

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 552.321.(571.56)

DOI 10.31242/2618-9712-2021-26-1-6

О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360 «Лена» по данным мультиспектральных космических снимков

Н.Е. Баишев*, В.В. Шепёлев, Л.А. Гагарин

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

*nyurgunbaishev@mail.ru

Аннотация. В области распространения многолетнемерзлых пород и глубокого сезонного промерзания техногенное воздействие неизбежно трансформирует природные условия. В частности, техногенное воздействие на криолитозону приводит к нарушению стока поверхностных и подземных вод, в результате чего формируются наледы на тех участках, где их раньше не было, а также изменяются морфометрические параметры, режимы формирования и стаивания существующих природных наледей. Трасса ФАД «Лена» протягивается от пос. Невер до г. Якутск и составляет 1157 км. В рамках проведенных исследований рассматривался лишь наледоопасный участок автодороги на отрезке от Невера до Томмота. В качестве основного метода исследований применялось дистанционное зондирование Земли. Использовались мультиспектральные космические снимки Sentinel-2 с атмосферной корректировкой. Обработка данных космической фотосъемки проводилась полуавтоматическим способом в ГИС-программе QGIS 3.16. Идентификация наледей на космоснимке осуществлялась с помощью нормализованного разностного снегового индекса NDSI (Normalised Difference Snow Index). На исследуемом участке автодороги, протяженность которого составляет 712 км, в настоящее время формируется 107 наледей. Большинство притрассовых наледей по площади относятся к III (1000–10000 м²) и IV (10000–100000 м²) категориям. Наибольшее их количество формируется в интервале абсолютных высот 500–900 м. В геологическом отношении большинство наледей приурочены к четвертичным и протерозойским отложениям, а также к интрузивным породам мелового возраста. Установлено, что суммарная площадь наледей, формируемых на автодороге «Лена» на участке от Невера до Томмота, в 2018–2019 гг. повысилась почти в 6 раз по сравнению с данными 1927–1928 гг.

Ключевые слова: наледь, индекс NDSI, Sentinel-2, федеральная автодорога А-360 «Лена».

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект № 20-55-71005 – гидрология, криолитозона и устойчивость в восточном секторе российской Арктики и Субарктики, проект № 20-05-00670А – надмерзлотные субаэральные талики в сплошной криолитозоне Центральной Якутии.

Введение

На территориях с многолетнемерзлыми породами и глубоким сезонным промерзанием Аляски, Канады, Китая и России широко распространены наледы. Изучение этого опасного криогенного явления имеет большое значение с научной и практической точек зрения [1–6]. Особого внимания, безусловно заслуживают наледы, образующиеся в результате техногенного воздействия.

При инженерном освоении территорий неизбежно нарушаются природные условия и формируются уникальные природно-техногенные систе-

мы. В этих системах взаимодействие природных процессов и явлений с инженерными объектами имеет весьма сложный характер. В частности, техногенное воздействие на криолитозону приводит к нарушению стока поверхностных и подземных вод, в результате чего могут формироваться наледы на тех участках, где раньше их не было, а также трансформироваться морфометрические параметры, режимы формирования и стаивания существующих природных наледей.

Взаимосвязь наледей и инженерных сооружений рассматривались в ряде работ В.Р. Алексее-

ва [3], С.М. Большакова [7], Н.А. Вельминой [8], В.А. Дементьева [9], Л.Д. Ивановой [10], А.П. Казакова [11], В.Г. Кондратьева [12], А.И. Кузьминых [13], А.Н. Курчатовой [14], Г.А. Низовкина [15], В.Г. Петрова [16], Е.А. Румянцева [17], Н.Ф. Савко [18], А.А. Цвид [19], А.М. Чекотило [20], Е.В. Шушакова [21] и др.

Общеизвестно что, наледи негативно воздействуют на мостовые переходы и водопропускные устройства дорожных магистралей, особенно большой протяженности, к числу которых относится федеральная автодорога А-360 «Лена» (ФАД «Лена»).

Впервые на Амуро-Якутской автодорожной магистрали (старое название ФАД «Лена») от Невера до Томмота в зиму 1927–1928 гг. наледи обследовал Валерьян Гаврилович Петров [16]. Им было установлено, что 5 из 122 исследованных наледей не оказывали негативного влияния на магистраль. Из негативно воздействующих наледей 61 сформировались в долинах рек, 21 – на равнинных участках и 35 – в горах. Наледями было деформировано 10 мостовых переходов, два из них были полностью разрушены [16]. В.Г. Петровым были применены противоналедные устройства, теоретически разработанные

М.И. Сумгиным [20]. Спустя более 30 лет наледи на ФАД «Лена» от Невера до Чульмана в зиму 1959–1960 гг. обследовали В.Р. Алексеев и В.А. Усов [22]. Ими было выявлено 64 наледи. Все они негативно воздействовали на автодорогу и мостовые переходы [22].

Анализ материалов, полученных В.Г. Петровым [16], В.Р. Алексеевым и В.А. Усовым [22] показал, что за относительно небольшой период (с 1927 по 1960 г.) трансформировались отдельные участки прохождения автомагистрали, а также климатические, мерзлотные и гидрогеологические условия. В связи с этим изменились морфометрические параметры и возросло количество наледей на ФАД «Лена» от Невера до Чульмана.

