

Л. И. Зотова<sup>1</sup>, М. А. Викулина<sup>2</sup>

## ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СЕВЕРНЫХ ГЕОСИСТЕМ К АКТИВИЗАЦИИ ОПАСНЫХ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

### АННОТАЦИЯ

В настоящей статье рассматривается одна из актуальных задач геоэкологии криолитозоны — прогнозная оценка реакции криогенных ландшафтов на антропогенные воздействия механического характера. Данная проблема является особенно значимой на предпроектных этапах инженерно-географических изысканий, проводимых на северных территориях. Было изложено содержание авторской методики составления матричных легенд и ландшафтно-типологических карт, а также поэтапная процедура оценки устойчивости северных геосистем к антропогенным воздействиям. Методика разработана и протестирована на кафедре криолитологии и гляциологии географического факультета Московского государственного университета имени Ломоносова. Основой данной методики является анализ влияния ведущих природных факторов на устойчивость криогенных ландшафтов при антропогенном нарушении поверхности с учетом процессов промерзания и оттаивания, определяющих развитие опасных рельефообразующих процессов. Методика апробирована на ряде тестовых участков, расположенных на севере Западной Сибири от арктической тундры до лесотундры. Был проведен сравнительный анализ потенциальной устойчивости ландшафтов (на уровне урочищ и типов местности) к активизации опасных рельефообразующих процессов. Оценка и последующее картографирование выполнялись в разных масштабах (от 1:50 000 до 1:500 000). Основными методами для оценки устойчивости ландшафтов стали ландшафтная индикация, дешифрирование данных ДДЗ, экспертные оценки, расчетно-статистический и пространственный анализ. Ранжирование геокомплексов по степени уязвимости к антропогенному освоению проводилось на ландшафтной основе с использованием интегральных индексов, полученных различными способами. Это в итоге позволило составить оценочные мерзлотно-геоэкологические карты, направленные на обоснование ограничений по механическим воздействиям на природную среду.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** криолитозона, криогенные процессы, геоинформационное картографирование, ландшафтные исследования, методология оценки

---

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: [zotlar@mail.ru](mailto:zotlar@mail.ru)

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: [masanna2003@mail.ru](mailto:masanna2003@mail.ru)

Larisa I. Zotova<sup>1</sup>, Marina A. Vikulina<sup>2</sup>

## ASSESSMENT AND MAPPING OF THE NORTHERN GEOSYSTEMS SUSTAINABILITY TO THE HAZARDOUS CRYOGENIC PROCESSES ACTIVATION

### ABSTRACT

The article considers one of the urgent tasks of cryolithozone geoecology — predictive assessment of cryogenic landscapes response to impulse anthropogenic mechanical impacts. This problem is especially significant at pre-project stages of engineering and geographical surveys in northern territories. The content of the author's methodology for compiling matrix legends and landscape-typological maps, as well as a step-by-step procedure for assessing the stability of northern geosystems to anthropogenic impacts are presented. The methodology was developed and tested at the Geography Faculty of the Lomonosov Moscow State University. It is based on the analysis of the influence of leading natural factors on the stability of cryogenic landscapes during anthropogenic disturbance of the surface, considering the freezing and thawing processes that determine the development of hazardous relief-forming processes. The methodology was tested on a number of test sites located in the arctic and subarctic natural zones in the Western Siberia north. A comparative analysis of the potential stability of landscapes (at the level of natural boundaries and terrain types) to the activation of hazardous relief-forming processes was carried out. The assessment and subsequent mapping were carried out at different scales (from 1:50 000 to 1:500 000). The main methods for assessing the sustainability of landscapes were landscape indication, decoding of remote sensing data, expert assessments, calculation and statistical and spatial analysis. The ranking of geocomplexes by the degree of vulnerability to anthropogenic development was carried out on a landscape basis using integral indices obtained in various ways. This made it possible to compile assessment permafrost-geoecological maps aimed at substantiating restrictions on mechanical impacts on the natural environment.

**KEYWORDS:** cryolithozone, cryogenic processes, geoinformation mapping, landscape research, assessment methodology

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка устойчивости геосистем к внешним воздействиям является одной из ключевых задач физической географии и геоэкологии, особенно в пределах криолитозоны. В классической географии под «устойчивостью» подразумевается способность природно-территориальных комплексов (ландшафтов, геосистем) сопротивляться внешним нагрузкам и восстанавливаться после приложенных воздействий. Это понимание является обобщением различных трактовок устойчивости. Как известно, устойчивость геосистем реализуется в трех формах: в их способности под влиянием каких-либо изменений сохранять свою структуру, восстанавливаться и переходить из одного состояния в другое в пределах инвариантов [Тумель, Зотова, 2023].

В данной работе под устойчивостью криогенных ландшафтов понимается синтез упругой устойчивости, а именно способности противостоять техногенно-индуцированной активизации криогенных процессов, и пластичной устойчивости, выраженной в способности восстанавливаться после нарушения.

---

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: [zotlar@mail.ru](mailto:zotlar@mail.ru)

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: [masanna2003@mail.ru](mailto:masanna2003@mail.ru)

Ландшафтно-мерзлотное оценочное картографирование широко применяется при реализации проектов освоения нефтегазовых месторождений в Российской Арктике, в частности для оценки рисков антропогенного воздействия на окружающую среду. Актуальность таких исследований обусловлена высокой ранимостью северных ландшафтов высокоширотных территорий к любым техногенным нарушениям поверхности, в результате которых происходит активизация деструктивных криогенных процессов [Чигир и др., 2001; Тумель, 2004; Kizyakov, Leibman, 2016; Fedorov, 2019]. К таким процессам относятся термокарст, термоэрозия, пучение и прочие связанные с фазовыми переходами воды в лед и обратно [Шполянская, Зотова, 1994], что определяет их зависимость от температуры и льдистости пород, глубины сезонного протаивания и защитных свойств напочвенного растительного покрова.

Географы, работающие в криолитозоне, часто используют понятие «мерзлотной (литокриогенной) устойчивости», означающее способность северных геосистем противостоять техногенной активизации криогенных процессов, способных вызвать необратимые ухудшения экологической обстановки и недопустимые деформации инженерных сооружений, наряду со способностью к самовосстановлению [Тумель, Зотова, 2023]. Показателем, определяющим устойчивость, служит характер саморазвития и степень потенциального самовосстановления ландшафтов после снятия внешней нагрузки [Шполянская, Зотова, 1994]. Основным показателем реакции криогенных ландшафтов на внешние воздействия — интенсивность изменений мерзлотных и экологических условий, которые приводят к активизации опасных экзогенных процессов (преимущественно криогенных), деградации ландшафтов и деформации зданий и сооружений [Tumel, Zotova, 2019].

Целью настоящего исследования является прогнозная оценка реакции криогенных ландшафтов на импульсные воздействия механического характера, подразумевающие снятие или нарушение почвенно-растительных покровов [Москаленко, 1999]. Нарушения растительного покрова и верхнего торфяного горизонта (до 20 см) наряду с локальными изменениями микрорельефа возникают вследствие проезда техники, прокладки коммуникаций или строительства [Шполянская, Зотова, 1994]. Они появляются также из-за вырубki леса, бурения скважин и разработки карьеров, прокладки временных дорог и зимников, линейных коммуникаций и трубопроводов, сооружения кустовых площадок на месторождениях, создания искусственных насыпей и т. п.

Рассматриваются и нарушения, характерные для традиционного природопользования на Севере — деградация пастбищ при перевыпасе северных оленей, вырубка лесов, гари. Эти воздействия инициируют первичную трансформацию ландшафта, нарушают гидротермический режим мерзлых пород и приводят к активизации ландшафтообразующих процессов [Чигир и др., 2001]. Реакция проявляется в виде резкой активизации опасных рельефообразующих процессов, в связи с чем такой прогноз необходимо проводить на этапе изысканий и проектирования, до начала строительства.

Что касается понятий «ландшафт» и «геосистема», то оба описывают природные комплексы, их тождественность очевидна. Геосистема — более широкое понятие, включающее все природные компоненты территории. Ландшафт рассматривает природные комплексы с точки зрения внешнего облика в пространстве с целью их дальнейшей систематизации [Дзагоева, 2012]. Ландшафты служат операционной базой типологического картирования. Если рассматривать ландшафт как единицу физико-географического районирования, то его можно назвать геосистемой. В статье рассматриваются геосистемы локального уровня — относительно простые ПТК, из которых построены урочища, фации.

