УДК 551.343: 911.52

DOI: 10.18384/2310-7189-2018-1-18-28

ИНДИКАЦИЯ СОСТОЯНИЯ МЕРЗЛОТНО-ТАЁЖНЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ЮЖНОЙ ПЕРИФЕРИИ КРИОЛИТОЗОНЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

Медведков А.А.*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Российская Федерация*

Аннотация. Рассмотрены особенности индикации мерзлотно-таёжных ландшафтов на южной периферии криолитозоны, с использованием методов полевых и дистанционных исследований. Особое внимание уделено визуально выразительным индикаторам мерзлотно-таёжных геосистем в экотонной части криолитозоны и признакам, характеризующим их изменение. Показано, что данные природные комплексы отличаются наибольшей уязвимостью к любым внешним воздействиям и являются важнейшими индикаторами современных изменений климата. Рассмотрены особенности выявления мерзлотно-таёжных ландшафтов в островной криолитозоне по результатам обработки тепловых инфракрасных снимков съёмочных систем Landsat TM и Terra ASTER.

Ключевые слова: мерзлотно-таёжные ландшафты, периферия криолитозоны, изменения климата, ландшафтная индикация, тепловые инфракрасные снимки

INDICATION OF THE STATE OF TAIGA PERMFROST LANDSCAPES ON THE SOUTHERN PERIPHERY OF CRYOLITHOZONE UNDER CONDIT TIONS OF A CHANGING CLIMATE

A. Medvedkov*M.V. Lomonosov Moscow State University
Leninskie gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation*

Abstract. The features of indication of taiga permafrost landscapes on the southern periphery of the cryolithozone with the use of field and remote research methods are considered. Special attention is paid to visually expressive indicators of taiga permafrost geosystems in the ecotonic part of the cryolithozone and the signs characterizing their change. It is shown that these natural complexes are the most vulnerable to any external influences and are the most important indicators of modern climate changes. The peculiarities of identification of taiga permafrost landscapes in the island permafrost zone according to the results of processing of the thermal images of Landsat TM and Terra ASTER infrared imaging systems are considered.

Key words: taiga permafrost landscapes, climate change, permafrost ecotone, landscape indication, thermal-infrared survey.

Изучение последствий изменения климата – одна из важнейших задач современной науки. Природные объекты (скульптурные формы рельефа, ландшафтные урочища и др.) наиболее чутко реагирующие на внешние изменения располагаются на южной периферии криолитозоны, в подзонах островной и прерывистой «вечной» мерзлоты. Периферия криолитозоны или мерзлотный экотон – это территория с повышенной мозаичностью ландшафтов и спорадическим распространением высокотемпературных мерзлых грунтов. Здесь система «вечная» мерзлота – ландшафт претерпевает особенно быстрые изменения. Ландшафты, формирующиеся на близко залегающих к дневной поверхности многолетнемерзлых породах, именуется нами мерзлотными¹. В пределах мерзлотного экотона такие природные комплексы отличаются наибольшей визуальной выразительностью и являются важнейшими индикаторами современных природно-климатических изменений.

Мерзлотные ландшафты изучены в пределах малоосвоенного региона бореальной криолитозоны, на территории Центральной Сибири. Из-

учаемый регион располагается на границе двух физико-географических стран – Западной и Средней Сибири. Указанная особенность позволяет проводить ландшафтно-индикационные исследования в самых контрастных литолого-геоморфологических и геокриологических условиях. Ранее изучение ландшафтов рассматриваемого региона проводилось для уточнения результатов геологического картографирования [1]. Цель нашего исследования – индикация мерзлотных урочищ на южной периферии криолитозоны и фиксирование в их пределах визуальных признаков, свидетельствующих об изменении ландшафтно-геокриологических условий. При проведении мерзлотных исследований метод ландшафтной индикации считается одним из основных [9; 10; 11]. В условиях отсутствия геокриологических стационаров в рассматриваемом регионе, выявленные ландшафтные индикаторы представляют для мониторинговых исследований особую ценность.

Индикация мерзлотно-таёжных ландшафтов по результатам полевой съёмки

Криогенные ландшафты в целом весьма уязвимы к потеплению климата, хотя и в разной степени. Поэтому важна их индикация на основе анализа внутриландшафтных связей, а далее – ранжирование по устойчивости к воздействию температурного сигнала в форме потепления климата.

Главный фактор наличия многолетней мерзлоты на юге бореальной криолитозоны – состав поверхностных отложений. Поэтому граница плейсто-

¹ Мерзлотно-таёжные ландшафты – природные комплексы бореальной зоны разного иерархического уровня, ведущим формирующим фактором которых выступает криогенез, определяющий специфику почвообразования (криотурбация, оглеение, высокая влагонасыщенность, замедленная минерализация растительных остатков), экзодинамических процессов (солифлюкция, пучение, термокарст) и особую структуру растительного покрова (угнетенность, разреженность и низкий бонитет древостоя, широкое распространение пихты стланиковой формы, карликовой березы и голубики, типично преобладание сфагновых мхов).