Основной целью настоящей работы является установление закономерностей изменений количества и площадей наледей на ФАД «Лена» от Невера до Томмота за период с 1927 по 2019 г. (за 92 года).

Объект и методика исследований

Объектом исследований является относительно узкая полоса трассы ФАД «Лена» от Невера до Томмота, протяженность которой составляет 712 км (рис. 1). Данный участок трассы характе-

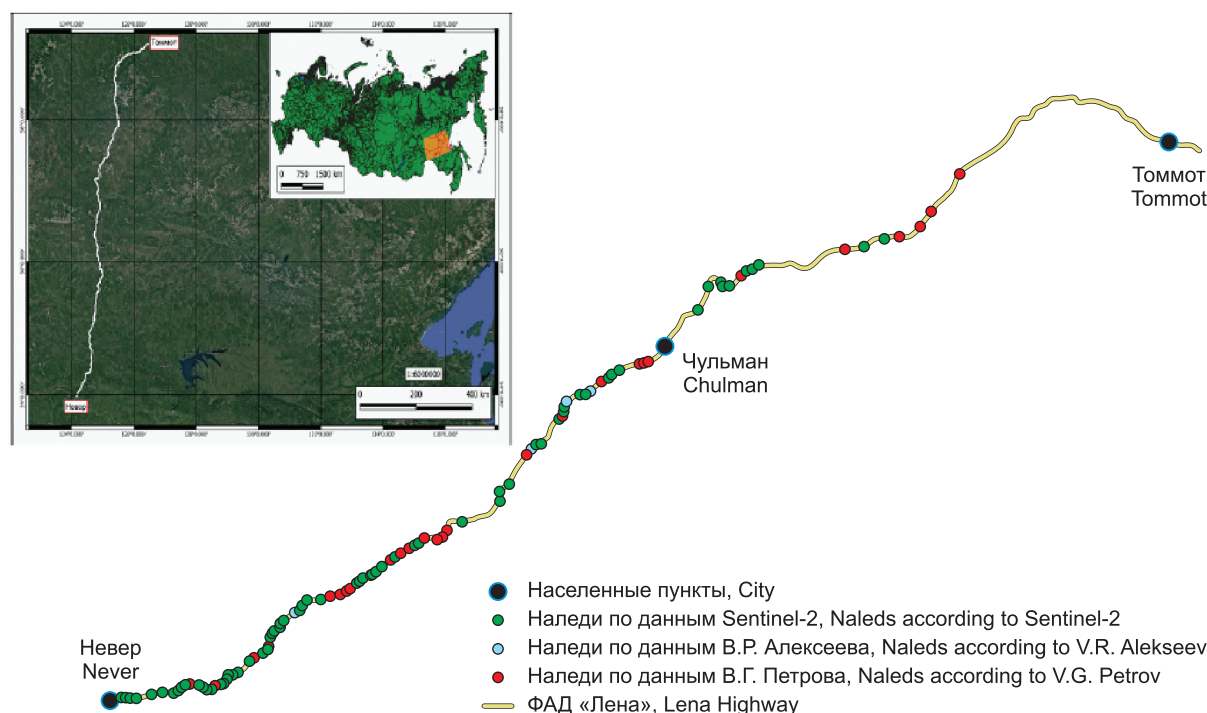


Рис. 1. Район исследования наледей на участке ФАД «Лена» Невер–Томмот.

Fig. 1. Study area of naleds in the range of the Lena highway from the Never village to Tommot.

ризуется развитием прерывистой и островной криолитозоны. В гидрогеологическом отношении автодорога частично пересекает Монголо-Охотскую гидрогеологическую складчатую область, Восточно-Сибирскую складчатую область и Восточно-Сибирскую артезианскую область. Рассматриваемая территория относится к наледным районам Восточной Сибири. По имеющимся сведениям, относительно узкая полоса ФАД «Лена» подразделяется на наледный и малоналедный районы [16, 22]. Основная часть наледей формируются в русловых и пойменных частях водотоков.

В качестве основного метода исследований выбран метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Для этого использовались 127 космических снимков спутника Sentinel-2 Европейского космического агентства. Критериями выбора снимков являлись: 1) высокое пространственное разрешение (до 10 м на пиксель); 2) наборы снимков с атмосферной корректировкой L2A; 3) снимки с покрытием облаками не более 20 %; 4) дата съемки с 24 апреля по 18 мая 2018 и 2019 гг. Последний критерий был выбран для выяснения максимальных размеров наледей и для наиболее точной идентификации наледи в период схода снежного покрова на космоснимке. Определение размеров и распространения наледей в естественных условиях с помощью данных космических снимков подробно приведены в работах [23, 24].

Обработка данных космической фотосъемки проводилась полуавтоматическим способом в ГИС-программе QGIS 3.16. Идентификация наледей на космоснимках осуществлялась с помощью нормализованного разностного снегово-

го индекса (Normalised Difference Snow Index – далее NDSI). Для его расчета использовались зеленый (BAND 3 с длиной волны 560 нм) и коротковолновый инфракрасный (BAND 11 с длиной волны 1610 нм) спектры снимка:

$$\text{NDSI} = (\text{BAND 3} - \text{BAND 11}) / (\text{BAND 3} + \text{BAND 11}). \quad (1)$$

В результате расчета NDSI был получен картографический слой, отражающий границы снежного и наледного покровов и имеющий значения от –1 до 1. Для отделения наледного льда от окружающего ландшафта использовалось пороговое значение индекса, равное в среднем –0.01. Это пороговое значение определялось методом подбора для каждого космоснимка, так как на его величину сильно влияли атмосферные явления, искажающие отображение на снимке в зеленой части спектра (BAND 3), которое потом использовалось в расчете индекса NDSI. В результате были получены полигоны с цифровыми значениями (digital number – далее DN), соответствующими 1 (с границами наледей) и 0 (остальные полигоны). Пример их отображения показана на рис. 2. После определения границ наледей производился расчет их площадей. Для этого использовалась функция «калькулятор полей» в таблице атрибутов векторного слоя в программе QGIS 3.16.

