

Б. В. Содномов^{1✉}, В. Н. Черных¹, А. А. Аюржанаев¹, Е. Ж. Гармаев¹

Оценка влияния наледей на инженерные сооружения в Селенгинском среднегорье с использованием методов ДЗЗ

¹Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ, Российская Федерация
e-mail: sodnomov@binm.ru

Аннотация. В работе рассматриваются возможности комплексного применения методов дистанционного зондирования Земли для оценки влияния наледных процессов на инженерные сооружения в пределах Селенгинского среднегорья. Используются спутниковые снимки, материалы аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов, цифровые модели рельефа и данные наземного лазерного сканирования. Особое внимание уделено мостовым переходам, подходам к мостам и участкам транспортной инфраструктуры, подверженным сезонному наледообразованию. На основе сопоставления разновременных пространственных данных выполнен анализ динамики наледей, выявлены устойчивые зоны их формирования и определены основные типы воздействия на инженерные сооружения. Показано, что наледи способны вызывать частичное перекрытие русел, подтопление прилегающих территорий и изменение русловых процессов. Использование высокодетальных моделей поверхности и облаков точек позволило оценить морфологические особенности наледей и характер их взаимодействия с элементами инфраструктуры. Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов ДЗЗ, фотограмметрии и лазерного сканирования для мониторинга наледной опасности, оценки инженерных рисков и формирования геоинформационной базы данных наледных процессов.

Ключевые слова: наледи, ДЗЗ, БПЛА, цифровая модель рельефа, Селенгинское среднегорье

B. V. Sodnomov^{1✉}, V. N. Chernikh¹, A. A. Ayurzhanaev¹, E. Zh. Garmaev¹

Assessment of icings on engineering structures in the Selenginsk middle mountains using the remote sensing method

¹Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russian Federation
e-mail: sodnomov@binm.ru

Abstract. This paper examines the potential for integrated application of Earth remote sensing methods to assess the impact of aicing processes on engineering structures within the Selenga midlands. Satellite imagery, aerial photography from unmanned aerial vehicles, digital elevation models, and terrestrial laser scanning data are used. Particular attention is paid to bridge crossings, approaches to bridges, and sections of transport infrastructure susceptible to seasonal aicing. By comparing spatial data from different periods, an analysis of aicing dynamics is performed, stable zones of formation are identified, and the main types of impact on engineering structures are determined. It is shown that aicing can cause partial channel closure, flooding of adjacent areas, and changes in channel processes. The use of highly detailed surface models and point clouds made it possible to assess the morphological features of aicing and the nature of its interaction with infrastructure elements. The obtained results confirm the potential of using remote sensing, photogrammetry and laser scanning methods for monitoring ice hazards, assessing engineering risks and creating a geoinformation database of ice processes.

Keywords: icings, remote sensing, UAVs, digital elevation model, Selenginsk middle mountains

Введение

Селенгинское среднегорье – крупная орографическая область к югу от горного обрамления оз. Байкал, включающая территорию с низкой среднегорным рельефом, расположенную между Саяно-Байкальским становым нагорьем, Витимским плоскогорьем и Хэнтэй-Даурским нагорьем [1, 2]. Территория характеризуется сочетанием среднегорного рельефа, резко континентального климата и значительной сезонной изменчивости гидрологических условий. Для исследуемой территории характерны продолжительный зимний период, глубокое промерзание грунтов и развитие сезонных наледных процессов.

Наледи – это слоистые ледяные массивы или корки на поверхности земли, льда или инженерных сооружений, образовавшиеся при замерзании периодически изливающихся природных или техногенных вод [3]. На территории Селенгинского среднегорья. На территории Селенгинского среднегорья зарегистрировано 7,7 тыс. наледей, приуроченных преимущественно к долинам малых и средних рек, руслам ручьев и зонам разгрузки подземных вод [4]. В ряде случаев развитие наледей становится причиной возникновения чрезвычайных ситуаций и наносит ущерб инженерной инфраструктуре. Особенно уязвимыми оказываются мостовые переходы, подходы к мостам и водопропускные сооружения, расположенные в долинах малых рек и временных водотоков [5, 6].