В работе представлены результаты, полученные на ряде тестовых участков, расположенных в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Их выбор обусловлен наличием кондиционных картографических материалов, отраслевых тематических

карт, материалов дистанционного зондирования, проведением достаточно детальных полевых мерзлотно-ландшафтных исследований. Выбранные участки расположены в разных природно-климатических условиях, от подзоны арктической тундры до лесотундры, и характеризуются разной степенью хозяйственного освоения. Карты составлены в разных масштабах картографирования (1:50 000–1:500 000) с применением различных методических приемов оценки устойчивости. Для каждого тестового участка выбор оценочных факторов был обоснован. Для получения интегральных индексов, применяемых при ранжировании ландшафтов по степени уязвимости к освоению, предложены различные методы их расчета.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Выбор факторов для оценки

Методический прием оценки устойчивости основан на выборе характеристик природного комплекса, по которым можно судить о степени его сопротивления нагрузкам. Однако выбор отраслевых факторов, их число и спектр различны в зависимости от региональной специфики, масштаба исследований, характера и вида освоения. В первую очередь учитываются «немерзлотные» факторы, связанные с климатом, в т. ч. радиационно-тепловым балансом поверхности Земли, рельефом, составом и свойствами пород различного генезиса, а также с растительностью, степенью дренированности ландшафтов, защищенностью подземных вод. В число мерзлотных факторов входят среднегодовая температура пород и криогенное строение, связанное с количественной оценкой объемной льдистости пород, криогенными процессами, мощностью слоя сезонного промерзания-протаивания, площадью мерзлых пород.

Перечень геоэкологических факторов для оценки устойчивости северных территорий, включая бореальную криолитозону, и их количественные значения подробно рассмотрены в ряде последних публикаций [Медведков, 2021; Jorgenson et al., 2022; 2025]. В зависимости от уровня, масштаба и задач исследований используются те или иные сочетания вышеназванных факторов.

Наиболее значимыми (традиционными) факторами, определяющими мерзлотно-экологическое состояние ландшафтов тестовых участков, являются температура горных пород, льдистость, теплоизоляционные свойства напочвенного покрова и скорость его самовосстановления.

*Температура и льдистость* определяют интенсивность оттаивания пород: чем ниже температура и меньше льдистость мерзлых пород, тем меньше риск возникновения неблагоприятных криогенных процессов. В то же время на талых породах их интенсивность также затухает. Температура горных пород считается до глубины, соответствующей слою годовых теплооборотов (10–15 м).

*Теплоизоляционные (протекторные) свойства напочвенного покрова* обуславливают сохранность температурных условий мерзлых пород: чем больше проективное покрытие, высота растительных сообществ и мощность торфа, тем опаснее ее уничтожение [Москаленко, 2012; Тумель, Зотова, 2023]. Растительность «консервирует» грунты в определенном термическом состоянии, поэтому при уничтожении разреженной растительности опасность развития экзогенных процессов практически отсутствует в связи с низкой защитной ролью таких сообществ. Максимальное снижение защитных свойств — у кустарничково-осоково-моховых сообществ с мощностью торфа более 0,5 м.

За рамками настоящей статьи остается дискуссия о влиянии потепления климата на сохранение таяния мерзлого субстрата. Одни авторы считают, что в этом случае произойдет прирост торфяного горизонта, «который изолирует грунты от теплой атмосферы, что вызовет процесс новообразования мерзлых пород» [Шполянская и др., 2022]. Другие

авторы полагают, что рост высоты снежного покрова обуславливает таяние мерзлоты [Московченко, Губарьков, 2023], особенно в залесенной криолитозоне Среднесибирского плоскогорья, где «позеленение» курумных склонов сопровождается вытаиванием гольцового льда [Высоцкая, Медведков, 2024]. В то же время эти зарастающие курумы со временем могут перейти в стадию «висячего болота», в которых может происходить новообразование мерзлых пород [Medvedkov, 2016].

Защитные свойства напочвенного покрова косвенно коррелируют со снегозадерживающей способностью растительных сообществ: чем больше густота растительного покрова, в первую очередь кустарников, тем выше снегоемкость ландшафта. Обладая низкой теплопроводностью, снег является буфером между почвой и атмосферой, предохраняя первую от теплопотерь в зимнее время. В случае сведения снегоемкой растительности (например, в кустарниковых тундрах) вероятность активизации опасных процессов резко увеличивается [Тумель, 2004]. Этот параметр в основном оценивается в крупномасштабных исследованиях.

*Скорость самовосстановления растительности* зависит от множества факторов, таких как тип растительности (видовое разнообразие, высота растений, степень проективного покрытия), характер увлажнения, скорость ветра, количество тепла (экспозиция) и др. Именно от этого фактора зависит то, насколько быстро ландшафт вернется в фоновое состояние после нарушения: чем меньше потенциал восстановления, тем больше риск активизации криогенных процессов. При ранжировании этого параметра обычно опираются на длительные мониторинговые наблюдения известных геоботаников. Например, для Западной Сибири это работы Н. Г. Москаленко [2012], в которых оценивается изменение проективного покрытия поверхности пионерной растительностью в процентах на десятый год после нарушения. Быстрое восстановление с проективным покрытием 75–100 %, как правило, происходит за 1–3 года в хорошо увлажненных местообитаниях (травяно-пойменные и болотные сообщества). Длительное и неполное восстановление происходит за 10 и более лет (проективное покрытие 0–25 %). Дольше всего (более 12 лет) восстанавливаются мохово-лишайниковые покровы на хорошо дренированных междуречьях [Москаленко, 1999].

В крупно- и среднемасштабных исследованиях для усиления весомости опасности проявления какого-то процесса или явления можно использовать дополнительные «региональные» факторы, оказывающие ландшафтообразующую роль на местном и региональном уровне, которые в основном связаны с климатическими параметрами и особенностями рельефа. Например, для районов проявления криогенно-эрозионных процессов — это степень расчленения рельефа и крутизна склонов или же для районов с проявлением солифлюкции и термоэрозии — степень размываемости мерзлых дисперсных пород.

### **Обоснование выбора тестовых участков**

Методические принципы создания мерзлотно-экологических карт на ландшафтной основе рассматриваются на примере ряда тестовых участков, расположенных в Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, в подзонах арктической и субарктической тундры и северной лесотундры в пределах известных газоконденсатных месторождений: Ямбургского, Харвутинского, Салмановского, Медвежьего и Западно-Заполярного (рис. 1). На основании долговременных крупномасштабных полевых изысканий авторским коллективом создан большой банк данных природных комплексов ранга урочищ и типов местности (м-б 1:25 000–1:50 000). Их число позволило использовать многофакторный корреляционный анализ природных факторов для оценки их значимости (вклада каждого из них в итоговую оценку опасности) и приближает качественную оценку к количествен-

ной. Интегральные индексы устойчивости ландшафтов в детальных крупномасштабных исследованиях, как правило, были рассчитаны по уравнениям множественной регрессии.

Участки «Ямбург» и «Харвута» (рис. 1) расположены на Тазовском п-ове в подзонах типичной и южной тундры. В общей ландшафтной дифференциации региона преобладают два комплекса типов рельефа [Тумель, Зотова, 2023]: достаточно расчлененный рельеф склонов и долин гидрографической сети флювиального и криогенно-эрозионного генезиса (Западно-Тазовская ландшафтная провинция) и плоская слабо расчлененная водораздельная равнина аллювиально-морского генезиса (Пойловояхинская провинция). Западно-Тазовская провинция отличается чрезвычайно контрастной ландшафтной структурой, обусловленной различиями в степени дренированности и экспозиции склонов. Здесь среди процессов доминируют делювиальный смыл, солифлюкция, сплывание грунта и термоэрозия. На крутых склонах широко развиты криогенные бедленды. В нижней части склонов формируются обширные солифлюкционные террасы. Плоская Пойловояхинская провинция, сложенная с поверхности торфом, подстилаемым песками и супесями, отличается широким распространением озерно-болотных и хасырейных типов местности. Среди современных ландшафтообразующих процессов преобладают заболачивание, торфообразование, криогенное пучение и мелкий термокарст.

Участок «Гыдан» (рис. 1) находится на северо-западе Гыданского п-ова в подзоне арктической тундры в зоне сплошного распространения сильнольдистых пород. В ландшафтной структуре преобладают пятнистые травяно-моховые тундры на междуречьях, сложенных пылеватыми песками и супесями морского происхождения. Территория поражена такими склоновыми процессами, как овражная термоэрозия, солифлюкция, оползни-сплывы.



Рис. 1. Расположение тестовых участков исследования (красные треугольники)

Fig. 1. Location of study areas (red triangles)

Участок «Медвежье» (рис. 1) расположен в южной тундре Тазовского п-ова, на границе с лесотундрой, характеризуется более мягкими мерзлотными условиями — прерывистой мерзлотой, высокотемпературными или тальными породами. Участок отличается увеличенной мощностью торфяных горизонтов, появлением древесно-кустарниковой растительности — кустарниковых тундр с березово-лиственничными рединами по балкам и долинам. Наибольшие площади занимают ландшафты слабодренированных междуречий или заболоченных понижений, торфяников, озерных котловин, где развиваются термокарст, заболачивание, площадное пучение (рис. 2).