После получения данных о пространственном распределении наледей, примыкающих к ФАД «Лена», проводились их систематизация, классификация и многофакторный анализ. Эти исследования проведены в программах QGIS 3.16 и MS Excel. Дополнительно был получен ряд данных о рельефе региона на основе радарной топографи-

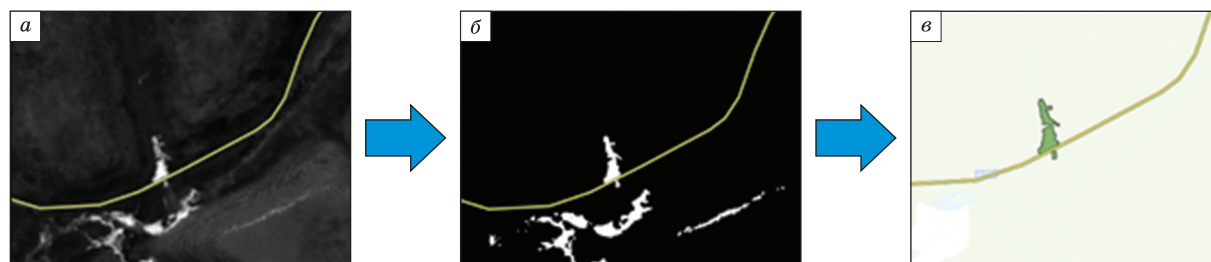


Рис. 2. Краткая визуализация алгоритма при вычислении границ наледей: *а* – слой индекса NDSI; *б* – слой NDSI после фильтрации пороговым значением DN = –0.01; *в* – итоговый векторный слой с границей наледи. Желтой линией на изображениях показана ФАД «Лена».

Fig. 2. Algorithm of naled boundaries calculation: *a* – NDSI layer; *б* – NDSI layer after filtration by threshold value of DN = –0.01; *в* – resulting vector layer with a naled boundary. The Lena Highway shown by the yellow line.

ческой съемки (Shuttle Radar Topography Mission – далее SRTM) [25], набор государственных геологических карт масштаба 1:200 000 из фонда ВСЕГЕИ [26], а также выявленные наледи были наложены на карту мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири [27].

Наледи, имеющие малые размеры, не учитывались и не исследовались по следующим причинам: 1) из-за малых размеров они в основном разрушались одновременно со сходом снежного покрова; 2) если оставалась какая-то часть наледей с площадью менее 100 м², то их границы невозможно было точно выделить, поскольку мультиспектральные космоснимки Sentinel-2 имеют недостаточное для этого пространственное разрешение; 3) если вдоль дорожного полотна ФАД «Лена» наледи или их останцы имели небольшую площадь, то их трудно отличить от скопления снега как с помощью индекса NDSI, так и в видимом поле RGB.

На первом этапе анализа была выполнена классификация всех наледей по их площадям, согласно критериям, используемым в работе В.Г. Петрова [16]. На втором этапе была оценена приуроченность наледей к абсолютным отметкам рельефа. На третьем этапе сопоставили пространственное распределение наледей с литологическим составом, возрастом горных пород и положением тектонических нарушений. На последнем этапе места формирования выявленных наледей, примыкающих к ФАД «Лена», были наложены на гидрогеологические структуры 2-го порядка.

Результаты и обсуждение

Всего на исследуемом участке было выявлено 107 наледей. Из них 97 относятся к русловым наледям, а 10 – к пойменным и террасовым. В зиму 1927–1928 гг. В.Г. Петровым на этом же участке было обследовано и нанесено на план 117 наледей, из которых 64 – русловые, и 53 – пойменные и террасовые.

Исходя из площадной категоризации наледей В.Г. Петрова (табл. 1), было оценено распределение различных категорий наледей на ФАД «Лена» от Невера до Томмота по их площадям (рис. 3).

Наибольшее количество наледей относятся к III и IV категориям. Наледи I и VI категорий на автодороге не формируются. Отсутствие наледей I категории и малое количество II категории, вероятно, связано с тем, что русловые наледи в мае 2018 и 2019 гг. могли полностью разрушиться за счет термоэрозионного воздействия речных

Таблица 1

Классификация наледей по площади (по В.Г. Петрову [16])

Table 1

Naled classification based on its area (according to V.G. Petrov [16])

Категория Category	Наименование Denomination	Площадь, м ² Area, m ²
I	Очень малые Very small	<100
II	Малые Small	100–1000
III	Средние Medium	1 000–10 000
IV	Большие Large	10 000–100 000
V	Очень большие Very large	100 000–1 000 000
VI	Гигантские Giant	>1 000 000

вод [28], а также с ограничением используемого метода их идентификации. Они, как правило, связаны с разгрузкой подземных вод деятельного слоя, которые имеют ограниченный период развития, определяемый величиной их запасов [29, 30]. Гигантские наледи не были идентифицированы на ФАД «Лена». Они в основном развиты в зоне сплошной криолитозоны на Северо-Востоке России [31]. Наледи III, IV и V категорий формируются в основном за счет выхода на поверхность подрусловых подземных вод [29, 30]. С ними связаны основные проблемы при строительстве и эксплуатации линейных инженерных сооружений.