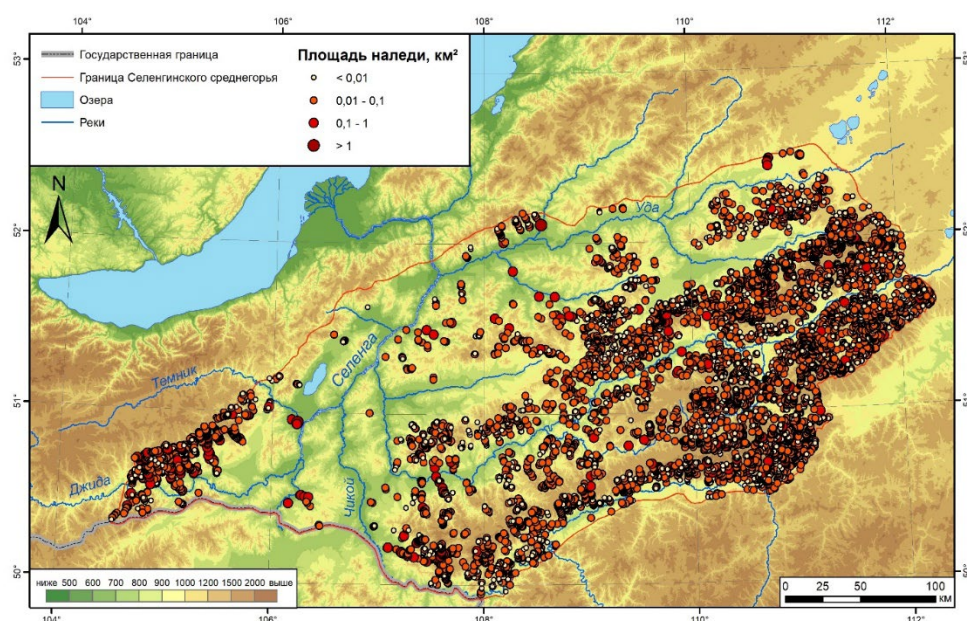


Рис. 1. Карта распространения наледей в Селенгинском среднегорье

Традиционные наземные обследования позволяют выявить факт развития наледи, однако они ограничены по охвату территории и не всегда дают возможность оценить межгодовую изменчивость наледей. В этой связи перспективным является комплексное использование дистанционного зондирования Земли: спутниковых

снимков, данных с БПЛА, а также цифровые модели, полученные в результате наземного лазерного сканирования. Преимущества спутниковых снимков заключаются в широком территориальном охвате, регулярности наблюдений, возможности мониторинга труднодоступных территорий и анализа изменений во времени. Применение беспилотных летательных аппаратов рассматривается как перспективный способ оперативного и экономически эффективного мониторинга окружающей среды [7]. Преимущества наземного лазерного сканирования: высокая точность, детальность, оперативность съемки, возможность работы в труднодоступных районах, получение плотного облака точек и создание точных 3D-моделей местности и объектов.

Методы и материалы

В рамках исследования были рассмотрены несколько участков мостовых переходов, на которых проводилась фотофиксация наледных процессов в разные годы. Для двух объектов дополнительно были получены высокодетальные материалы аэрофотосъемки и наземного лазерного сканирования.

В последние годы методы дистанционного зондирования и фотограмметрии активно применяются для анализа криогенных и ледовых процессов, включая картографирование ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа, построение цифровых моделей поверхности и мониторинг динамики природных объектов [8].

Основу исследования составили материалы полевых обследований, выполненных в зимний и весенний периоды. В ходе работ проводилась аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов. Полученные изображения использовались для построения высокодетальных пространственных моделей.

Для анализа наледных процессов использовались:

- 1) спутниковые снимки;
- 2) ортофотопланы исследуемых участков;
- 3) цифровые модели рельефа;
- 4) облака точек, полученные по данным наземного лазерного сканирования;
- 5) материалы фотофиксации.

Аэрофотосъемка выполнена с борта беспилотных летательных аппаратов DJI Phantom 4 Advanced. Съемки проводились в безоблачных условиях при одинаковых параметрах камеры, 70 %-ном продольном и поперечном перекрытии снимков с дополнительной привязкой снимков с помощью опознаков, а также с использованием метода РРК (post-processing kinematic), при котором координаты, полученные при съемке, уточняются после завершения полевых работ с использованием данных базовой станции. Фотограмметрическая обработка данных аэрофотосъемки с БПЛА выполнена в ПО Agisoft Metashape.

