

УДК 528.71:551.345

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-43-52>

Выявление и классификация криогенных процессов по данным космической съемки

А. А. Ильченко¹

¹ РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

e-mail: ilchenco.a@gubkin.ru

Аннотация. В условиях глобального изменения климата и активного освоения арктических территорий актуальным становится оперативный мониторинг мерзлотных явлений, способствующий снижению рисков разрушения инфраструктуры и деградации природных экосистем. В статье рассмотрена проблема выявления и классификации криогенных процессов в регионах вечной мерзлоты с использованием материалов спутниковой съемки. Объектом исследования выступают криогенные процессы, проявляющиеся в мерзлотных ландшафтах, а предметом — методы обработки и анализа космических данных для их выявления. В работе применена авторская методика автоматизированной обработки спутниковых снимков, включающая этапы отбора данных, их предварительной обработки, сегментации и классификации криогенных процессов, а также создание тематических карт. Использованы данные спутников Landsat-7 ETM+ и Sentinel-2, что обеспечило высокое пространственное и спектральное разрешение. Результаты исследования позволили выделить основные типы криогенных процессов на территории Надымского района ЯНАО и создать авторские картосхемы их пространственного распределения. Полученная методика продемонстрировала высокую эффективность и точность в идентификации эрозионных и других мерзлотных явлений. Основным вывод состоит в том, что использование космических данных и разработанных методов существенно повышает качество мониторинга вечномерзлотных территорий, что имеет важное практическое значение для обеспечения устойчивого развития и безопасности инфраструктуры в арктических регионах.

Ключевые слова: криогенные процессы, дешифрирование космических изображений, картографирование мерзлотных ландшафтов, автоматизированная обработка, сегментация изображений, классификация эрозионных процессов, мониторинг природных изменений

Для цитирования:

Ильченко А. А. Выявление и классификация криогенных процессов по данным космической съемки. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 2. С. 43–52. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-43-52>

Detection and classification of cryogenic processes from satellite remote sensing data

A. A. Ilchenko¹✉

¹ National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation

e-mail: ilchenko.a@gubkin.ru

Abstract. Amid accelerating global climate change and intensive Arctic development, operational monitoring of permafrost phenomena is increasingly vital to mitigate infrastructure damage and ecosystem degradation risks. The study addresses the detection and classification of cryogenic processes in permafrost regions using satellite remote sensing data, focusing on processes within permafrost landscapes and associated analytical methodologies. An original automated processing workflow was developed, incorporating data selection, preprocessing, segmentation, cryogenic process classification, and thematic map production. High-resolution multispectral imagery from Landsat-7 ETM+ and Sentinel-2 enabled identification of dominant cryogenic process types in the Nadymsky District, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, with novel maps depicting their spatial distribution. The methodology exhibited high efficiency and accuracy in delineating erosional and other permafrost features. The obtained results highlight the substantial improvements in permafrost monitoring achievable through integrated satellite data and advanced analytics, with profound implications for sustainable Arctic development and infrastructure resilience.

Keywords: cryogenic processes, space image interpretation, mapping of permafrost landscapes, automated processing, image segmentation, classification of erosion processes, monitoring of natural changes

For citation:

Ilchenko A. A. (2026). Detection and classification of cryogenic processes from satellite remote sensing data. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 2. pp. 43–52. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-2-43-52>

Введение

Арктика – один из самых перспективных регионов планеты. С началом разработки месторождений углеводородов естественные ландшафты района вечной мерзлоты стали претерпевать изменения. Последние десятилетия ученые всего мира фиксируют резкие изменения климата, это коснулось и территорий арктического шельфа России. Проследить четкую связь интенсивной добычи нефти и газа в районе вечной мерзлоты с потеплением климата весьма трудно, но можно предположить, что для Арктики между этими процессами есть корреляция и она несет ряд негативных последствий [1].