Анализ данных В.Г. Петрова и наши результаты дешифрирования мультиспектральных снимков Sentinel-2 показали, что во многих случаях природные наледи значительно расширяются у автодороги, т. е. ФАД «Лена» в подобных местах выполняет роль мерзлотного пояса или криогенного барража. Следовательно, техногенный фактор изменяет морфометрические параметры природных наледей.

На основе данных SRTM было выявлено высотное распределение наледей на ФАД «Лена» от Невера до Томмота (рис. 4). Наледи на исследуемом участке федеральной автодороги формируются в интервале от 400 до 1200 м. При этом максимальное их количество приурочено к отметкам 500–600 м, а минимальное – 1000–

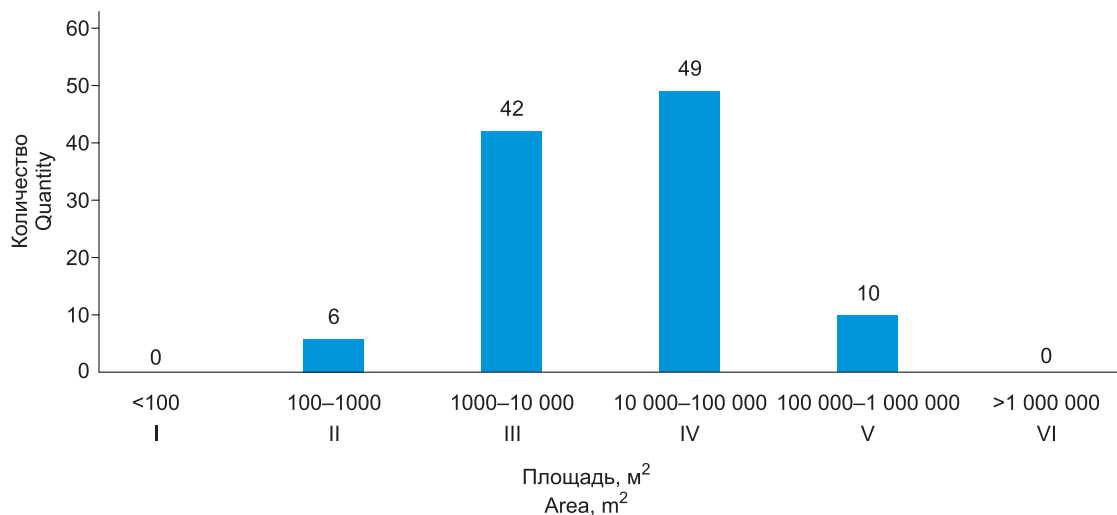


Рис. 3. Распределение наледей по площади на ФАД «Лена» на отрезке Невер–Томмот

Fig. 3. Plot of naled distribution over the area at the Lena Highway from the Never Village to Tommot

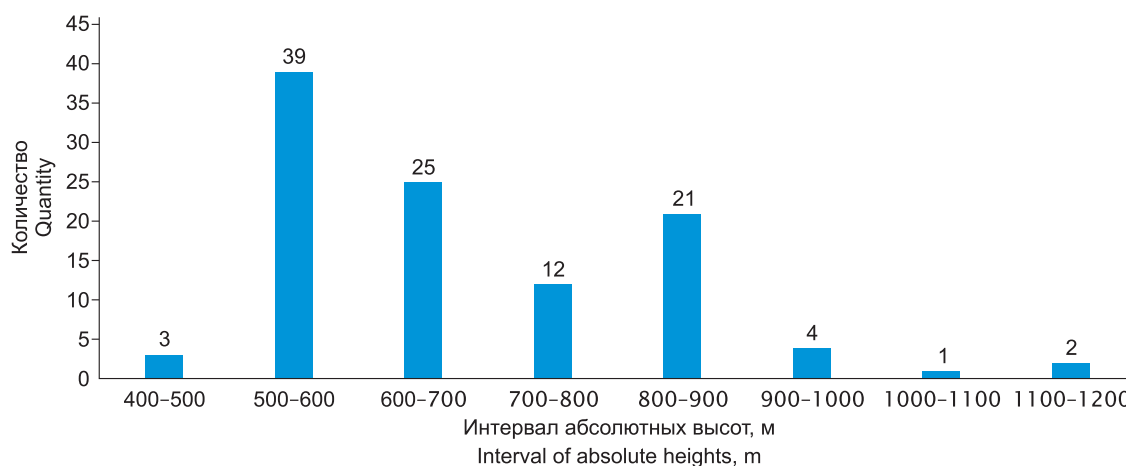


Рис. 4. Высотное распределение мест формирования наледей на ФАД «Лена» от Невера до Томмота.

Fig. 4. Plot of elevation distribution of naled sites along the Lena Highway from the Never Village to Tommot.

1200 м. Основное же их количество формируются в пределах 500–900 абс. м (рис. 4).