Лазерное сканирование выполнено с использованием наземной лазерной сканирующей системы Leica ScanStation C10, обеспечивающей высокоточную регистрацию облака точек на дальности до 300 м и со скоростью до 50 000 точек/с. Полученные данные обрабатывались в Leica Cyclone, где выполнялись импорт, регистрация,

очистка и подготовка облаков точек для дальнейшего инженерно-геометрического анализа [9].

Пространственный анализ выполнялся в ПО ArcGIS с использованием совмещения разновременных материалов. Сравнение ортофотопланов и цифровых моделей рельефа позволило выявить изменение границ наледей и особенности перераспределения ледяных масс.

Результаты

Полевые наблюдения и анализ данных ДЗЗ показали, что наледи оказывают комплексное воздействие на инженерные сооружения в пределах Селенгинского среднегорья.

На исследуемых участках выявлены следующие типы воздействия:

- аккумуляция льда в пределах мостовых переходов;
- частичное или полное перекрытие руслового пространства;
- подтопление подходов к мостам;
- перераспределение потоков воды вдоль насыпей и русловых деформаций.

Сопоставление разновременных ортофотопланов показало, что конфигурация и площадь наледей могут существенно изменяться в зависимости от гидрометеорологических условий конкретного года (рис. 2 а, б). При этом отдельные участки формирования наледей сохраняются в течение нескольких сезонов, что свидетельствует о наличии устойчивых факторов наледообразования.

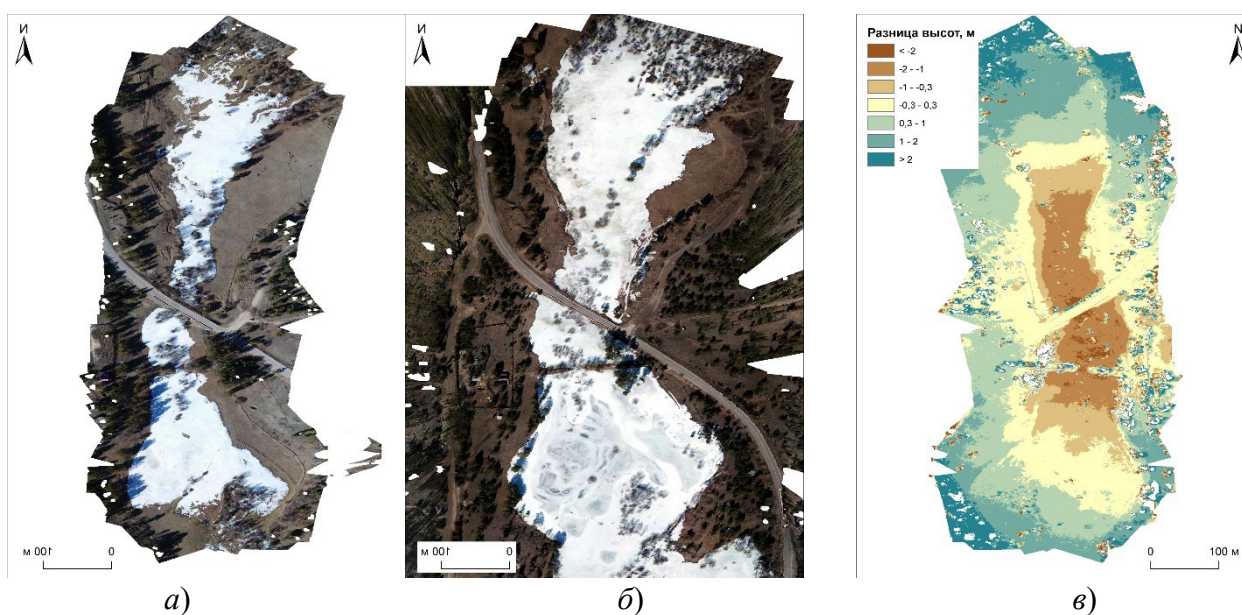


Рис. 2. Наледь на р. Воровка (Тарбагатайский район, Республика Бурятия):
а) ортофотоплан 31.03.2021 г., б) ортофотоплан 08.04.2026 г., в) разница высот,
полученная по ЦММ

Анализ цифровых моделей рельефа позволил выявить понижения рельефа и элементы русловой сети, способствующие аккумуляции наледного льда. В районах

мостовых переходов наблюдается влияние инженерных сооружений на перераспределение потоков воды и локализацию зон наледообразования (см. рис. 2 в).