На природные территории Арктики воздействуют различные факторы, среди которых антропогенное влияние на криолитозону, которое способно вызвать катастрофические изменения, включая:

- активизацию геологических процессов, таких как солифлюкция, карстообразование, проседание грунтов, морозное пучение, термоэрозия и другие;
- повышение уровня мирового океана, вызывающее затопления прибрежных зон;
- возникновение неорганизованных источников выброса метана, образующегося вследствие деградации вечной мерзлоты;
- изменение и деградацию экосистем, что ведет к потере биологического разнообразия;
- разрушение и снижение устойчивости существующих инженерных сооружений и инфраструктурных объектов [2].

Неслучайно активизацию геологических процессов выделяют в качестве приоритетной проблемы, поскольку именно они в последнее время оказывают значительное негативное влияние на человеческую дея-

тельность. Проявления этих процессов приводят к сокращению пригодных для хозяйственного освоения территорий, разрушению инфраструктурных объектов и создают повышенный риск для здоровья населения в случае возникновения чрезвычайных ситуаций [3]. В этой связи проведённое исследование приобретает особую ценность, так как способствует своевременному выявлению эрозионных процессов в мерзлотных ландшафтах, что является важным шагом для предупреждения негативных последствий и обеспечения устойчивого развития регионов вечной мерзлоты.

Изучение криогенных процессов в регионах с вечной мерзлотой приобретает всё большую значимость в связи с изменениями климата и активным развитием промышленной деятельности на севере. Криогенные явления, такие как морозное пучение, термокарст, эрозия мерзлоты, оказывают существенное воздействие на ландшафт и инфраструктуру, что требует точного и своевременного мониторинга [4]. Традиционные методы полевого исследования зачастую ограничены труднодоступностью территорий и высокими затратами, что стимулирует поиск эффективных дистанционных технологий наблюдения [5]. Поэтому целью данного исследования является разработка и апробация методики выявления и классификации криогенных процессов на основе анализа спутниковых данных, обеспечивающей точное и оперативное картографирование мерзлотных явлений для повышения эффективности мониторинга и управления природными и техногенными рисками в регионах вечной мерзлоты [6].

Методы и материалы

Для достижения поставленных целей в данной работе использовался комплекс со-

временных методов дистанционного зондирования и геоинформационного анализа, позволяющих эффективно выявлять и классифицировать криогенные процессы на территориях вечной мерзлоты [7]. В качестве основных материалов исследования применялись спутниковые снимки с высоким пространственным и спектральным разрешением, обеспечивающие детальное отображение состояния поверхности. В частности, использовались данные спутников Landsat-7 ETM+ и Sentinel-2, которые обладают необходимыми характеристиками для выявления особенностей мерзлотных ландшафтов и динамики криогенных явлений [8].

В настоящее время разработаны методики автоматизированного геоинформационного картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли, в которых подробно описываются общие принципы построения тематических карт и обработки спутниковой информации [9]. Однако до настоящего времени отсутствовали специализированные методики, направленные именно на обработку и анализ материалов космической съёмки, связанных с выявлением и классификацией криогенных процессов. Это обуславливает актуальность и необходимость разработки адаптированных подходов, учитывающих специфику мерзлотных ландшафтов и характерные признаки криогенных явлений для повышения точности и достоверности картографирования в арктических регионах.

Разработанная методика обработки материалов космической съёмки включала несколько ключевых этапов, которые представлены на рис. 1. Данная методика включает последовательные этапы отбора, обработки и анализа спутниковых данных, что позволяет эффективно детектировать и классифицировать признаки мерзлотных явлений на исследуемой территории.