В геологическом отношении большая часть наледей образуется в местах распространения четвертичных, юрских и протерозойских отложений, а также интрузивных пород мелового возраста. Максимальное их количество формируется в четвертичных отложениях, а минимальное – в меловых и девонских породах (рис. 5).

В гидрогеологическом отношении федеральная автодорога проходит по гидрогеологическим районам 2-го порядка таким, как Тугурино-Джагинский гидрогеологический массив (ГГМ), Витимо-Олекминский ГГМ, Становой ГГМ, Сутамо-Суннангинский ГГМ, Чульманский адартези-

анский бассейн (АДАБ), Алдано-Тимтонский ГГМ, Лено-Амгинский артезианский бассейн (АБ) [27]. За прошедшие более 90 лет эксплуатации ФАД «Лена» количество притрассовых наледей в гидрогеологических структурах существенно не изменилось, разве что наиболее заметно уменьшилось количество притрассовых наледей в Становом ГГМ (рис. 6).

Сравнительный анализ суммарных площадей и протяженности наледей вдоль ФАД «Лена» показал, что суммарная их площадь в зиму 1927–1928 гг. составляла 661543 м², а в зимы 2018 и 2019 годов – 3938245 м², т. е. увеличилась в 5,95 раза. Протяженность же наледей вдоль автодороги уменьшилась в 2018 и 2019 гг. в 1,04 раза



Рис. 5. Приуроченность наледей к разновозрастным геологическим отложениям на ФАД «Лена» на участке Невер–Томмот.

Q – четвертичные; K – меловые; J – юрские; D – девонские; S – силурийские; Pt – протерозойские и A – архейские отложения; интрузивные породы: yK – меловые, yJ – юрские, yPz – палеозойские, yPt – протерозойские и yA – архейские.

Fig. 5. Plot of naled location in comparison to geological deposits along the Lena Highway from the Never Village to Tommot (Deposits: Q – Quaternary; K – Cretaceous; J – Jurassic; D – Devonian; S – Silurian; Pt – Proterozoic and A – Archean; Intrusive rocks: yK – Cretaceous, yJ – Jurassic, yPz – Paleozoic, yPt – Proterozoic and yA – Archean).

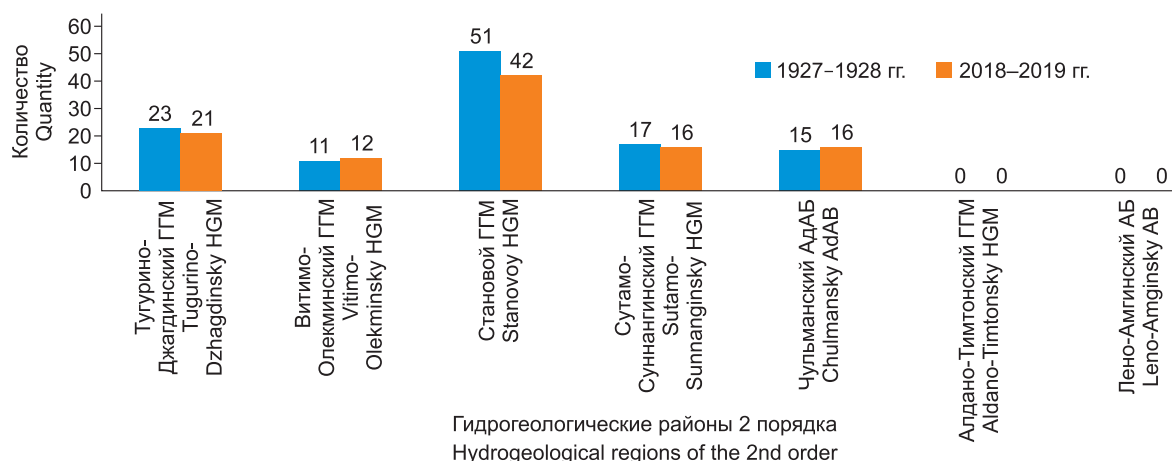


Рис. 6. Приуроченность притрассовых наледей к гидрогеологическим районам 2-го порядка на ФАД «Лена» от Невера до Томмота.

Fig. 6. Plot of naled confinement to the hydrogeological regions of the second order along the Lena Highway from the Never Village to Tommot.

по сравнению с данными В.Г. Петрова [16]. Значительное увеличение суммарной площади наледей на ФАД «Лена», отмеченное в последние годы, отражает более существенную трансформацию мерзлотных ландшафтов и мерзотно-гидрогеологических условий дорожными насыпями, высота и ширина которых неуклонно повышаются при реконструкциях данной автомагистрали.

Закключение

Исследования наледей, проведенные в 2018–2019 гг. на федеральной автодороге «Лена», позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Использование космоснимков для изучения закономерностей распространения наледей как на ненарушенных, так и на техногенно-нарушенных территориях криолитозоны является весьма эффективным и информативным методом.

2. На исследуемом участке ФАД «Лена» протяженность которого составляет 712 км, ежегодно формируется 107 наледей, наибольшее количество которых образуется в местах пересечения трассой русловых участков рек и ручьев.

3. Большинство притрассовых наледей относятся к категориям средних по площади ($F_n = 1000\text{--}10000 \text{ м}^2$) и больших ($F_n = 10000\text{--}100000 \text{ м}^2$).

4. Наибольшее количество наледей формируется в интервале абсолютных высот 500–900 м.