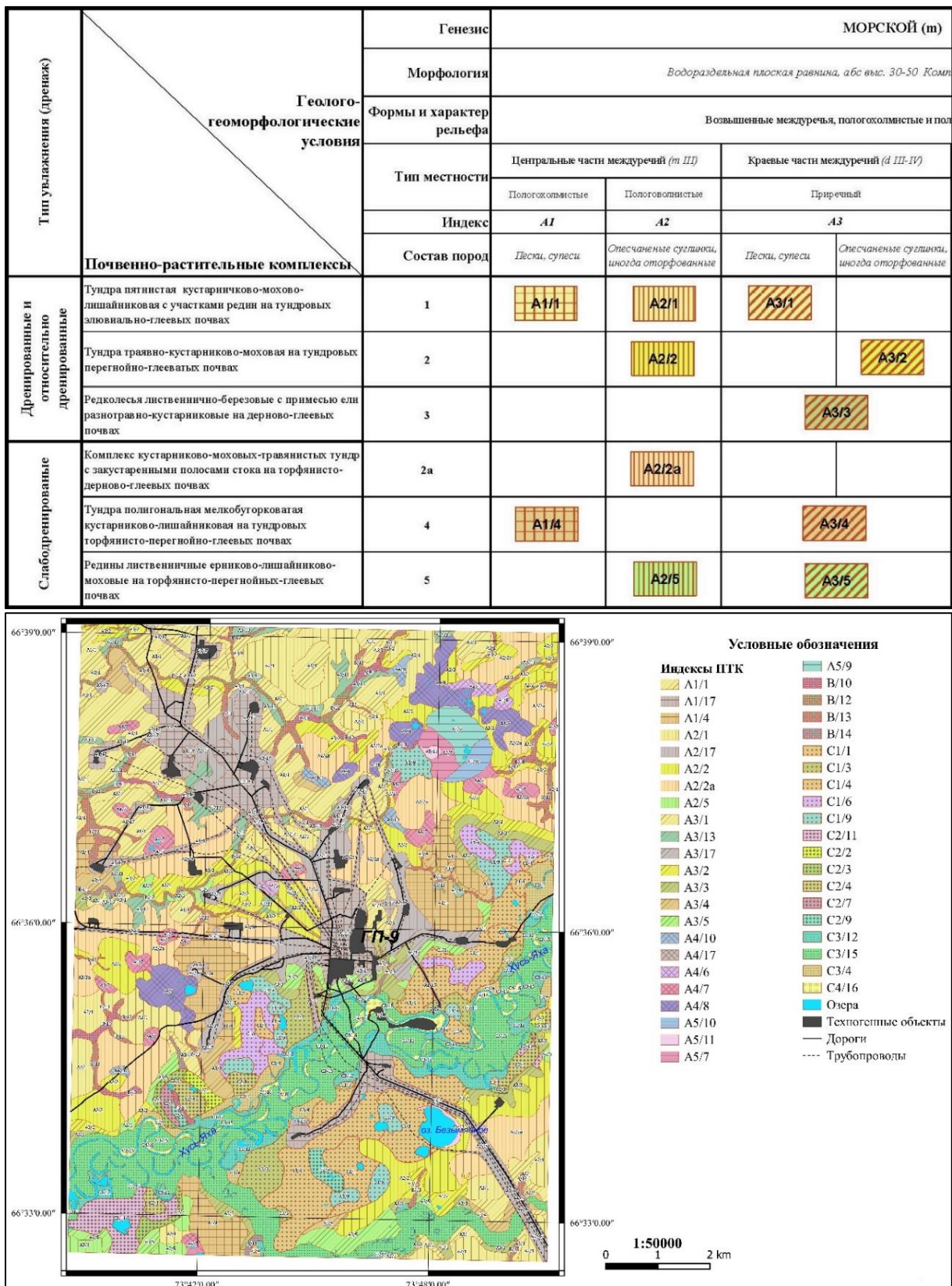


Рис. 2. Фрагмент графической легенды к ландшафтной карте и ландшафтная карта участка «Медвежье» (автор Л. И. Зотова)

Fig. 2. Fragment of the legend of the landscape map and the landscape map of the "Medvezhye" study area (author of the map L. I. Zotova)

Методику картографирования в более мелком м-бе 1:500 000 иллюстрируют материалы по тестовому участку «Тазовский». В отличие от первой группы тест-объектов, ряд ландшафтов этого участка не столь велик, доминирующие выделы не так многочисленны и отличаются более высоким иерархическим уровнем. По этой причине расчет интегрального индекса устойчивости КМУ (коэффициент мерзлотной устойчивости) проводился более простым способом (как среднее арифметическое в баллах с использованием весовых коэффициентов).

Участок «Тазовский» (рис. 1) расположен на территории Пур-Тазовского междуречья и репрезентативен для зон южной тундры и северной лесотундры, в которых характер распространения мерзлых пород сменяется от сплошного до прерывистого, а среднегодовые температуры пород изменяются от  $-5^{\circ}\text{C}$  до положительных значений, близких к  $0^{\circ}\text{C}$ . В пределах данного участка находится Западно-Заполярье газоконденсатное месторождение.

### **Методология оценочных исследований и картографирования**

Работа по оценке устойчивости ландшафтов к активизации криогенных процессов начинается с создания кадастра природных комплексов в форме компактной графической легенды, построенной по зонально-генетическому принципу. Вертикальные колонки соответствуют родам ландшафта с геолого-геоморфологическими характеристиками, а строки — почвенно-растительным ассоциациям, сгруппированным по типу увлажнения. Пересечения колонок и строк соответствуют видам ландшафтов ранга урочищ и типов местности и образуют клетки, которые соответствуют видам природно-территориальных комплексов (ПТК). Табличная легенда облегчает выборку характеристик отдельных компонентов ландшафтов, исходя из целевой установки прикладных карт (рис. 2).

Подобная дифференциация ПТК по типам, родам, видам, группам лежит в основе составления ландшафтно-типологических карт в терминологии классиков ландшафтного картографирования В. А. Николаева [1978] и А. Г. Исаченко [1991]. Последний автор специализировался на картографировании северных территорий, в частности, Тюменской обл. Согласно А. Г. Исаченко, типы ПТК следует выделять по биоклиматическим показателям, таким как «тундровый», «лесотундровый». Роды ПТК индицируются по геолого-геоморфологическим признакам — типам рельефа и составу поверхностных отложений. Виды ландшафтов выделяются как по формам мезо- и микрорельефа, так и по особенностям почвенно-растительного покрова.

Таким образом, в методическом плане типологическое картографирование основано на типизации индивидуальных природных комплексов по принципу схожести. Встречаемость ПТК, их пространственные комбинации являются основой для районирования территории, что немаловажно, учитывая прикладной характер ландшафтно-экологического картографирования. Также имеет значение и то, что этот классификационный подход допускает использование сквозных терминов («геокомплекс», «ПТК») без ранжирования морфологических составляющих ландшафта.

Ландшафтные карты создаются наложением тематических слоев растительности, геоморфологических уровней, гидрографической сети и техногенной нагрузки. При этом способе картографирования сохраняется композиция каждого исходного слоя, а их совместное наложение отражает полностью ландшафтную структуру территории, включая дренаж, почвы и местный климат. Далее каждому ландшафтному контуру присваивается буквенно-цифровой индекс, используя запрос через атрибутивные таблицы (рис. 2). Универсальность методики ландшафтного картографирования криолитозоны [Tumel, Zotova, 2019] заключается в том, что для получения общей картины ландшафтной структуры исследуемых территорий достаточно использовать всего два основных слоя — геолого-

геоморфологические условия и почвенно-растительный покров. В совокупности с визуальным дешифрированием космических снимков и камеральной обработкой полевых описаний ландшафтная карта позволяет достаточно точно и полно определить свойства других компонентов ландшафта — состав пород, характер увлажнения, микроклимат, мерзлотные условия и приуроченность опасных экзогенных процессов.

На рис. 2 показан фрагмент графической легенды к ландшафтной карте *участка «Медвежье»*. Геоморфологические уровни на картах выделяются цветной штриховкой разных видов. Буквенный индекс указывает на морфологический тип поверхности, а цифра после него — тип местности. К примеру, индекс А обозначает «водораздельные равнины», Б — «долины верхних звеньев гидрографической сети». Буквенно-цифровое обозначение А1 обозначает геолого-геоморфологический тип местности: «пологохолмистые части междуречий» [Тумель, Зотова, 2023].

### Методика оценки устойчивости северных геосистем

Оценка состоит из нескольких последовательных этапов:

- отбора не коррелирующих друг с другом факторов, влияющих на устойчивость ландшафтов к нагрузкам (через активизацию криогенных процессов);
- составления таблицы ранжирования факторов (табл. 1–3);
- присвоения каждому ландшафту балльной оценки в соответствии с таблицей;
- ранжирования всех ландшафтов по группам устойчивости с учетом расчетных индексов (табл. 4–5);
- оценочного картографирования (рис. 3–4);
- определения необходимых природоохранных мероприятий для каждой группы устойчивости.