Облака точек и высокодетальные модели поверхности позволили детально оценить морфологию наледей, включая высоту ледяных бугров, распределение ледяных масс и особенности взаимодействия наледи с конструктивными элементами мостов (рис. 3).

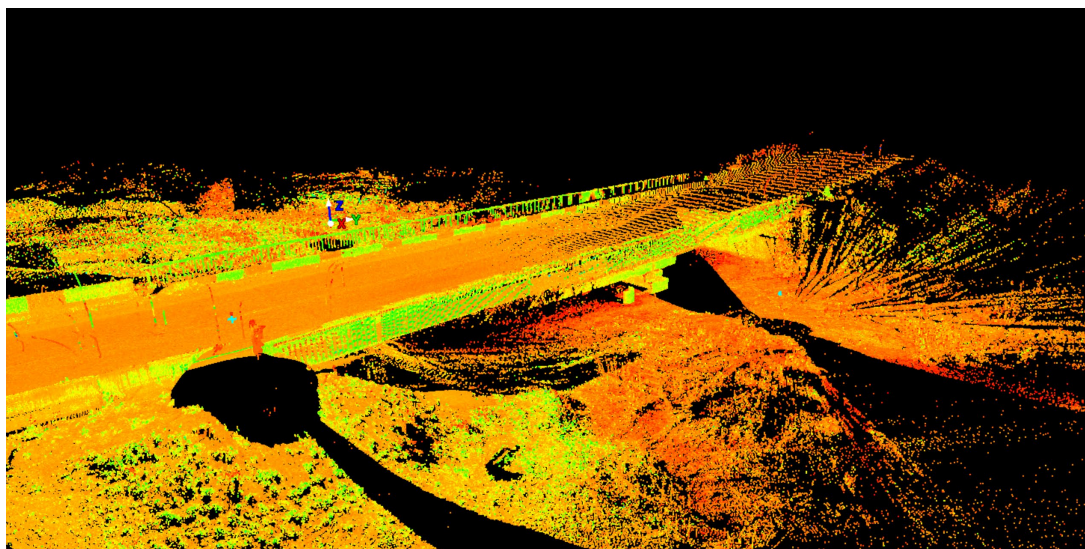


Рис. 3. Трехмерная модель (облако точек) автомобильного моста в районе р. Воронка

Обсуждение

Использование данных БПЛА, спутниковых снимков и наземного лазерного сканирования позволяет существенно расширить возможности изучения наледных процессов по сравнению с традиционными маршрутными обследованиями. Высокое пространственное разрешение ортофотопланов, цифровых моделей рельефа и облаков точек обеспечивает детальную фиксацию изменений микрорельефа, русловых деформаций и перераспределения ледяных масс в пределах инженерных сооружений и прилегающих территорий.

Одним из ключевых направлений дальнейших исследований является формирование специализированной геоинформационной базы данных наледных процессов и связанных с ними инженерных рисков. Такая база данных может включать сведения о местоположении наледей, площади и объемах ледяных образований, повторяемости их возникновения, гидрологических и метеорологических условиях формирования, а также информацию о типах инженерных сооружений и степени их подверженности наледному воздействию. Интеграция спутниковых данных, материалов БПЛА, наземного лазерного сканирования и результатов полевых обследований позволит создать единую систему пространственного мониторинга наледной опасности.

Создание подобной базы данных имеет не только научное, но и прикладное значение. Накопление многолетних пространственно-временных данных открывает

возможности для перехода от описательной оценки наледных процессов к количественному анализу наледной угрозы. На основе геоинформационных моделей предполагается разработка методов оценки вероятности формирования наледей, расчета потенциальных зон подтопления и прогнозирования опасности для участков транспортной инфраструктуры.