5. После строительства автодороги существующие природные наледы значительно увеличили свою площадь, что указывает на несовершенство водопропускных устройств, применяемых при сооружении дорожных насыпей.

6. На исследуемом участке автодороги за почти 90 лет ее эксплуатации появились 33 новых участков образования наледей, которые в той или иной степени деформируют дорожное полотно, ставят под угрозу разрушения водопропускные устройства и мостовые переходы.

7. Суммарная площадь наледей, формируемых на ФАД «Лена» от Невера до Томмота, в 2018–2019 гг. повысилась почти в 6 раз по сравнению с данными 1927–1928 гг.

Литература

1. Алексеев В.Р. Подземные льды и гидротермическое движение грунтов на наледных участках речных долин // Лед и Снег. 2015. № 1 (55). С. 69–88. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-1-69-88>
2. Алексеев В.Р. Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов // Лед и Снег. 2016. № 1 (56). С. 73–92. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92>
3. Алексеев В.Р. Проблемы инженерного освоения наледных участков речных долин // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 6. С. 65–75. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(65-75\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(65-75))
4. Шепелёв В.В. О преимуществах бассейнового подхода при изучении закономерностей распространения наледей // Лед и Снег. 2016. № 3 (56). С. 381–386. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-381-386>
5. Crites H., Kokelj S.V., Lacelle D. Icings and ground-water conditions in permafrost catchments of northwestern Canada. // Sci Rep 10. 2020. № 3283. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60322-w>
6. Ensom T., Makarieva O., Morse P., Kane D., Alekseev V., Marsh P. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. Vol. 31, No. 3. P. 383–395. <https://doi.org/10.1002/ppp.2051>
7. Большаков С.М. Принципы и методы противоналедных мероприятий // Наледи Сибири и Дальнего Востока: Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние СО АН СССР, 1981. С. 192–198.
8. Вельмина Н.А. Каптаж подземных вод в условиях вечной мерзлоты (Восточного Забайкалья и Приамурья). М.: Изд-во АН СССР, 1952. 126 с.
9. Дементьев В.А., Дементьев О.В. Новые методы защиты искусственных сооружений от наледей // Криолитозона и подземные воды Сибири. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 1996. с. 62–69.
10. Иванова Л.Д., Самсонова В.В. Формирование техногенных наледей на линейных сооружениях в пределах Приленского плато // Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах: сборник научных трудов (по материалам годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (2–4 апреля 2019 г.). М., 2019. С. 423–427.
11. Казаков А.П. Исследование наледей на автомобильных дорогах Сибири и Дальнего Востока // Записки Забайкальского филиала географического общества СССР. 1976. Вып. 101. С. 124–151.
12. Кондратьев В.Г. Концепция системы мониторинга опасных наледных процессов на территории Читинской области. Чита: Изд-во Забтранс, 2000. 112 с.
13. Кузьминых А.И., Меркулов Д.М. Условия формирования наледей у искусственных сооружений и земляного полотна Забайкальской железной дороги // Записки Забайкальского филиала географического общества СССР, вып. 92. Краткие тезисы докладов к предстоящей второй научно-производственной конференции по строительству на мерзлых грунтах, часть 2 (проблемы наледообразования). Чита, 1973. С. 143–145.
14. Курчатова А.Н. Влияние техногенных наледей на засоление литогенной основы городских ландшафтов Якутска // Криолитозона и подземные воды Сибири. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 1996. С. 95–105.
15. Низовкин Г.А. Борьба с наледями на железных дорогах // Труды ВНИИЖДТ. М.: 1954. 108 с.
16. Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей. Ленинград: Изд-во АН СССР и НИАДИ НКПС СССР, 1930. 177 с.
17. Румянцев Е.А. Сфера и эффективность применения различных типов противоналедных мероприятий на железных дорогах // Наледи Сибири и Дальнего Востока: Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1981. С. 198–205.
18. Савко Н.Ф. Влияние инженерных сооружений на процессы наледообразования // Записки Забайкальского филиала географического общества СССР, вып. 92. Краткие тезисы докладов к предстоящей второй научно-производственной конференции по строительству на мерзлых грунтах, часть 2 (проблемы наледообразования). Чита, 1973. С. 133–135.
19. Цвид А.А. Наледи в Приморском крае и борьба с ними. Магадан: Маг. кн. изд-во, 1957. 83 с.

20. Чекотилло А. М., Цвид А. А., Макаров В. Н. Наледи на территории СССР и борьба с ними. Благовещенск: Амурское книжное издательство, 1960. – 207 с.
21. Шушаков Е.В. Наледи и борьба с ними. В помощь строителям БАМ. М.: Транспорт, 1979. 64 с.
22. Алексеев В.Р., Усов В.А. Влияние наледей на инженерные сооружения Амуро-Якутской магистрали // Материалы по мерзлотоведению Сибири и Дальнего Востока. Иркутск; М.: Изд-во Ин-та земной коры СО АН СССР, 1964. С. 93–97.
23. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Остахов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современному снимкам Landsat и историческим данным // Лед и Снег. 2019. № 2 (59). С. 201–212. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>
24. Gagarin L., Wu Q., Melnikov A., Volgusheva N., Tananaev N., Jin H., Zhang Z., Zhizhin V. Morphometric Analysis of Groundwater Icings: Intercomparison of Estimation Techniques // Remote Sensing. 2020. Vol. 12 (4), P. 692. <https://doi.org/10.3390/rs12040692>
25. <http://srtm.csi.cgiar.org>
26. <http://webmapget.vsegei.ru>
27. Карта мерзлотно-гидрогеологического районирования Восточной Сибири. Масштаб 1:2 500 000 / Ред. П.И. Мельников. Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1980. 4 л.
28. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 190 с.
29. Вельмина Н.А., Узембло В.В. Гидрогеология центральной части Южной Якутии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 179 с.
30. Оспенников Е.Н., Труш Н.И., Чижев А.Б., Чижева Н.И. Экзогенные геологические процессы и явления (Южная Якутия). М.: Изд-во МГУ, 1980. 228 с.
31. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1974. 163 с.