По этой методике на ландшафтной основе (рис. 2) составляются карты инженерно-мерзлотной (литокриогенной) устойчивости (рис. 3–4). Число и спектр оцениваемых факторов меняется в зависимости от региональной специфики и масштаба картографирования. Для сравнительной характеристики объектов используют экспертные баллы, которые можно и складывать, и суммировать матричным способом, и выводить среднее арифметическое (реже — среднее геометрическое), а также использовать расчетно-статистические методы. Так, в обзорно-региональных исследованиях при составлении «Карты потенциальной устойчивости ландшафтов криолитозоны Западной Сибири» интегральное влияние всех факторов изначально оценивалось простой суммой баллов [Шполянская, Зотова, 1994]. Подобное суммирование хотя и правомерно, но имеет ряд ограничений по причине отсутствия у баллов размерности. Это легко решается, если назначать баллы на фоне единой интервальной 100-центовой шкалы [Тумель, Зотова, 2023; Зотова, Викулина, 2024].

Имея ландшафтную основу и базу данных факторов с конкретными значениями, каждый из них можно отобразить в виде отдельного тематического слоя (льдиности, температуры и т. д.). Однако это достаточно трудоемко и не всегда оправдано. Существенно облегчает картографирование использование количественных индексов: коэффициента мерзлотной устойчивости — КМУ, экологической опасности — КЭО, коэффициента опасности —  $K_0$  и др. [Зотова, Викулина, 2024].

Выбор способа выведения интегральных индексов устойчивости зависит от таксономического ранга геосистем [Тумель, Зотова, 2023] и их числа выделов. Отметим, что для целей сравнительного анализа устойчивости геосистем региональной размерности допустимо применять качественную оценку и даже оперировать простым сложением пофакторных баллов. Однако в более детальных крупномасштабных исследованиях предпочтительнее использовать многофакторный корреляционный анализ. Этот метод прибли-

жает качественную оценку к количественной и позволяет оценивать значимость того или иного фактора в общей оценке. Во всех случаях мы, следуя традиции, используем экспертные оценки в баллах, которые либо складываем, либо выводим среднее арифметическое (реже — среднее геометрическое), либо применяем простые расчетно-статистические методы. В последнем случае необходимо располагать большим банком исходных данных.

### Расчет интегральных индексов по баллам

Подобный расчет проводят для ранжирования ландшафтов по степени уязвимости к антропогенному воздействию. Соответственно, чем больше степень устойчивости, тем меньше значение интегральных индексов.

Изначально определяется спектр оцениваемых факторов на основе полевых материалов, данных изыскательских организаций и применения ландшафтно-аналогового метода сравнения со схожими участками. Как правило, это универсальные факторы — льдистость и температура мерзлых пород, а также снижение защитных свойств почвенно-растительных покровов и их способность к самовосстановлению. Далее добавляются региональные факторы в связи со спецификой мерзлотно-геологических и климатических условий. Например, для «Гыдана» — это степень размываемости мерзлых дисперсных пород, густота эрозионного расчленения, а также увеличение глубины сезонно-талого слоя (СТС) при нарушении. На более южном участке «Медвежье» таким фактором стал механический состав пород слоя сезонного протаивания. После этой процедуры проводится многофакторный регрессионный анализ всех ПТК, позволяющий выявить ведущие и наиболее значимые факторы в интегральной оценке устойчивости.

Ниже приведены примеры расчета интегральных индексов КМУ по уравнениям множественной регрессии для ключевых участков «Гыдан», «Медвежье» и «Ямбург».

Для «Гыдана», после отбраковки коррелирующих факторов ( $S$  — увеличение глубины СТС и  $P$  — защитные свойства напочвенного покрова), формула расчета (1) имеет вид:

$$КМУ = 0,15 \times I + 0,11 \times T + 0,13 \times L + 0,06 \times K + 0,10 \times V - 0,72 \quad (1),$$

где  $I$  — объемная льдистость,  
 $T$  — температура мерзлых пород,  
 $L$  — размываемость дисперсных пород,  
 $K$  — густота эрозионной сети,  
 $V$  — скорость самовосстановления растительности (табл. 1).

Как известно, коэффициент при переменных указывает на значимость факторов (табл. 1). Из формулы (1) следует, что наиболее значимыми факторами в арктической тундре на Гыдане являются льдистость ( $I$ ) и характер размываемости дисперсных мерзлых пород ( $L$ ).

На участке «Медвежье» на юго-западе Тазовского п-ова в южной тундре набор ведущих факторов литокриогенной устойчивости иной (табл. 2). Здесь уже учитываются защитные свойства растительных покровов ( $P$ ), состав пород деятельного слоя ( $C$ ) и среднегодовая температура пород ( $T$ ). Уравнение регрессии приобретает вид:

$$КМУ = 0,08 \times I + 0,13 \times T + 0,13 \times C + 0,14 \times P + 0,11 \times V - 0,85 \quad (2).$$

Табл. 1. Градации факторов, влияющих на снижение устойчивости ландшафтов к проявлению экзогенных процессов на участке «Гыдан»  
 Table 1. The influence of factors on the reduction of landscape stability to the activation of exogenous processes in the "Gydan" study area

Факторы	Индекс	Оценка влияния в баллах			
		1 Слабое	2 Заметное	3 Ощутимое	4 Сильное
Объемная льдистость, дол. ед.	<i>I</i>	Слабо-льдистые ≤0,15	Умеренно-льдистые 0,15–0,3	Средне-льдистые 0,3–0,45	Сильно-льдистые ≥0,45
Температурный режим мерзлых пород, °С	<i>T</i>	≤–7	–7...–4,5	–4,5...–2,5	–2,5...–1,5
Размываемость мерзлых дисперсных пород	<i>L</i>	Слабая (торф, оторфованные супеси)	Средняя (пески, супеси)	Сильная (суглинки)	Очень сильная (пылеватые пески)
Увеличение глубины СТС при механических нарушениях, %	<i>S</i>	≤20 (торф 0,5–1,0 м)	20–35 (торф 0,15–0,5 м)	35–50 (пылеватые пески)	≥50 (пески, супеси)
Густота эрозионной сети, км/км <sup>2</sup>	<i>K</i>	Низкая ≤6	Средняя 6–10	Высокая 10–15	Чрезвычайно высокая ≥15
Снижение защитных свойств почвенно-растительного покрова при механических нарушениях, (название и характер покрова)	<i>P</i>	Минимальное (разреженный и травяно-лишайниковый)	Среднее (кустарничково-лишайниковый, лишайниково-моховый и мохово-травяной)	Сильное (кустарничково-моховый, травяно-моховый, торфянистый)	Максимальное (кустарничково-зеленомошный, травяно-моховый, торфяной)
Скорость самовосстановления растительности после нарушений, лет	<i>V</i>	Быстрое 2–4	Среднее 4–8	Медленное 8–14	Длительное или неполное >14

Табл. 2. Градации факторов, влияющих на снижение устойчивости ландшафтов к проявлению экзогенных процессов на участке «Медвежье»  
 Table 2. The influence of factors on the reduction of landscape stability to the activation of exogenous processes in the “Medvezhye” study area

Оценочные факторы	Индекс	Оценка влияния в баллах			
		1 Слабое	2 Заметное	3 Ощутимое	4 Сильное
Льдистость отложений, дол. ед.	<i>I/W</i>	<b>Слабо-льдистые</b> ≤0,2 (пески, супеси)	<b>Умеренно-льдистые</b> 0,2–0,3	<b>Средне-льдистые</b> 0,3–0,4	<b>Сильно-льдистые</b> ≥0,4
Влажность, %		≤20 (пески)			
Температурный режим мерзлых пород, °С	<i>T</i>	≤-4 ≥1	-4...-2	-2...-1	-1...0,5
Литологический состав деятельного слоя	<i>C</i>	Пески, пески слоистые с илами	Супеси, легкие суглинки, торф до 0,2 м	Легкие суглинки, торф 0,2–1,5 м	Средние суглинки, торф ≥1,5 м
Снижение защитных свойств почвенно-растительного покрова при механических нарушениях, (название и характер покрова)	<i>P</i>	<b>Минимальное</b> (разреженный травяно-кустарниковый покров, отсутствие покрова)	<b>Среднее</b> (мохово-лишайниковый, мохово-кустарниковый, тундровый, рединный)	<b>Сильное</b> (ерниково-кустарниковый, редколесья, торф 0,2–0,5 м)	<b>Максимальное</b> (кустарничково- и осоко-моховый, торф ≥0,5 м)
Скорость самовосстановления растительности после нарушений, лет	<i>V</i>	<b>Быстрое</b> 2–4	<b>Среднее</b> 4–8	<b>Медленное</b> 8–12	<b>Длительное или неполное</b> 12 и более

Табл. 3. Градации факторов, влияющих на снижение устойчивости ландшафтов к проявлению экзогенных процессов на участке «Тазовский»  
 Table 3. The influence of factors on the reduction of landscape stability to the activation of exogenous processes in the "Tazovskiy" study area

