения неполно поляризационных радарных снимков, получен положительный опыт. Он связан с приемлемой точностью (до 10 %) определения площади наледи относительно индекса NDSI. Наилучшим временем съемки для применения этого метода картирования является период начала снеготаяния (первая половина мая). Наледи отчетливо идентифицируются на радарных изображениях, а механизм радиосигнала представляет собой объемное его рассеяние при умеренной или высокой энтропии. Местоположение таких участков наледообразования характеризуется совпадением контуров наледных полей и речной поймы, имеющих ширину не менее сотни метров. Примером может служить наледь в долине р. Верхняя Нерюнгра.

Основные ограничения применения неполно поляризационных радарных снимков при карти-

ровании наледей связаны с генерализацией схожих механизмов отражения радиосигнала от наледей и окружающих их объектов при поляриметрическом разложении радиосигнала. Такие случаи установлены на участках с широкой поймой реки, где талые снеговые воды и участки с растительностью совместно или порознь создают эффект двойного переотражения или объемного рассеяния радиосигнала соответственно с умеренной или высокой его энтропией. Сопоставление границ наледей, полученных методом дешифрирования РЛ-снимков с границами наледей по индексу NDSI, показало низкую сходимость, коэффициент детерминации составил не более $R^2 < 0,37$.

По результатам дешифрирования снимков с помощью индекса NDSI было насчитано 237 наледей суммарной площадью 134,44 км². Наледный пояс в пределах Чульманского плато развит в диапазоне высот 520–1060 м с наибольшей концентрацией наледей на отметках 680–860 м. Помимо геолого-тектонического, мерзлотно-гидрогеологического и климатического факторов, важную роль в развитии наледообразования играет рельеф местности. На Чульманском плато наледи преимущественно залегают в долинах рек, приуроченных к высокому градиенту рельефа.

Список литературы / References

1. Вельмина Н.А., Узембло В.В. *Гидрогеология центральной части Южной Якутии*. М., Л.: Издательство Академии наук СССР; 1959. 178 с.
2. Velmina N.A., Uzemblo V.V. *Hydrogeology of the central part of South Yakutia*. Moscow, Leningrad: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1959. 178 p.
3. Алексеев В.Р. *Ландшафтная индикация наледных явлений*. Новосибирск: Наука; 2005. 363 с.
4. Alekseev V.R. *Landscape indication of icing processes*. Novosibirsk: Nauka; 2005. 363 p. (In Russ.)
5. Фотиев С.М. *Подземные воды и мерзлые породы Южно-Якутского угленосного бассейна*. М.: Наука; 1965. 230 с.
6. Fotiev S.M. *Groundwater and frozen ground of the Southern Yakutian Coal Basin*. Moscow: Nauka; 1965. 230 p. (In Russ.)
7. Суходольский С.Е. *Парагенезис подземных вод и многолетнемерзлых пород*. М.: Наука; 1982. 152 с.
8. Sukhodolskiy S.E. *Paragenesis of groundwater and permafrost*. Moscow: Nauka; 1982. 152 p. (In Russ.)
9. Гаврилов А.В. О геокриологической информативности спектрональных аэрофотоматериалов (на примере Чульманского района). В кн.: *Мерзлотные ис-*

следования. 1979. Выпуск XVIII. М.: Моск. ун-т; 1979. С. 141–153.

Gavrilov A.V. On geocryological information content of spectrazonal aerial photos (on example of the Chulman region). In: *Permafrost study. 1979; Issue 18*. Moscow: Moscow University; 1979, pp. 141–153. (In Russ.)

6. Гаврилов А.В. Классификация наледных участков южной части криолитозоны в целях изучения наледей аэро- и космическими методами. *Вестник Московского университета. Серия 4 Геология*. 1981;(1): 73–85.

Gavrilov A.V. Classification of icing sites of Southern part of cryolitozone for studying icings by aerial and cosmic techniques. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 1981;(1):73–85. (In Russ.)

7. Чиждова Н.И. Характеристика относительной належности Алдано-Тимптонского междуречья. *Вестник Московского университета. Серия 4 Геология*. 1980;(1):60–64.

Chizhova N.I. Characteristic of relative icings of the Aldan-Timpton watershed. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 1980;(1):60–64. (In Russ.)

8. Топчиев А.Г. Космические методы изучения долин и наледей Чульманского района. В кн.: Спиридонов А.И., Сладкопцев С.А. (ред.). *Вопросы географии. Сборник 111: Геоморфология и строительство*. М.: Мысль; 1979. С. 169–175.

Topchiyev A.G. Space methods of studying aufeises and river valleys of the Chulman region. In: Spiridonov A.I., Sladkoptev S.A. (eds.). *Issues of Geography. Geomorphology and construction*. Moscow: Mysl'; 1979, pp. 169–175. (In Russ.)

9. Топчиев А.Г. Исследование наледей и подземных вод на территории криолитозоны по данным космической съемки. В кн.: *Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции, 30 сентября 2013 г. Часть 2*. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком»; 2013. С. 145–147.

Topchiyev A.G. Study of icings and groundwater on permafrost territory based on satellite imageries. In: *Science and education in 21st century: Proceedings of the International conference, 30 September 2013. Part 2*. Tambov: ООО “Consulting company Yukom”; 2013, pp. 145–147. (In Russ.)

10. Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. *Належи зоны БАМ: экспедиционные исследования*. СПб.: Нестор-История; 2017. 319 с.

Markov M.L., Vasilenko N.G., Gurevich E.V. *Iceings of the BAM zone: expeditionary research*. Saint-Petersburg: Nestor-Istoriya; 2017. 319 p. (In Russ.)

11. Makarieva O., Shikhov A., Nesterova N., Ostashov A. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia). *Earth System Science Data*. 2019;11(1): 409–420. <https://doi.org/10.5194/essd-11-409-2019>

12. Morse P.D., Wolfe S.A. *Iceings in the Great Slave region (1985–2014), Northwest Territories, mapped from Landsat Imagery*. Geological Survey of Canada, Open File 7720. 2014. <https://doi.org/10.4095/295540>

13. Brombierstäudl D., Schmidt S., Nüsser M. Distribution and relevance of aufeis (icing) in the Upper Indus Basin. *Science of the Total Environment*. 2021;780: 146604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146604>

14. Gagarin L., Wu Q., Cao W., Jiang G. Iceings of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, Western China: origins, hydrology and distribution. *Water*. 2022;14:2396. <https://doi.org/10.3390/w14152396>

15. Долгушин И.Ю. *Геоморфология западной части Алданского нагорья*. М.: Издательство АН СССР; 1961. 205 с.

Dolgushin I.Yu. *Geomorphology of Western part of the Aldan Highland*. Moscow: USSR Academy of Sciences Publishing House; 1961. 205 p. (In Russ.)

16. Труш Н.И., Чиждов А.Б., Чиждова Н.И. и др. *Южная Якутия: Мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горно-промышленного района*. М.: Издательство Московского университета; 1975. 444 с.

Trush N.I., Chizhov A.B., Chizhova N.I., et al. *Southern Yakutia: Permafrost-hydrogeological and engineering-geological settings of the Aldan mining region*. Moscow: Moscow University; 1975. 444 p. (In Russ.)

17. User Guides - Sentinel-1 SAR [<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/userguides/sentinel-1-sar>]. 2023 [процитировано 25 сентября 2023 г.]. Доступно: <https://sentinel.esa.int>

18. Cloude S.R. The dual polarisation entropy/alpha decomposition: a pascars case study. In: *Proceedings of the 3rd international workshop on science and applications of SAR polarimetry and polarimetric interferometry, Frascati, 22–26 January, 2007*. Frascati; 2007, pp. 1–6.

19. Толстикхин Н.И. *Подземные воды мерзлой зоны литосферы*. Л., М.: Госгеоллиздат; 1941. 204 с.

Tolstikhin N.I. *Ground waters of frozen zone of lithosphere*. Leningrad, Moscow: Gosgeolizdat; 1941. 204 p. (In Russ.)

20. Завадский Ф.Р., Железняк М.Н. Динамика формирования гигантских наледей в бассейне реки Верхняя Нерюнгра в условиях работы крупного водозабора. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013;77(6):55–60.

Zavadskiy F.R., Zheleznyak M.N. Gigantic iceings formation dynamics in Upper Nerungra River Basin under large water intake facility operation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;77(6):55–60. (In Russ.)

21. Gagarin L., Melnikov A., Ogonerov V., Bazhin K. Phenomena caused by seismic and geocryological processes across linear infrastructure, South Yakutia, Russia. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2017;9(4):352–362.

Об авторах

ГАГАРИН Леонид Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5354-084X>, ResearcherID: AAF-8768-2021, Scopus Author ID: J-4238-2018, SPIN: 5751-8293, e-mail: gagarinleo@yandex.ru

БАИШЕВ Нюргун Егорович, аспирант, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7135-3899>, ResearcherID: AAF-6965-2021, e-mail: nyurgunbaishev@mail.ru

МЕЛЬНИКОВ Андрей Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-7910-9441>, Researcher ID: O-4081-2017, Scopus Author ID: 57208581176, SPIN: 5751-8293, e-mail: MelnikowDron@mail.ru

НИКОЛАЕВА Елизавета Сергеевна, студент, <https://orcid.org/0009-0005-3535-5316>, ResearcherID: JMC-1584-2023, SPIN 6444-1954, e-mail: nikolaeva_lizaveta@mail.ru

About the authors

GAGARIN, Leonid Aleksandrovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Scientific Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5354-084X>, ResearcherID: AAF-8768-2021, Scopus Author ID: J-4238-2018, SPIN: 5751-8293, e-mail: gagarinleo@yandex.ru

BAISHEV, Nyurgun Egorovich, Graduate Student, Junior Scientific Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7135-3899>, ResearcherID: AAF-6965-2021, e-mail: nyurgunbaishev@mail.ru

MELNIKOV, Andrey Evgen'evich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Scientific Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-7910-9441>, Researcher ID: O-4081-2017, Scopus Author ID: 57208581176, SPIN: 5751-8293, e-mail: MelnikowDron@mail.ru

NIKOLAEVA, Elizaveta Sergeevna, Student, <https://orcid.org/0009-0005-3535-5316>, ResearcherID: JMC-1584-2023, SPIN 6444-1954, e-mail: nikolaeva_lizaveta@mail.ru

Поступила в редакцию / Submitted 30.10.2023

Поступила после рецензирования / Revised 01.02.2024

Принята к публикации / Accepted 27.02.24