Поступила в редакцию 23.12.2020

Принята к публикации 19.02.2021

Об авторах

БАИШЕВ Нюргун Егорович, аспирант, ведущий инженер, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск ул. Мерзлотная, 36, Россия, <http://orcid.org/0000-0001-7135-3899>, Researcher ID: AAF-6965-2021, nyurgunbaishev@mail.ru;

ШЕПЕЛЁВ Виктор Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик Академии наук Республики Саха (Якутия), главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск ул. Мерзлотная, 36, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-3434-6969>, vshepelev@mpi.ysn.ru;

ГАГАРИН Леонид Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск ул. Мерзлотная, 36, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-5354-084X>, Researcher ID: J-4238-2018, gagarinla@gmail.com.

Информация для цитирования

Баишев Н.Е., Шепелёв В.В., Гагарин Л.А. О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360 «Лена» по данным мультиспектральных космических снимков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 1. С. 60–69. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-6>

DOI 10.31242/2618-9712-2020-26-1-6

Patterns of nalds distribution along the Lena Highway according to multispectral satellite images

N.E. Baishev*, V.V. Shepelev, L.A. Gagarin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

*nyurgunbaishev@mail.ru

Abstract. Technogenic impacts inevitably transform natural conditions in the areas of permafrost distribution and deep seasonal freezing. In particular, technogenic impact on cryolithozone leads to changes in

surface runoff and groundwater discharge. As a result, icing appears on the roads in the sites where it was not observed previously. Morphometric parameters, the regimes of formation and thawing of the existing natural icings are also transformed. The Lena Highway stretches over 1157 km from the village of Never to Yakutsk. Only an icing-prone region of the highway from Never to Tommot was considered within the framework of this study. Remote sensing was applied as the main method of investigation. Multispectral satellite images Sentinel-2 with atmospheric correction were used. Satellite imageries were processed with a semi-automatic algorithm using QGIS 3.16 software. Icings were identified in satellite images with the help of the Normalised Difference Snow Index (NDSI). Totally, 107 icings were detected to be forming within 712 km of the road. On the basis of icing areas, the majority of roadside icings are related to the III (1000–10000 m²) and IV (10000–100000 m²) categories. The major amounts of the icings are formed within the altitude range 500–900 m. In the geological respect, the majority of icings are confined to the Quaternary and Proterozoic deposits, as well as to Cretaceous intrusive rocks. It was established that the total area of icings formed on the Lena Highway on the region from Never to Tommot increased almost by a factor of 6 during the years 2018–2019 in comparison with the data related to the years 1927–1928.

Key words: icing, NDSI, Sentinel-2, the Lena Highway.

Acknowledgements. This work was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research under Projects No. 20-55-71005 – Hydrology, permafrost and stability in the eastern sector of the Russian Arctic and Subarctic and No. 20-05-00670A – Suprapermafrost subaerial taliks in the continuous permafrost zone of Central Yakutia.

References

1. Alekseev V.R. Ground ice and hydrothermal ground motions on aufeis plots of river valleys // *Ice and Snow*. 2015. No. 1 (55). P. 69–88. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-1-69-88>
2. Alekseev V.R. Long-term variability of the spring taryn-aufeises // *Ice and Snow*. 2016. No. 1 (56). P. 73–92. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-73-92>
3. Alekseev V.R. Aufeis areas in river valleys: engineering development problems // *Kriosfera Zemli*. 2017. Vol. XXI, No. 6. P. 65–75 [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6\(65-75\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-6(65-75))
4. Shepelev V.V. Advantages of the basin approach for investigations of aufeises (naleds) // *Ice and Snow*. 2016. No. 3 (56). P. 381–386 <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-3-381-386>
5. Crites H., Kokelj S.V., Lacelle D. Icings and groundwater conditions in permafrost catchments of northwestern Canada // *Sci Rep* 10. 2020. № 3283. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60322-w>
6. Ensom T., Makarieva O., Morse P., Kane D., Alekseev V., Marsh P. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020. Vol. 31, No. 3. P. 383–395. <https://doi.org/10.1002/ppp.2051>
7. Bolshakov S.M. Principles and methods of anti-ice measures // *Naledi of Siberia and the Far East: Sat. scientific. tr.* Novosibirsk: Publishing house of Science of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1981. P. 192–198.
8. Velmina N.A. Capture of groundwater in permafrost conditions (Eastern Transbaikalia and Priamurye). Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1952. 126 p.
9. Dementyev V.A., Dementyev O.V. New methods of protecting artificial structures from icing // *Cryolithozone and underground waters of Siberia*. Yakutsk: Publishing House of the of Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 1996. P. 62–69.
10. Ivanova L.D., Samsonova V.V. Formation of technogenic ice on linear structures within the Prilensk plateau // *Sergeevskie chteniya. Ecological and economic balance of nature management in mining regions: a collection of scientific papers (based on the materials of the annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology (April 2-4, 2019))*. M., 2119. P. 423–427.
11. Kazakov A.P. Research of icing on the highways of Siberia and the Far East // *Notes of the Trans-Baikal branch of the USSR Geographical Society*. 1976. No. 101. P. 124–151.
12. Kondratyev V.G. The concept of a monitoring system for dangerous ice processes in the Chita region. Chita: Publishing house Zabtrans, 2000. 112 p.
13. Kuzminykh A.I., Merkulov D.M. Conditions for the formation of icings near artificial structures and subgrade of the Trans-Baikal Railway // *Notes of the Trans-Baikal Branch of the USSR Geographical Society*, vol. 92. Brief abstracts of reports for the upcoming second scientific and industrial conference on construction on frozen soils, part 2 (problems of ice formation), Chita: 1973. P. 143–145.
14. Kurchatova A.N. Influence of technogenic icings on the salinization of the lithogenic base of the urban landscapes of Yakutsk // *Cryolithozone and underground waters of Siberia*. Yakutsk: Publishing house of the Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 1996. P. 95–105.