ценовых ледниковых и озёрно-ледниковых отложений, преимущественно пелитового состава, выступает здесь в качестве важного ландшафтно-геокриологического рубежа. К северу от данного рубежа, в ледниковой плейстоценовой зоне, широкое развитие получили дисперсные грунты и приуроченная к ним «вечная» мерзлота. Южнее, в перигляциальной зоне плейстоцена, дисперсные грунты получили значительно меньшее развитие, а вслед за ними сократилась и площадь мерзлотных ландшафтов.

По итогам многолетних полевых исследований [3; 4; 6; 7; 12] были установлены важнейшие индикационные признаки криогенных ландшафтов экотонной зоны, которые классифицируются следующим образом:

1) тип поверхностных отложений: моренные глины, суглинки, озёрно-ледниковые и аллювиальные глины, алевроиты, глыбы курумов;

2) состояние поверхностных отложений: вязко-текучая консистенция дисперсных грунтов и обводнённые курумы;

3) формы мезорельефа: солифлюкционные наплывы или шлейфы подножья, обводнённые курумы, канавообразные русла ручьев и рек с признаками оползания;

4) формы микрорельефа: болотные кочки, солифлюкционные окна-разрывы, заполненные водой (фото 1), солифлюкционные валики, бугры пучения, термокарстовые понижения округлой и изометричной формы;

5) характер древесной растительности: разреженность и угнетённость древостоя, наклонное положение деревьев (фото 2), пихта стелющейся формы, букетный березняк;

6) состав живого напочвенного покрова: мохово-кустарничковая растительность с преобладанием сфагновых мхов, редины и ерники, кочкарники и кочкарные болота, обилие осоки дернистой, типична голубика (фото 2);

7) свойства почвы: оглеение, высокая влагонасыщенность, криотурбированные горизонты, значительная толщина торфа;

8) тип почвы: мерзлотные торфяные, аллювиальные болотно-глеевые, мерзлотные скелетные (курумозёмы) и др.;

9) условия увлажнения: повышенная обводнённость.

Таким образом, применение различных методов полевых исследований (литолого-геоморфологического, геокриологического, геоботанического, ландшафтного и др.) показало, что «вечная» мерзлота присутствует в тех ландшафтных урочищах, которым свойственны данные признаки.

Тогда как немерзлотные ландшафты выделяются по другим индикационным признакам, наиболее яркие из них: наличие полноценного прямостойного древостоя, близкое залегание скальных пород под маломощным чехлом поверхностных отложений, высокая степень дренированности территории и др.

Фото 1. Незаросшее солифлюкционное окно-разрыв, заполненное холодной водой. Его обводнённость в течение лета свидетельствует о стабильном положении многолетнемёрзлого водоупора.

Фото 2. Разреженный и угнетённый древостой с характерными формами его наклона и преобладанием в напочвенном покрове ерника, осоки дернистой и сфагновых мхов.

Дистанционная индикация мерзлотно-таёжных ландшафтов

Наряду с обнаружением мерзлотно-таёжных ландшафтов по их характерным особенностям в полевых условиях, нами также использован дистанционный метод их выявления на основе обработки тепловых инфракрасных снимков и составленных на их основе карт приповерхностной температуры (рис. 1). Относительно высокое пространственное разрешение полученных данных определяет более детальный анализ термических характеристик ландшафтов. После тематической предобработки данных дистанционного зондирования были

составлены карты приповерхностных температур. Полученные значения приповерхностной температуры отражают объём потока явного тепла, выбрасываемого ландшафтом [8]. Красный оттенок маркирует самые «тёплые» природные комплексы – мерзлотные, а интенсивность окраски отражает степень влияния многолетнемерзлых пород на лесорастительные условия. Такие данные оказались весьма выразительными по отношению к рассматриваемым мерзлотно-таёжным ландшафтам, и к их немерзлотным аналогам, что подтверждено в ходе полевых исследований на Севере Енисейского кряжа.

потока явного тепла и приземной температуры в зависимости от типа и состояния растительного покрова [5].

Чем больше поток явного тепла, тем меньше его количество в скрытой форме, т.е. в форме транспирации и физического испарения с растительного полога. Это характерно для мерзлотных ландшафтов бореальной криолитозоны. Данные геосистемы отличаются пониженными значениями фитомассы, слабой дренированностью и более высокими значениями приповерхностных температур. Природный комплекс с минимальным выбросом явного тепла имеет самый высокий потенциал влагообмена и более низкие значения приповерхностной температуры [7]. Такие ландшафты с максимальной интенсивностью участвуют в водно-энергетическом обмене и лидируют по воспроизводству фитомассы. В сибирской тайге данную роль выполняют немерзлотные ландшафты.

Таким образом, синтезированный анализ температур поверхности и данных полевых исследований позволил нам также и по показателям поверхностной температуры отличить мерзлотно-таёжные ландшафты от немерзлотных [8]. Первые характеризуются наименьшими запасами фитомассы и более высокими значениями приповерхностной температуры, а вторые выделяются по менее высоким термическим характеристикам, но отличаются наибольшими запасами фитомассы. Данный подход можно использовать в мониторинговых исследованиях, наблюдая за соотношением мерзлотных и немерзлотных ландшафтов, и изменением их термических характеристик в сходных погодных условиях.