Оценочные факторы	Весовые коэффициенты (K <sub>I,T,L,P,V</sub> )	Индекс	Оценка влияния в баллах			
			1 Слабое	2 Заметное	3 Ощутимое	4 Сильное
Объемная льдистость отложений, дол. ед.	0,3	<i>I</i>	Слабольшдистые ≤0,2	Умеренно-льдистые 0,2–0,3	Средне-льдистые 0,3–0,4	Сильно-льдистые ≥0,4
Температурный режим мерзлых пород, °С	0,2	<i>T</i>	≤–3 ≥1	–3...–2	–2...–1	–1...0,5
Литологический состав пород	0,15	<i>L</i>	Пески, супеси, в т. ч. слоистые с илами	Переслаивание песков, супесей, суглинков	Оторфованные пески, суглинки	Торф, суглинки
Снижение защитных свойств почвенно-растительного покрова при механических нарушениях, (название и характер покрова)	0,25	<i>P</i>	Минимальное (разреженный травянистый, кустарничковый)	Среднее (мохово-кустарничковый-лишайниковый, тундровый, рединый)	Сильное (лиственничные редколесья, кустарники, торф 0,2–0,5 м)	Максимальное (мохово-торфяной, торф 0,5–1,5 м)
Скорость самовосстановления растительности после нарушений: лет/проективное покрытие на 10 лет, в %	0,1	<i>V</i>	Быстрое 1–3/75–100	Среднее 4–7/50–75	Медленное 8–12/25–50	Длительное или неполное >12/0–25

На участке «Ямбург» в число оценочных факторов вошли: среднегодовая температура грунтов ( $T$ ); льдосодержание ( $I$ ); глубина сезонного протаивания ( $S$ ); протекторные свойства растительности ( $P$ ) и скорость ее самовосстановления ( $V$ ). Чтобы подчеркнуть различия в наборе и характере проявления экзогенных процессов в двух физико-географических провинциях, в число факторов вошли еще два параметра: степень расчленения (характер дренажа,  $D$ ) и размываемость почвогрунтов ( $L$ ). В этом случае уравнение имеет вид (3):

$$КМУ = - 0,042 \times T + 0,084 \times I + 0,085 \times P + 0,236 \times V + 0,179 \times L + 0,019 \times D - 0,608 \quad (3).$$

В ходе работ по оценочному картографированию в более мелких масштабах (от 1:200 000 до 1:500 000) по тестовому объекту «Газовский» расчет КМУ проводился более простым способом, с выведением среднего арифметического. С целью учета вклада каждого фактора в итоговой оценке им присваивались квалиметрические (весовые) коэффициенты, методика назначения которых обосновывается в работах по геоморфологической безопасности [Болысов и др., 2015], и отчасти в мерзлотно-ландшафтных работах на Аляске [Jorgenson et al., 2025].

Для определения количественных значений весовых коэффициентов каждого из пяти факторов был проведен анализ ранее составленных уравнений множественной регрессии с соответствующими коэффициентами корреляции при ведущих факторах на участках-аналогах. Также проводился опрос шести экспертов в области геоэкологии криолитозоны, хорошо знающих район исследования, в результате которого были скорректированы и определены весовые коэффициенты (табл. 3). Льдистости был присвоен коэффициент 0,3, снижению защитных свойств напочвенного и торфяного покровов — 0,25, среднегодовой температуре пород — 0,2, литологическому составу пород — 0,15, самовосстановлению растительности после нарушений — 0,1.

Для полигона «Газовский» оценка устойчивости к активизации негативных процессов проводилась по пяти традиционным факторам (табл. 3): объемная льдистость отложений, среднегодовая температура пород и литологический состав пород, определяющие интенсивность оттаивания пород и развития криогенных процессов; снижение защитных свойств напочвенного и торфяного покровов, которые определяют теплоизоляционные свойства, самовосстановление растительности после нарушений и проективное покрытие на десятый год, которые определяют насколько быстро ландшафт вернется в фоновое состояние (4). Отметим, что литологический состав отложений коррелирует с фактором изменения глубины сезонного оттаивания-промерзания, а защитные свойства напочвенного покрова — со снегозадерживающей способностью растительных сообществ.

$$КМУ = (A_I \times k_I + A_P \times k_P + A_T \times k_T + A_L \times k_L + A_V \times k_V) / N \quad (4),$$

где  $N$  — число значимых факторов,  
 $A$  — баллы по каждому фактору ( $I, P, T, L, V$  из табл. 3),  
 $k$  — весовые коэффициенты для каждого из  $N$  факторов.

Табл. 3 показывает, что каждый фактор оценивался по 4-м баллам: 1 балл присваивался в случае слабого влияния, 4 балла — сильное влияние фактора на активизацию опасных экзогенных процессов. Далее экспертным путем каждому фактору были определены весовые коэффициенты от 0 до 1 для учета их значимости в интегральной оценке. Для этого использовались материалы по районам-аналогам — Уренгойскому и Медвежьему месторождениям [Marinskikh et al., 2017]. По каждому ландшафтному выделу были набраны

характеристики и рассчитан интегральный индекс устойчивости для проведения ранжирования по четырем градациям мерзлотной устойчивости: от устойчивых ( $KМУ \leq 0,4$ ) с наиболее низкой вероятностью возникновения опасных процессов до неустойчивых ( $KМУ \geq 0,63$ ) с максимальной вероятностью возникновения техногенных процессов при нарушениях механического характера.

Установлено, что наибольшее влияние на потенциальную активизацию процессов оказывают:

- сильнольдистые ( $>0,4$ ) подстилающие породы — торф и оторфованные суглинки;
- высокотемпературные ( $-1,0^{\circ} \dots 0,5^{\circ}C$ ) мерзлые породы;
- максимальные теплоизоляционные свойства торфяно-моховых покровов;
- длительное или неполное самовосстановление растительного покрова.

Таким образом, на конкретных примерах показана методика составления базовых инвентаризационных ландшафтно-типологических карт и матричных легенд, спектр оценочных факторов в зависимости от мерзлотно-ландшафтной специфики и масштаба картографирования, а также различные способы сопоставления этих факторов с целью расчета интегральных индексов для типизации ландшафтов по степени уязвимости к освоению.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После выбора природных факторов, влияющих на потенциальную устойчивость ландшафтов к активизации рельефообразующих процессов, и расчета КМУ по соответствующим формулам (1–4), для каждого участка проводилось ранжирование природных комплексов по значениям КМУ по трем-четырем группам (табл. 4–5). Для участка «Гыдан» ранжирование было сделано по трем градациям: устойчивые, слабоустойчивые, неустойчивые (табл. 4). Для участка «Тазовский» — по четырем: устойчивые, слабоустойчивые, относительно устойчивые, неустойчивые (табл. 5). Результаты оценки представляются в виде карт (рис. 3–4).

Анализ карты показал, что на *участке «Гыдан»* (табл. 4, рис. 3) группа неустойчивых геокомплексов занимает 33 % площади. Это крутые склоны южной экспозиции и долины оврагов, сложенные сильнольдистыми пылеватыми песками, мезорельеф которых благоприятствует усиленному снегонакоплению. Из опасных криогенных процессов распространены овражная термоэрозия, криогенные оползни-сплывы, солифлюкция. Литокриогенная устойчивость ландшафтов района снижается в направлении от пойменных заболоченных ПТК к заовраженным дренированным сильнольдистым склонам междуречий.

На *участке «Медвежье»* неустойчивые природные комплексы отмечаются на заторфованных ландшафтах, сложенных сильнольдистыми высокотемпературными суглинками. Здесь активизируются такие опасные процессы, как глубокий термокарст, заболачивание и площадное пучение.

В целом, выявлена общая закономерность снижения устойчивости к активизации опасных экзогенных процессов на севере Западной Сибири. В арктической тундре устойчивость снижается от пойменных заболоченных природных комплексов к заовраженным сильнольдистым склонам междуречий, в южной тундре — от пойменных лесов и пляжей к мощным плоскобугристым торфяникам и антропогенно-нарушенным заболоченным понижениям.

Около половины территории участков «Ямбург» и «Харвута» занято группой неустойчивых ландшафтов с преобладанием торфяников и крупных бугров пучения. В случае антропогенных нарушений поверхности этих природных комплексов активизируется термокарст, заболачивание, термоэрозия по трещинам полигонов. Наиболее опасно нарушение Пойловояхинской заболоченной провинции по причине высокой льдистости отложений и теплоизолирующего надпочвенного покрова.