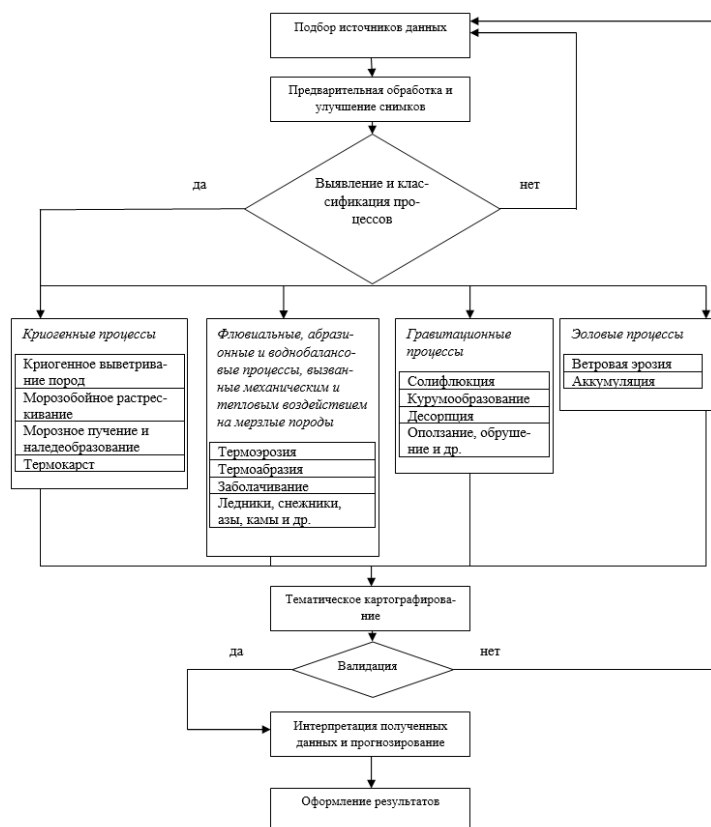


Рис. 1. Общий метод обработки космических снимков криогенных процессов

В рамках данного исследования была разработана технологическая схема обработки материалов космической съемки, применяемая на примере Надымского района, с целью обеспечения эффективного картографирования криогенных процессов (рис. 2). Территория исследования избрана не случайно, поскольку экономическое значение Надымского района как для страны, так и для региона в значительной степени обусловлено добычей и транспортировкой природного газа и нефти [10]. Примечательно, что около 30 % общего объема газа, добываемого в России, приходится на территорию Надымского района.



Рис. 2. Технологическая схема обработки материалов космической съемки при картографировании криогенных процессов

Данная технологическая схема включает в себя этапы предварительного отбора данных с учетом сезонных и метеоусловий, что позволяет минимизировать влияние облачности и снежного покрова на качество спутниковых изображений. Особое внимание уделяется применению методов спектрального анализа и фильтрации, направленных на выделение характерных признаков криогенных процессов, таких как термокарст, солифлюкция и термоэрозия [11].

Автоматизированная классификация с использованием алгоритма максимального правдоподобия позволяет повысить точность выделения различных типов мерзлотных явлений и обеспечить систематизацию полученных данных [12]. Итоговые тематические карты, созданные на основе данной методики, служат важным инструментом для мониторинга состояния мерзлотных ландшафтов и принятия обоснованных решений в области природопользования и инфраструктурного планирования [13]. Таким образом, разработанная методика обработки материалов космической съемки обеспечивает комплексный подход к изучению криогенных процессов и обладает высоким потенциалом для применения в арктических регионах с учетом их специфических природных и техногенных условий.

Результаты

В исследовании применялось визуальное дешифрирование криогенных процессов, поскольку не ставилась задача определения их происхождения — природного или антропогенного. Вместе с тем, следует учитывать, что неоднозначность ландшафтной индикации мерзлотных условий может существенно влиять на оценку устойчивости одинаковых по типу ландшафтов к техногенным воздействиям, учитывая различия в их мерзлотных характеристиках [14].

В результате апробации разработанной методики была создана серия тематических карт криогенных процессов, приуроченных к ландшафтам Надымского района. Процесс создания карт включал несколько последовательных этапов.

1. Сбор и подготовка картографической информации и дополнительных материалов,

включая выбор спутниковых снимков бесснежного периода с минимальной облачностью для обеспечения максимального качества исходных данных.

2. Визуальное дешифрирование полученных изображений с целью предварительного выявления характерных признаков криогенных процессов.

3. Определение эталонных участков для обучения классификатора с использованием метода максимального правдоподобия.

4. Создание карты классификации мерзлотного ландшафта на основе автоматизированной обработки спутниковых данных.

Изначально для исследования были отобраны спутниковые снимки исследуемого района бесснежного периода с минимальной облачностью (рис. 3).