Перспективным направлением является использование цифровых моделей поверхности и облаков точек для мониторинга деформаций инженерных сооружений. Высокодетальные данные лазерного сканирования и фотограмметрии позволяют фиксировать изменения геометрии мостовых конструкций, деформации насыпей, изменение русловых форм и перераспределение наносов.

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о влиянии криогенных процессов на инженерную инфраструктуру в районах сезонного промерзания и распространения многолетнемерзлых пород [6, 10]. Вместе с тем использование высокодетальных пространственных данных позволяет перейти к новому уровню исследований, связанному с количественной оценкой морфометрических параметров наледей, анализом изменений инженерных объектов и прогнозированием развития опасных природно-техногенных процессов.

Заключение

В ходе исследования показано, что наледи в Селенгинском среднегорье представляют собой значимый природно-техногенный фактор риска для мостовых переходов, подходов к ним и других элементов транспортной инфраструктуры. Наиболее опасными являются участки, где наледные образования формируются в пределах русел малых рек, в зонах разгрузки подземных вод и в местах изменения условий стока, поскольку именно здесь наледь способна вызывать подпор воды, частичное перекрытие руслового пространства и подтопление прилегающих территорий.

Установлено, что сочетание спутниковых данных, ортофотопланов, цифровых моделей рельефа, облаков точек и материалов фотофиксации позволяет эффективно выявлять пространственную динамику наледей, оценивать их морфологию и прослеживать устойчивые зоны наледообразования в разные годы. Использование БПЛА и наземного лазерного сканирования существенно повышает детальность анализа по сравнению с традиционными маршрутными обследованиями и даёт возможность более точно интерпретировать связь наледных процессов с инженерными сооружениями.

Полученные результаты подтверждают перспективность применения методов ДЗЗ и фотограмметрии для мониторинга наледной опасности и обоснования инженерных решений в районах развития наледей. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных данных при инженерно-геологических изысканиях, оценке уязвимости мостовых переходов и формировании геоинформационной базы наледных участков для дальнейшего мониторинга и прогноза.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 24-47-03008 «Наледи в трансграничном бассейне р. Селенга: роль в природных ландшафтах и социально-экономические угрозы для хозяйственных систем в условиях меняющегося климата».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фадеева Н.Е. Селенгинское среднегорье. – Улан-Удэ: Бурятское кн. изд-во, 1963. – 170 с.
2. Дамбиев Э.Ц. Физико-географическое районирование Бурятии // Вестник Бурятского государственного университета. Серия 3. География. Геология. Вып. 1. Улан-Удэ. 1997. с. 26–36
3. Алексеев В. Р. Наледи. Новосибирск: Наука, 1987.
4. Черных В. Н. Влияние наледей на природно-антропогенные системы Селенгинского среднегорья: дис. ... канд. геогр. наук: 1.6.21, геоэкология (географические науки). — Улан-Удэ, 2024.
5. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации искусственных сооружений автомобильных дорог на водотоках с наледями / Минавтодор РСФСР. – М.: Транспорт, 1989. – 152 с.
6. Толстихин О. Н. Наледи и подземные воды Восточной Сибири. – Новосибирск: Наука, 1974. – 164 с.
7. Anderson, K. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology / K. Anderson, K.J. Gaston // Front. Ecol. Environ. 2013. 11. P. 138–146.
8. Сизов О. С. Дистанционное картографирование ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа в бассейне р. Надым (Север Западной Сибири) // Географический вестник. – 2020. – № 1(52). – С. 103–118.
9. Leica ScanStation C10. [Электронный ресурс]. URL: https://gfk-leica.ru/files/catfiles/scan/scanstation-c10_ttch.pdf (дата обращения: 17.05.2026).
10. Buddo I., Sharlov M., Shelokhov I. et al. Applicability of Transient Electromagnetic Surveys to Permafrost Imaging in Arctic West Siberia // Energies. – 2022. – Vol. 15(5). – 1816.

© Б. В. Содномов, В. Н. Черных, А. А. Аюржанаев, Е. Ж. Гармаев, 2026