Табл. 4. Фрагмент таблицы ранжирования ПТК участка «Гыдан» по степени устойчивости. Индекс ландшафта берется из матричной легенды к ландшафтной карте (рис. 2), ЭГП — экзогенные геологические процессы. Цветом показаны группы КМУ: зеленый — устойчивые, желтый — слабо устойчивые, красный — неустойчивые

Table 4. Ranking of natural-territorial complexes of the “Gydan” study area according to the degree of landscape stability (Fig. 2). The color shows the groups of KMU: green — stable, yellow — weakly stable, red — unstable

Индекс ПТК	ПТК	Оценочные факторы							КМУ	ЭГП
		<i>I</i>	<i>T</i>	<i>L</i>	<i>S</i>	<i>K</i>	<i>P</i>	<i>V</i>		
E3/19	Низкие поймы, прирусловые отмели и пляжи, занятые разнотравно-осоковыми лугами, тампами	1	2	2	2	3	3	1	0,2	Русловая эрозия Заболачивание Торфонакопление
A1/2 B1/2	Холмисто-увалистые дренированные междуречья, занятые полигональными кустарничково-лишайниковыми тундрами на пылеватых песках	1	1	4	3	1	2	3	0,43	Морозобойное растрескивание Дефляция Термоэрозия по трещинам
C1/15	Лайда, занятая осоково-пушицевыми и травяно-гипновыми болотами на торфах, подстилаемых песками, супесями и илами	3	3	2	1	2	4	1	0,55	Заболачивание Термокарст Локальное пучение
E1/1	Надпойменные террасы, занятые травяно-лишайниковыми тундровыми сообществами, на песках и оторфованных супесях	3	2	2	3	1	2	3	0,57	Локальный термокарст Пучение Морозобойное растрескивание
A3/3	Крутые дренированные склоны, сложенные пылеватыми песками, под пятнистыми травяно-лишайниковыми тундрами с дефляционными раздувами	2	2	4	3	3	2	4	0,91	Резкая активизация термоэрозии Оползание Дефляция
D1/14	Глубоко врезанные заболоченные овраги, балки, и склоны, занятые травяно-кустарничково-кустарниковыми сообществами	4	2	4	3	4	4	2	1,00	Активная овражная термоэрозия Оползни Пучение по днищам долин

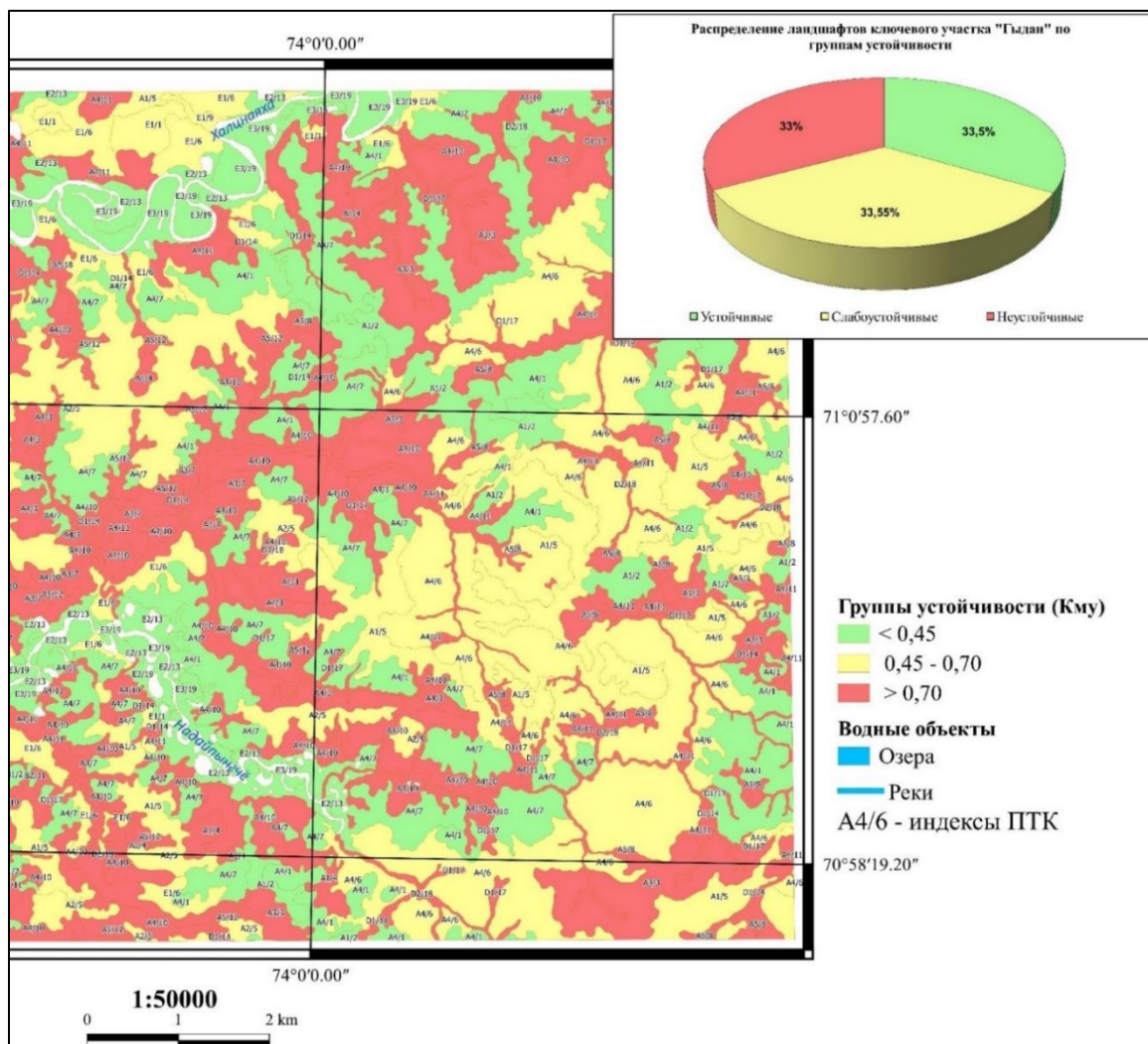


Рис. 3. Мерзлотная устойчивость ландшафтов участка «Гыдан» (фрагмент карты, автор А. А. Донецков)

Fig. 3. Permafrost stability of landscapes of the "Gydan" study area (fragment of map, author of the map A. A. Donetskoy)

Хозяйственное освоение эрозионно-расчлененной дренированной Западно-Тазовской провинции с преобладанием тундровых ландшафтов на пылеватых песках представляет меньший риск, хотя нарушение даже этих природных комплексов приведет к активизации термоэрозии и дефляции. Наиболее устойчивы к механическим нарушениям геоконплексы низинных травяно-сфагновых болот и заболоченные ложбины стока [Tumel, Zotova, 2019].

На рис. 4 показана итоговая оценка степени устойчивости ландшафтов на *участке «Тазовский»* после проведения ранжирования ПТК (табл. 5). Анализ карты (рис. 4) показал, что более 38 % северной части Пур-Тазовского междуречья занято мерзлотно-неустойчивыми ландшафтами, которые имеют тенденцию к активизации опасных экзогенных процессов (термокарста, пучения, термоэрозии), а также заболачивания при техногенных нарушениях механического характера. Эти ландшафты в основном представлены торфяниками, комплексами слабодренированных тундр и плоскобугристых болот и вторичной растительностью на месте пирогенных тундр и лесов.

Табл. 5. Фрагмент таблицы ранжирования ландшафтов участка «Тазовский» по степени устойчивости.

Индекс ландшафта берется из матричной легенды к ландшафтной карте (рис. 2), ЭГП — экзогенные геологические процессы. Цветом показаны группы КМУ: зеленый — устойчивые, оранжевый — относительно устойчивые, желтый — слабо устойчивые, красный — неустойчивые

Table 5. Ranking of natural-territorial complexes of the “Tazovskiy” study area according to the degree of landscape stability (Fig. 2).

The color shows the groups of KМУ: green — stable, orange — relatively stable, yellow — weakly stable, red — unstable

Индекс ПТК	ПТК	Оценочные факторы					КМУ	ЭГП	Пояснения
		T	I	L	P	V			
Б2/13 Д1/13	Болота плоскобугристые комплексные неравномерно дренированных полого волнистых, слабоволнистых и плоских междуречий	2	4	4	4	2	0,68	Термокарст Многолетнее пучение Заболачивание Полигональное растрескивание	Высокая льдистость Максимальные теплоизоляционные свойства Медленная скорость восстановления
Б1/11 Б2/11	Вторичные березовые леса и ерниковые тундры на месте пироженных лиственничных лесов на слабодренированных участках пологоволнистых, слабоволнистых и плоских междуречий	4	2	2	3	2	0,53	Пучение Термоэрозия Полигональное растрескивание Новообразование многолетнемерзлых пород	Средняя льдистость Высокие температуры Средняя скорость восстановления
Б1/1 Б2/1	Леса лиственничные с ягелем на относительно дренированных пологоволнистых, слабоволнистых и плоских водоразделах	4	2	1	2	2	0,42	Эрозия Локальная термоэрозия Дефляция Солифлюкция	Низкая льдистость Песчаные отложения Высокие температуры
Д2/17	Лугово-кустарниково-редколесные сообщества на поймах крупных рек	3	1	3	1	2	0,36	Локальное пучение Заболачивание Дефляция	Слабые протекторные свойства Высокая скорость самовосстановления