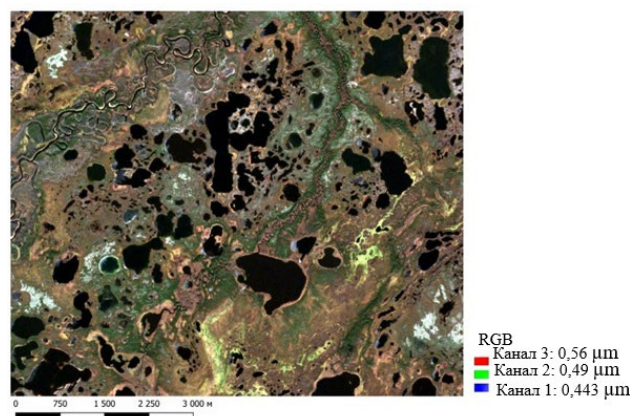


Рис. 3. RGB – снимок южной части Надымского района (за 16.09.2017 г.)

На этапе визуального дешифрирования были выделены основные криогенные процессы в районе исследования:

1. Морозобойное растрескивание и криогенное выветривание.
2. Морозное пучение.
3. Термокарст.
4. Солифлюкция.
5. Термоабразия.
6. Термоэрозия.
7. Заболачивание.

Далее была проведена классификация южной части Надымского района, для этого был использован безоблачный снимок 2017 г. и обрезан по границе исследуемого района (рис. 4).

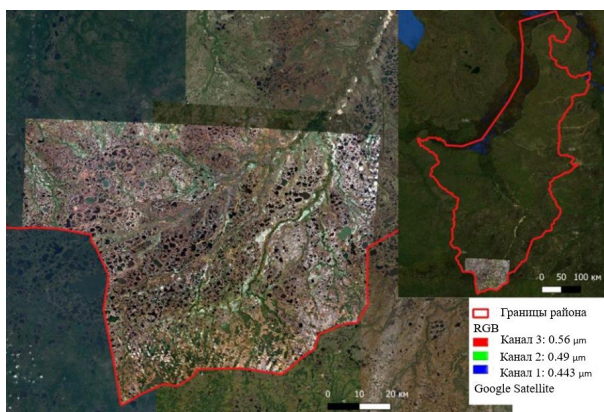


Рис. 4. Участок на юге Надымского района, снимки Sentinel-2

При работе с классификацией на спутниковых снимках отчетливо выделялись эоловые процессы, что послужило основанием для включения их в состав исследования. Для дальнейшего анализа был создан RGB-образ путем синтеза 2-, 3- и 4-го спектральных каналов. Классификация выполнялась методом максимального правдоподобия (Maximum Likelihood) с использованием программного обеспечения QGIS на основе заданных параметров (эталонов), соответствующих выделяемым классам (эталонам):

1. Болота.
2. Солифлюкция.
3. Лесной массив.
4. Термоэрозия.
5. Бугры пучения.
6. Термокарст.
7. Болотная растительность.
8. Эоловые процессы.

Для работы были взяты исходные космические снимки, представленные на рис. 5, 6.