15. *Nizovkin G.A.* Anti-icing on the railways. VNIIZHDT Proceedings. Moscow, 1954. 108 p.
16. *Petrov V.G.* Ice on the Amur-Yakutsk highway, with an album of ice plans. Leningrad: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR and NIADI NKIS USSR, 1930. 177 p.
17. *Rumyantsev E.A.* Scope and efficiency of application of various types of anti-ice measures on railways // *Naledi of Siberia and the Far East: Sat. scientific. tr.* Novosibirsk: Publishing house of Science of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1981. P. 198–205.
18. *Savko N.F.* The influence of engineering structures on the processes of ice formation // *Notes of the Trans-Baikal branch of the USSR Geographical Society*, vol. 92. Brief abstracts of reports for the upcoming second scientific and industrial conference on construction on frozen soils, part 2 (problems of ice formation), Chita, 1973. P. 133–135.
19. *Tsvid A.A.* Naledi in the Primorsky Territory and the fight against them. Magadan: Magadan Book Publishing House, 1957. 83 p.
20. *Chekotillo A. M., Tsvid A. A., Makarov V. N.* Naledi on the territory of the USSR and the fight against them. Blagoveshchensk: Amur Book Publishing House, 1960. 207 p.
21. *Shushakov E.V.* Beating and fighting them. To help builders BAM. Moscow: Transport, 1979. 64 p.
22. *Alekseev V.R., Usov V.A.* Influence of icing on the engineering structures of the Amur-Yakutsk highway // *Materials on permafrost studies in Siberia and the Far East.* Irkutsk-Moscow: Publishing house of the Institute of the Earth's crust, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1964. P. 93–97.
23. *Makarieva O.M., Shikhov A.N., Ostashov A.A., Nesterova N.V.* Icings of the Indigirka river basin according to the recent Landsat satellite images and historical data // *Ice and Snow.* 2019. No. 2 (59). P. 201–212. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>
24. *Gagarin L., Wu Q., Melnikov A., Volgusheva N., Tananaev N., Jin H., Zhang Z., Zhizhin V.* Morphometric analysis of groundwater icings: intercomparison of estimation techniques // *Remote Sensing.* 2020. No. 12 (4), P. 692. <https://doi.org/10.3390/rs12040692>
25. <http://srtm.csi.cgiar.org>
26. <http://webmapget.vsegei.ru>
27. *Map of permafrost-hydrogeological zoning of Eastern Siberia.* Scale 1: 2500000 / Ed. P.I. Melnikov. Yakutsk: Publishing house of the Melnikov Permafrost Institute SB AS USSR. 1980. 4 p.
28. *Sokolov B.L.* Overlapping and river runoff. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. 190 p.
29. *Velmina H.A., Usemblo V.V.* Hydrogeology of the central part of South Yakutia. Moscow; Leningrad: Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1959. 179 p.
30. *Ospennikov E.N., Trush N.I., Chizhov A.B., Chizhova N.I.* Exogenous geological processes and phenomena (South Yakutia). Moscow: Lomonosov Moscow State University Publishing House, 1980. 228 p.
31. *Tolstikhin O.N.* Overlapping and underground waters of the North-East of the USSR. Novosibirsk: Publishing house of Science SO AN SSSR, 1974. 163 p.

About the authors

BAISHEV Nyurgun Yegorovich, graduate student, leading engineer, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <http://orcid.org/0000-0001-7135-3899>, Researcher ID: AAF-6965-2021, nyurgunbaishev@mail.ru;

SHEPELEV Viktor Vasilievich, professor, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), chief researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-3434-6969>, Researcher ID: AAF-8768-2021, vshepelev@mpi.ysn.ru;

GAGARIN Leonid Aleksandrovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 36 Merzlotnaya st., Yakutsk 677010, Russia, <http://orcid.org/0000-0002-5354-084X>, Researcher ID: J-4238-2018, gagarinla@gmail.com.

Citation

Baishev N.E., Shepelev V.V., Gagarin L.A. Patterns of naleds distribution along the Lena Highway according to multispectral satellite images // *Arctic and Subarctic Natural Resources.* 2021. Vol. 26, No. 1. pp. 60–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-1-6>