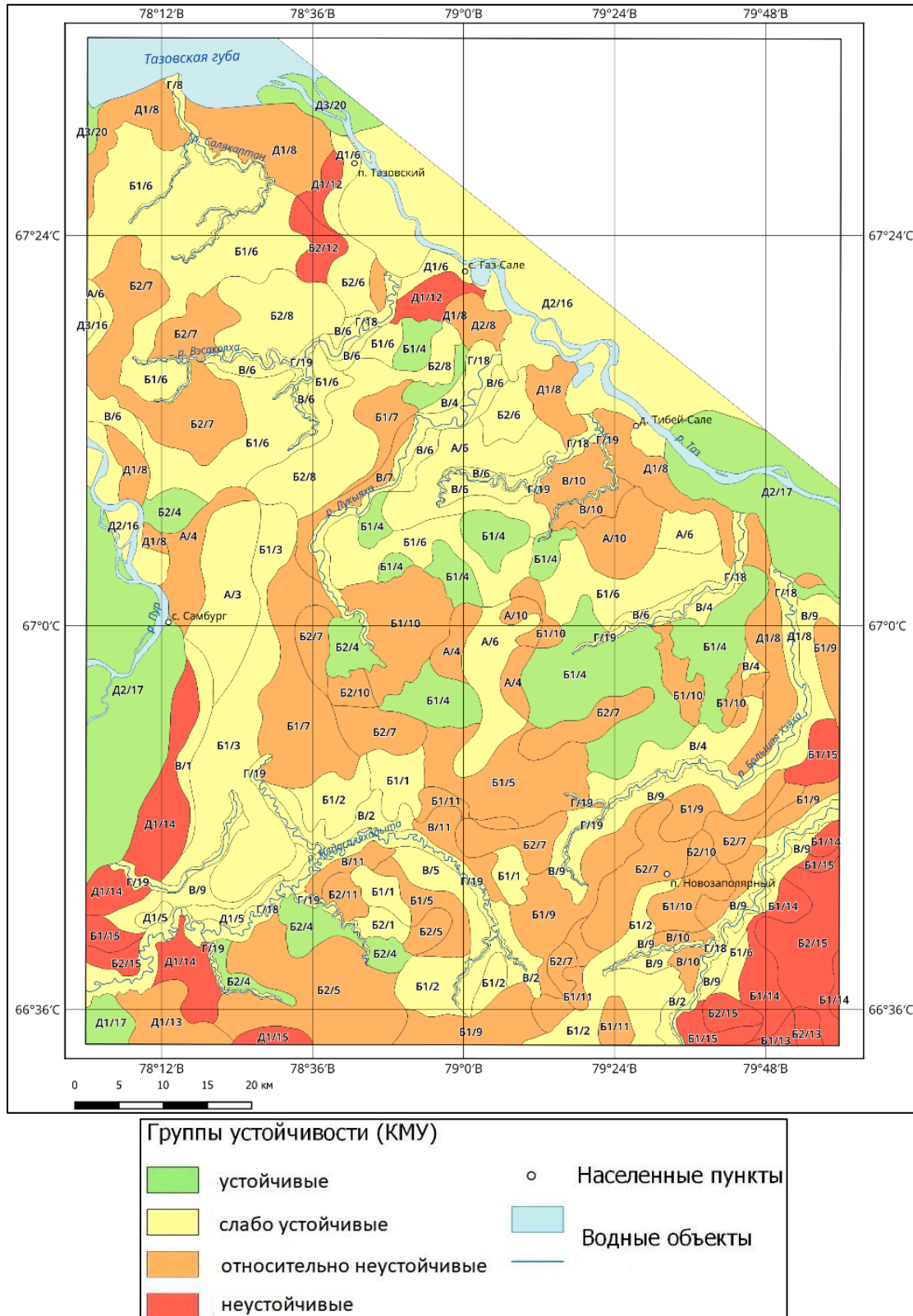


Рис. 4. Мерзлотная устойчивость ландшафтов участка «Тазовский»  
(автор С. В. Мариняк)

Fig. 4. Permafrost stability of landscapes of the “Tazovskiy” study area  
(author of the map S. V. Marinyak)

На локальном уровне исследований в м-бах картографирования 1:25 000–1:50 000 спектр оценочных факторов литокриогенной устойчивости, как правило, всегда шире, чем при картографировании в м-бах 1:200 000–1:500 000. Это льдистость и температура мерзлых пород, глубина сезонного протаивания или промерзания, расчлененность рельефа, теплоизолирующие свойства растительности и скорость ее самовосстановления, биоклиматические показатели и пр.

## **ВЫВОДЫ**

Апробированы методические приемы составления разномасштабных мерзлотно-экологических карт при антропогенном нарушении поверхности с точки зрения устойчивости северных геосистем к проявлению опасных рельефообразующих процессов. Метод основан на анализе влияния ведущих природных факторов, таких как температура и льдистость мерзлых пород, изменение глубин сезонного протаивания, теплоизоляционные свойства растительного покрова и скорость ее самовосстановления и т. д. на устойчивость криогенных ландшафтов. Ранг каждого фактора оценивается экспертным баллом в соответствии с их влиянием на снижение устойчивости ландшафтов с точки зрения способности противостоять техногенной активизации процессов. Все легенды к картам, включая базовую ландшафтную, предложено составлять в графическом (матричном) виде, что обеспечивает структурирование информации, облегчает ее ГИС-интерпретацию и наглядность. Карты, построенные на ландшафтной основе, имеют универсальное значение, позволяя проанализировать и обобщить информацию о ландшафтах криолитозоны [Тумель, Королева, 2008]. Их содержание, выбранные показатели, классификации, градации величин разработаны с учетом возможности их дальнейшего использования для геоэкологических оценок, а также для принятия управленческих решений. Кроме того, они используются в учебном процессе кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета МГУ в качестве наглядных пособий [Зотова, Викулина, 2024].

Сравнительная многофакторная оценка литокриогенной устойчивости геосистем к активизации опасных рельефообразующих процессов на севере Западно-Сибирской нефтегазонасной провинции позволила сделать следующие региональные выводы:

1. Обзор методических принципов составления мерзлотно-экологических карт разных масштабов показал, что из всех рассмотренных факторов, влияющих на устойчивость северных геосистем, универсальными являются, в первую очередь, льдосохранение пород и протекторные свойства напочвенного растительного покрова.
2. Наиболее значимыми факторами на севере Гыданского п-ова (Салмановское месторождение) и в Приобской части Тазовского п-ова (Ямбургское и Харвутинское месторождения) являются льдистость и характер размываемости дисперсных мерзлых пород, изменение которых приведет к активизации термоэрозии. На юге Тазовского п-ова (Медвежье месторождение) и Надым-Пуровском междуречье (Западно-Заполярье месторождение и др.) значимыми факторами являются теплоизоляционные свойства торфяно-моховых покровов, при сведении которых резко активизируется термокарст.

Научно-методические подходы рассмотренной оценки и картографирования мерзлотно-экологического состояния находят применение в инженерном мерзлотоведении, на предпроектных стадиях изысканий, в природоохранных организациях для выработки грамотной стратегии освоения криолитозоны.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Статья подготовлена в рамках госбюджетной программы географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова «Эволюция криосферы при изменении климата и

антропогенном воздействии» № 121051100164-0. Авторы выражают благодарность А. А. Донецкову, Т. А. Коробовой, С. В. Мариняк за помощь в расчетах и составлении карт.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The research was funded by the Program of Lomonosov Moscow State University “Evolution of the Cryosphere under Climate Change and Anthropogenic Impact” No. 12105110 0164-0. The authors express their gratitude to A. A. Donetskov, T. A. Korobova, S. V. Marinyak for their assistance in the work.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Болысов С. И., Бредихин А. В., Борсук О. А., Еременко Е. А., Зайцев Г. А., Лукашов А. А., Неходцев В. А., Панин А. В., Рычагов Г. И., Сафьянов Г. А., Симонова Т. Ю., Харченко С. В.* Экологическая геоморфология: новые направления. М.: МГУ, Географический факультет, 2015. 220 с.

*Высоцкая А. А., Медведков А. А.* Климатогенные изменения ландшафтов курумов на западе Среднесибирского плоскогорья в зональных условиях средней тайги. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 2024. № 4. С. 17–29. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2.

*Дзагоева Е. А.* Соотношение понятий «ландшафт» и «геосистема» в географическом пространстве и времени. Вестник Томского государственного университета, 2012. № 357. С. 182–185.

*Зотова Л. И., Викулина М. А.* Научно-методические аспекты преподавания учебных курсов по геоэкологическим проблемам равнинных и горных территорий в криолитозоне. Географическая среда и живые системы, 2024. № 3. С. 123–148. DOI: 10.18384/2712-7621-2024-3-123-148.

*Исаченко А. Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 336 с.

*Медведков А. А.* Геоэкологические факторы жизнестойкости арктических городов в криолитозоне: теоретические подходы к изучению. Известия РАН. Серия географическая, 2021. № 85(5). С. 726–739. DOI: 10.31857/S2587556621050071.

*Москаленко Н. Г.* Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России. Новосибирск: Наука, 1999. 280 с.

*Москаленко Н. Г.* Изменения растительности севера Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенных нарушений. Известия Русского географического общества, 2012. №1(144). С. 63–72.

*Московченко Д. В., Губарьков А. А.* Температурные режимы почв на южной границе зоны мерзлых болот в Западной Сибири. Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева, 2023. Вып. 117. С. 23–51. DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-23-51.

*Николаев В. А.* Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов. М.: Издательство Московского университета, 1978. 62 с.