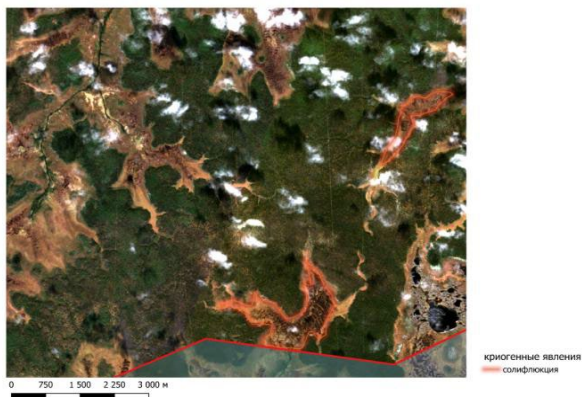


Рис. 5. RGB – снимок солифлюкции и облачности

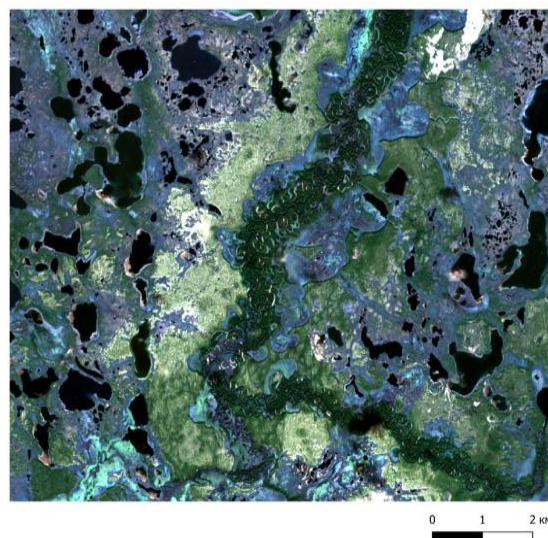


Рис. 6. RGB – снимок термоэрозии и речной долины

В результате апробации разработанной методики была создана серия тематических карт, которые, однако, обладают рядом недостатков, требующих дальнейшей доработки. К основным проблемам относятся наличие помех и шумов на спутниковых снимках (рис. 7), некорректный выбор масштаба картографирования (рис. 8), что в совокупности приводит к снижению качества классификации криогенных процессов. Устранение этих недостатков является важным шагом для повышения точности и надежности картографических материалов в последующих исследованиях.

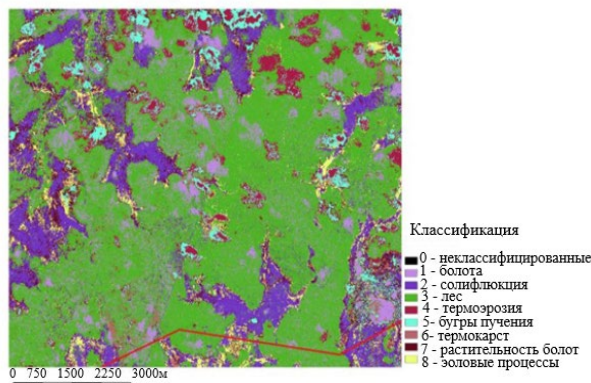


Рис. 7. Классификация, при которой облачность определена в категорию болот

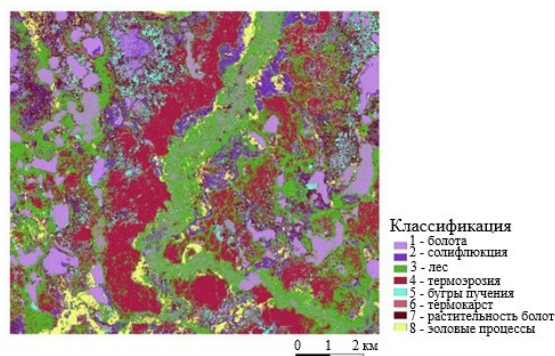


Рис. 8. Классификация, при которой термоэрозией выделена растительность

Обсуждение

Полученные в ходе исследования результаты показывают, что разработанная методика обработки материалов космической съемки для выявления и классификации криогенных процессов на территории Надымского района обладает недостаточной эффективностью. Созданные тематические карты позволили визуализировать пространственное распределение основных мерзлотных явлений с достаточно низкой достоверностью — в пределах 60–70 %. Тем не менее, в процессе анализа были выявлены участки с повышенной активностью эрозионных процессов, что является важной информацией для мониторинга состояния вечномерзлотных ландшафтов и планирования инженерных мероприятий.

Низкий уровень достоверности классификации обусловлен рядом факторов, среди которых ключевыми являются ограниченность используемых дешифровочных признаков и неоптимальный выбор масштаба картографирования. Кроме того, наличие помех и шумов на спутниковых снимках негативно влияет на качество обработки и интерпретации данных.

Для повышения точности и надежности результатов необходимо дальнейшее совершенствование методики. В частности, следует расширить набор дешифровочных признаков, используемых для классификации эрозионных процессов, что позволит более полно охватить разнообразие криогенных явлений. Также важным направлением является подбор оптимального масштаба картографирования, адекватного масштабам проявления

криогенных процессов в регионе. Разработка и внедрение более совершенных алгоритмов фильтрации шумов и адаптивных методов классификации позволит существенно повысить качество тематических карт и достоверность получаемых данных.

Сравнение с результатами других авторов демонстрирует, что аналогичные сложности характерны для исследований в условиях вечной мерзлоты, где высокая динамичность и сложность ландшафтов требуют комплексных и гибких подходов к дистанционному зондированию [15]. Поэтому дальнейшая работа по улучшению методики будет способствовать развитию инструментов мониторинга и обеспечению устойчивого природопользования в арктических регионах.

Заключение

Изучение и мониторинг мерзлотных областей имеет все большее значение в свете изменения климата и его влияния на глобальные экосистемы. Эффективная методика обработки данных космических изображений, позволяющая составлять разномасштабные мерзлотные карты с элементами автоматизированного выделения криогенных процессов, становится необходимым инструментом для точного анализа и прогнозирования изменений в мерзлотных зонах [16]. Развитие таких методик открывает возможности для более глубокого понимания динамики мерзлотных процессов и обеспечивает базу для разработки эффективных стратегий устойчивого управления экосистемами, подверженными воздействию криогенных явлений.

В данной статье рассмотрена разработка и апробация методики обработки материалов космической съемки для выявления и классификации криогенных процессов на территории Надымского района ЯНАО. Полученные результаты позволили создать серию тематических карт, отражающих пространственное распределение основных мерзлотных явлений и зон с повышенной активностью эрозионных процессов. Несмотря на достигнутые успехи, достоверность классификации находится в пределах 60–70 %, что указывает на необходимость дальнейшего совершенствования предложенной методики.

Главным выводом исследования является осознание важности расширения набора дешифровочных признаков и выбора оптимального масштаба картографирования для повышения точности выявления и классификации криогенных процессов. Также критически важным является развитие более эффективных алгоритмов фильтрации шумов и адаптивных методов классификации данных спутниковой съемки.

Рекомендации по дальнейшим исследованиям включают интеграцию космических данных с полевыми наблюдениями и геофизическими методами, что позволит повысить достоверность и полноту мониторинга мерзлотных ландшафтов [15]. Кроме того, перспектив-

ным направлением является разработка универсальных методик, адаптируемых к различным арктическим регионам с учетом их специфики. Особое внимание следует уделять исследованию влияния антропогенных факторов и климатических изменений на динамику криогенных процессов.

В целом, применение дистанционного зондирования в сочетании с современными методами анализа данных открывает широкие возможности для устойчивого природопользования и обеспечения безопасности инфраструктуры в условиях вечной мерзлоты, что делает развитие данной области научных исследований актуальным и востребованным.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гаврилов А. В. Методика и результаты геокриологического картографирования арктического шельфа в связи с перспективами его нефтегазового освоения. Наука, образование и духовность в контексте концепции устойчивого развития : материалы всероссийской научно-практической конференции (Ухта, 24–25 ноября 2016 г.). Ухта : Ухтинский государственный технический университет, 2017. С. 122–126.
2. Анисимов О. А., Кокорев В. А. Моделирование мощности сезонноталого слоя с учетом изменений климата и растительности: прогноз на середину XXI века и анализ неопределенностей. Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 2. С. 3–10.
3. Шестакова А. А. Картографирование мерзлотных ландшафтов с учетом сукцессий растительности (на примере приленского плато): дис. ... канд. геогр. наук. Якутск, 2011. 162 с.
4. Самсонова В. В., Шепелев А. Г., Иванова Р. Н., Сантаева В. А., Никитин Н. И., Митрофанов А. Г. Мерзлотные ландшафты и условия участков с активизацией криогенных процессов в нижнем течении Лены. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2019. № 2 (14). С. 15–31.
5. Малинников В. А. Шаров А. И. Спутниковое дистанционное зондирование высокоширотной Арктики: проблемы и возможности. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 1996. № 3. С. 9–16.
6. Осадчая Г. Г. Мерзлотные ландшафты Большеземельской тундры как основа рационального природопользования: дис. ... докт. геогр. наук. Ухта, 2018. 322 с.
7. Зотова Л. И. Методология оценки и картографирования мерзлотно-экологического состояния ландшафтов Тюменского Севера. Ландшафтоведение: теория, методы, ландшафтно-экологическое обеспечение природопользования и устойчивого развития: материалы XII Международной ландшафтной конференции (Тюмень, 21-27 августа 2017 г.). Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2017. С. 143–145.
8. Калиничева С. В. Выявление и картографирование мерзлых и талых пород с использованием космических снимков в горных районах криолитозоны (на примере Олекмо-Чарского нагорья в Южной Якутии). ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 2. С. 71–82.
9. Майоров А. А., Каримова А. А. Общая методика автоматизированного геоинформационного картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63, № 2. С. 234–240.
10. Москаленко Н. Г., Казанцева Л. А., Матыщак Г. В., Орехов П. Т., Пономарева О. Е., Устинова Е. В. Мониторинг геокриологических и ландшафтных условий в полосе трассы газопровода Надым-Пунга. Материалы международной конференции «Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения (Тюмень 21-24 апреля 2008 г.). Тюмень, 2008. С. 192–195.