*Тумель Н. В.* Активизация опасных криогенных процессов. География, общество, окружающая среда. Т. 1. М.: Городец, 2004. С. 344–357.

*Тумель Н. В., Зотова Л. И.* Геоэкология криолитозоны. М.: Юрайт, 2023. 204 с.

*Тумель Н. В., Королева Н. А.* Мерзлотно-ландшафтная дифференциация криолитозоны России как основа эколого-геологических исследований. Инженерная геология, 2008. № 2. С. 11–14.

*Чигир В. Г., Ланчаков Г. А., Кульков А. Н.* Геоэкологические условия севера Западно-Сибирской равнины и проблемы устойчивости криогеосистемы к техногенезу. Проблемы общей и прикладной геоэкологии Севера. М.: Издательство Московского университета, 2001. С. 222–236.

*Шполянская Н. А., Зотова Л. И.* Карта потенциальной устойчивости ландшафтов криолитозоны Западной Сибири. Вестник Московского университета. Серия 5. География, 1994. № 1. С. 56–65.

*Шполянская Н. А., Осадчая Г. Г., Малкова Г. В.* Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России). Географическая среда и живые системы, 2022. № 1. С. 6–30. DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30.

*Fedorov A. N.* Permafrost Landscapes: Classification and Mapping. *Geosciences*, 2019. V. 9. No. 468. P. 1–3. DOI: 10.3390/geosciences9110468.

*Jorgenson M. T., Douglas T. A., Shur Y. L., Kanevskiy M. Z.* Mapping the Vulnerability of Boreal Permafrost in Central Alaska in Relation to Thaw Rate, Ground Ice, and Thermokarst Development. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2025. V. 130. Iss. 6. DOI: 10.1029/2024 JF008030.

*Jorgenson M. T., Kanevskiy M. Z., Jorgenson J. C., Liljedahl A., Shur Y., Epstein H., Kent K., Griffin C. G., Daanen R., Boldenow M., Orndahl K., Witharana S., Jones B. M.* Rapid Transformation of Tundra Ecosystems from Ice-Wedge Degradation. *Global and Planetary Change*, 2022. V. 216. Art. 103921. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2022.103921.

*Kizyakov A., Leibman M.* Cryogenic Relief Formation Processes: A Review of 2010–2015 Publications. *Earth's Cryosphere*, 2016. V. XX. No. 4. P. 40–52. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(45-58).

*Marinskikh D., Marshinin A., Idrisov I.* Large-scale Landscape Mapping for Environmental Risk Assessment in the Arctic of Western Siberia (Russia). *GI\_Forum*, 2017. V. 1. P. 3–14. DOI: 10.1553/giscience2017\_01\_s3.

*Medvedkov A. A.* Response of Middle-Taiga Permafrost Landscapes of Central Siberia to Global Warming in the Late 20th and Early 21st Centuries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016. V. 48. Art. e012009. DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012009.

*Tumel N. V., Zotova L. I.* Diagnostics and Mapping of Geoecological Situations in the Permafrost Zone of Russia. *Geosciences*, 2019. V. 9. Iss. 8. Art. 353. P. 1–31. DOI: 10.3390/geosciences9080353.

## REFERENCES

*Bolysov S. I., Bredikhin A. V., Borsuk O. A., Eremenko E. A., Zaitsev G. A., Lukashov A. A., Nekhodtsev V. A., Panin A. V., Rychagov G. I., Safyanov G. A., Simonova T. Yu., Kharchenko S. V.* Ecological Geomorphology: New Directions. Moscow: Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2015. 220 p. (in Russian).

*Chigir V. G., Lanchakov G. A., Kulkov A. N.* Geoecological Conditions of the North of the West Siberian Plain and Problems of Stability of the Cryogeosystem to Technogenesis. *Problems of General and Applied Geoecology of the North*. Moscow: Moscow University Press, 2001. P. 222–236 (in Russian).

*Dzagoeva E. A.* The Relationship between the Concepts of “Landscape” and “Geosystem” in Geographical Space and Time. *Tomsk State University Journal*, 2012. No. 357. P. 182–185 (in Russian).

*Fedorov A. N.* Permafrost Landscapes: Classification and Mapping. *Geosciences*, 2019. V. 9. No. 468. P. 1–3. DOI: 10.3390/geosciences9110468.

*Isachenko A. G.* Landscape Science and Physical-Geographical Zoning. Moscow: Vysshaya Shkola (Higher School), 1991. 336 p. (in Russian).

*Jorgenson M. T., Douglas T. A., Shur Y. L., Kanevskiy M. Z.* Mapping the Vulnerability of Boreal Permafrost in Central Alaska in Relation to Thaw Rate, Ground Ice, and Thermokarst Development. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2025. V. 130. Iss. 6. DOI: 10.1029/2024JF008030.

*Jorgenson M. T., Kanevskiy M. Z., Jorgenson J. C., Liljedahl A., Shur Y., Epstein H., Kent K., Griffin C. G., Daanen R., Boldenow M., Orndahl K., Witharana S., Jones B. M.* Rapid Transformation of Tundra Ecosystems from Ice-Wedge Degradation. *Global and Planetary Change*, 2022. V. 216. Art. 103921. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2022.103921.

*Kizyakov A., Leibman M.* Cryogenic Relief Formation Processes: A Review of 2010–2015 Publications. *Earth's Cryosphere*, 2016. V. XX. No. 4. P. 40–52. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(45-58).

*Marinskikh D., Marshinin A., Idrisov I.* Large-scale Landscape Mapping for Environmental Risk Assessment in the Arctic of Western Siberia (Russia). *GI\_Forum*, 2017. V. 1. P. 3–14. DOI: 10.1553/giscience2017\_01\_s3.

*Medvedkov A. A.* Response of Middle-Taiga Permafrost Landscapes of Central Siberia to Global Warming in the Late 20th and Early 21st Centuries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016. V. 48. Art. e012009. DOI: 10.1088/1755-1315/48/1/012009.

*Medvedkov A. A.* Geoenvironmental Factors of Resilience of Arctic Cities in the Cryolithozone: Theoretical Approaches to the Study. *Izvestia RAN. Seriya Geograficheskaya (News of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series)*, 2021. No. 85(5). P. 726–739 (in Russian). DOI: 10.31857/S2587556621050071.

*Moskalenko N. G.* Anthropogenic Dynamics of Vegetation of the Plains of the Cryolithozone of Russia. Novosibirsk: Nauka, 1999. 280 p. (in Russian).

*Moskalenko N. G.* Changes in Vegetation of the North of Western Siberia in the Context of Changing Climate and Technogenic Disturbances. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva (Proceedings of the Russian Geographical Society)*, 2012. No. 1(144). P. 63–72 (in Russian).

*Moskovchenko D. V., Gubarkov A. A.* Soil Temperature Regimes on the Southern Border of the Zone of Frozen Bogs in Western Siberia. *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2023. Iss. 117. P. 23–51 (in Russian). DOI: 10.19047/0136-1694-2023-117-23-51.

*Nikolaev V. A.* Classification and Small-Scale Mapping of Landscapes. Moscow: Moscow University Press, 1978. 62 p. (in Russian).

*Shpolyanskaya N. A., Osadchaya G. G., Malkova G. V.* Modern Climate Change and the Reaction of the Cryolithozone (On the Example of Western Siberia and the European North of Russia). *Geographical Environment and Living Systems*, 2022. No. 1. P. 6–30 (in Russian). DOI: 10.18384/2712-7621-2022-1-6-30.

*Shpolyanskaya N. A., Zotova L. I.* Map of Potential Stability of Landscapes of the Cryolithozone of Western Siberia. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*, 1994. No. 1. P. 56–65 (in Russian).

*Tumel N. V.* Activation of Dangerous Cryogenic Processes. *Geography, Society, Environment*. V. 1. Moscow: Gorodets, 2004. P. 344–357 (in Russian).

*Tumel N. V., Koroleva N. A.* Permafrost-Landscape Differentiation of the Cryolithozone of Russia as a Basis for Ecological-Geological Research. *Engineering Geology World*, 2008. No. 2. P. 11–14 (in Russian).

*Tumel N. V., Zotova L. I.* Diagnostics and Mapping of Geocological Situations in the Permafrost Zone of Russia. *Geosciences*, 2019. V. 9. Iss. 8. Art. 353. P. 1–31. DOI: 10.3390/geosciences9080353.

*Tumel N. V., Zotova L. I.* *Geocology of the Permafrost Zone*. Moscow: Urait, 2023. 204 p. (in Russian).

*Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A.* Climate-Driven Changes of Kurum Landscapes in the West of the Central Siberian Plateau within the Middle Taiga Zone. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*, 2024. No. 4. P. 7–29 (in Russian). DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2.

*Zotova L. I., Vikulina M. A.* Scientific and Methodological Aspects of Teaching Courses on Geocological Problems of Flat and Mountainous Territories in the Cryolithozone. *Geographical Environment and Living Systems*, 2024. No. 3. P. 123–148 (in Russian). DOI: 10.18384/2712-7621-2024-3-123-148.

---