11. Корниенко С. Г. Характеристика современных трансформаций криогенных ландшафтов по данным дистанционного зондирования. Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике (Салехард, 03–12 ноября 2021 г.) Салехард, 2021. С. 206–209.
12. Каримова А. А. Разработка методики автоматизированного геоинформационного картографирования на основе данных дистанционного зондирования Земли: дис. кандидата технических наук. Москва, 2019. 110 с.
13. Федоров А. Н., Шестакова А. А., Торговкин Я. И., Васильев Н. Ф. Цифровое тематическое картографирование современного состояния мерзлотных ландшафтов в Якутии. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2019 (2) С. 36–49.
14. Тумель Н. В., Зотова Л. И. Неоднозначность ландшафтной индикации мерзлотных условий в различных масштабах картографирования криолитозоны России. Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. Москва. 2018. С. 234–240.
15. Мельников В. П., Скворцов А. Г., Малкова Г. В. [и др.] Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью сейсмических методов. Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 171–180.
16. Малышева Н. В. Основы автоматизированного дешифрирования аэрокосмических снимков лесов с использованием ГИС : учебное пособие. М.: МЭСХ, 2018. 136 с.

REFERENCES

1. Gavrilov, A.V. (2017). Methods and results of geocryological mapping of the Arctic shelf in connection with the prospects for its oil and gas development. *In Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: Nauka. obrazovaniye i dukhovnost v kontekste kontseptsii ustoychivogo razvitiya. [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference: Science, Education, and Spirituality in the Context of the Concept of Sustainable Development]* (pp. 122–126). Ukhta: Ukhtinskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet [in Russian].
2. Anisimov, O. A. Kokorev, V. A (2017). Modeling the thickness of the seasonal snow cover, taking into account climate and vegetation changes: a forecast for the middle of the 21st century and an analysis of uncertainties. *Kriosfera Zemli [Kriosfera Zemli.]*, Vol. 21. No. 2, 3-10. [in Russian].
3. Shestakova, A. A. (2011). *Kartografirovaniye merzlotnykh landshaftov s uchetom suksessiy rastitelnosti (na primere prilenskogo plato). [Mapping of permafrost landscapes taking into account vegetation succession (using the example of the Pri-Lena Plateau)]* Candidate's thesis. Yakutsk. [in Russian].
4. Samsonova, V. V., Shepelev, A. G., Ivanova, R. N., Santaeva, V. A., Nikitin, N. I., & Mitrofanov, A. G. (2019). Merzlotnye landshafty i usloviya uchastkov s aktivizatsiyey kriogennykh protsessov v nizhnem techenii Leny. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova. Seriya "Nauki o Zemle" [Vestnik of the North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov. Earth Sciences Series]*, 2(14), 15–31. [in Russian]
5. Malinnikov, V. A. Sharov A. I (1996). Permafrost landscapes and conditions in areas with active cryogenic processes in the lower reaches of the Lena River. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka [Izvestiya of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography]*, No. 3, 9–16 [in Russian]
6. Osadchaya, G. G. (2018). Merzlotnyye landshafty Bolshezemelskoy tundry kak osnova ratsionalnogo prirodopolzovaniya [Permafrost landscapes of the Bolshezemelskaya tundra as a basis for rational nature management: doctoral dissertation]. *Candidate's thesis*. Ukhta [in Russian].
7. Zotova, L. I. (2017) Methodology for assessing and mapping the permafrost-ecological state of landscapes in the Tyumen Nort. *In Materialy XII Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferentsii: Landshaftovedeniye: teoriya. metody. landshaftno-ekologicheskoye obespecheniye prirodopolzovaniya i ustoychivogo razvitiya [Materials of the XII International Landscape Conference: Landscape Studies: Theory and Methods. Landscape and Ecological Support for Nature*

Management and Sustainable Development] (pp. 143-145). Tyumen: Izdatelstvo Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta.. [in Russian].

8. Kalinicheva, S. V. (2018) Identification and mapping of frozen and thawed rocks using space images in mountainous areas of the permafrost zone. *InterKarto. InterGIS [InterKarto. InterGIS]*, Vol. 24. No. 2, 71-82. [in Russian].

9. Mayorov, A.A. (2019). General methodology for automated geoinformation mapping based on Earth remote sensing data // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka. [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka]*, Vol. 63. No. 2, 234-240 [in Russian].

10. Moskalenko, N. G., Kazantseva, L. A., Matyshchak, G. V., Orekhov, P. T., Ponomareva, O. E., Ustinova, E. V. (2008) Monitoring geokriologicheskikh i landshaftnykh usloviy v polose trassy gazoprovoda Nadym-Punga. In *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii «Kriogennyye resursy polyarnykh i gornykh regionov. Sostoyaniye i perspektivy inzhenernogo merzlotovedeniya» [Materials of the International Conference "Cryogenic Resources of Polar and Mountain Regions. State and Prospects of Engineering Permafrost Science]* (pp. 192-195). Tyumen [in Russian].

11. Korniyenko, S. G. (2021). Characteristics of modern transformations of cryogenic landscapes based on remote sensing data. *Sovremennyye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoy bezopasnosti sooruzheniy v Arktike. [Conference materials: Modern Research on the Transformation of the Cryosphere and Geotechnical Safety of Structures in the Arctic]* (pp. 206-209). Salekhard [in Russian].

12. Karimova, A. A. (2019) *Razrabotka metodiki avtomatizirovannogo geoinformatsionnogo kartografirovaniya na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zeml [Development of an automated geoinformation mapping methodology based on Earth remote sensing data]. Candidate's thesis. Moskva [in Russian].*

13. Fedorov, A. N., Shestakova, A. A. Torgovkin, Ya. I., Vasilyev, N. F. (2019) Digital thematic mapping of the current state of permafrost landscapes in Yakutia. *Vestnik Severo-Vostochnogo federalnogo universiteta im. M. K. Ammosova Seriya «Nauki o Zemle». [Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences]* (2) Pp. 36–49. [in Russian].

14. Tumel, N. V., Zotova, L. I., (2018) Ambiguity of landscape indication of permafrost conditions at different scales of mapping the cryolithozone of Russia. *Inzhenernyye izyskaniya v stroitelstve. Materialy dokladov Chetyrnadtsatoy Obshcherossiyskoy konferentsii izyskatelskikh organizatsiy. [Materials of the Fourteenth All-Russian Conference of Surveying Organizations Engineering Surveys in Construction]* (pp. 234-240). Moskva. [in Russian].

15. Melnikov, V. P., Skvortsov, A. G., Malkova, G. V. et. al. (2010). Results of studying the geocryological conditions of the Arctic territories using seismic methods. *Geologiya i geofizika [Geologiya i geofizika]*, Vol. 51., No. 1, 171-180. [in Russian].

16. Malysheva, N. V. (2018). *Osnovy avtomatizirovannogo deshifirovaniya aerokosmicheskikh snimkov lesov s ispolzovaniyem GIS [Fundamentals of Automated Decoding of Aerial and Space Images of Forests Using GIS]*. Moskva: Redaktsiya zhurnala "Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva". 136 p. [in Russian].

Об авторах

Анжела Асхатовна Ильченко – старший преподаватель кафедры геоэкологии

Author details

Angela A. Ilchenko – Senior Lecturer, Department of Geocology

Получено / Received 02.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 19.01.2026

Принята к публикации / Accepted 02.02.2026