Индикация изменения состояния мерзлотно-таёжных ландшафтов

Воздействие глобального потепления на консервативную часть мерзлотных ландшафтов, их морфолитогенную основу, проявляется в форме интенсификации солифлюкции и трансформации курумодесерпции [6; 12]. Развитие солифлюкции и курумодесерпции отражает наличие «вечной» мерзлоты [4]. В связи с этим, особое внимание уделялось наблюдениям за информативными, с точки зрения ландшафтно-геокриологического мониторинга природными объектами (солифлюкционными наплывами и курумами).

Курумы. В Центральной Сибири курумы территориально приурочены к правобережной части бассейна р. Енисей, они выработаны в траппах и скарнах. На основе повторных исследований в курумах лесного яруса отмечается активное отступление «вечной» мерзлоты. Индикаторами понижения её кровли могут служить следующие, визуально наблюдаемые явления:

- увеличение площади лишайникового покрова на глыбовой поверхности курумов¹;
- зарастание курумов мелколистственным лесом (фото 3);
- вытаивание гольцового льда в межглыбовом пространстве курумов;
- исчезновение подповерхностных холодных ручейков под глыбовым покровом курумов;
- увеличение на курумах количества глыб в неустойчивом положении.

¹ Увеличение мощности напочвенного покрова, состоящего из мхов, лишайников и кустарничков может способствовать формированию теплоизоляционной подушки и дальнейшей агградации льдистых пород (Медведков, 2014 [6]; Medvedkov, 2015 [12]).

Солифлюкционные наплывы. Солифлюкция – самый распространённый из экзодинамических процессов в криолитозоне, имеющий тенденцию к интенсификации в условиях заметного увеличения мощности деятельного слоя. Важнейшими литологическими условиями развития солифлюкции является широкое распространение алевритов, глин и суглинков в составе плейстоценовых отложений. Урочища, созданные солифлюкцией, как например солифлюкционные наплывы, относятся к числу наиболее динамичных на юге криолитозоны. Поэтому такие природные комплексы представляют особый интерес для изучения последствий меняющегося климата. К числу важнейших индикационных признаков, которые свидетельствуют о трансформации экзодинамических процессов, можно отнести следующие явления:

- наличие у наклонных деревьев вершин, имеющих вертикальное положение;
- случаи замещения солифлюкционных склонов на берегах рек локальными оползнями-сплывами (фото 4);
- зарастание в напочвенном покрове солифлюкционных окон-разрывов;
- увеличение числа искорей при аномально частом падении деревьев, имеющих корневую систему стелющегося типа.

Эти индикационные признаки свидетельствуют о широкой деградации «вечной» мерзлоты. Увеличение мощности деятельного слоя способствует разжижению отложений пелитового состава, которые в результате принимают вязкотекучую консистенцию. Данные индикаторы выявлены на основе повторных исследований, сопровождавшихся мониторингом сезонно-талого слоя.

Фото 3. Зарастающий мелколиственным лесом курум на левом берегу р. Подкаменная Тунгуска, в 2 км ниже устья р. Алексис.

Фото 4. Оползень-спływ на левобережье в нижнем течении р. Кулингна (Центрально-Сибирский биосферный заповедник).

По результатам ландшафтно-индикационных исследований был выявлен наиболее яркий индикатор стабильного положения льдистых пород. Обводнённые в течение всего тёплого периода солифлюкционные окна-разрывы выступают в этом качестве. Мерзлотные урочища, в пределах которых широко представлены солифлюкционные окна-разрывы, характеризуются отсутствием термокарстовых просадок.

Выводы

1. Результаты изучения природных комплексов мерзлотного экотона позволяют говорить о том, что не всюду «вечная» мерзлота и криогенные ландшафты столь чувствительные к наблюдаемым изменениям климата. Наиболее уязвимые мерзлотные ландшафты к потеплению климата расположены

в пределах ледниковых равнин с темнохвойной тайгой и курумов лесного яруса.

2. Методы индикации свидетельствуют, что главные отклики в системах экодинамики на потепление климата – это интенсификация солифлюкции вследствие заметного увеличения мощности деятельного слоя и замедление курумодесерпции вследствие вытаивания гольцового льда. Следы деградации многолетнемёрзлых пород нашли отражение в облике криогенных ландшафтов (увеличение искорей, зарастание курумов и их проседание, снижение обводнённости солифлюкционных разрывов и др.).

3. Понимание происходящих изменений чрезвычайно важно с точки зрения геоэкологического прогнозирования будущих изменений природной среды. Предлагаемые индикаторы,

свидетельствующие об изменениях, ных ландшафтов и в других частях могут быть использованы для изучения современного состояния мерзлот- криолитозоны.

Статья поступила в редакцию 19.03.2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов В.И., Герасимов Л.М., Ероменко В.Ю. и др. Комплекс дистанционных методов при геологическом картировании таежных районов (на примере Приенисейской Сибири). Л.: Недра, 1978. 247 с.
2. Будыко М.И. Климат и жизнь. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 472 с.
3. Горшков С.П., Карраш Х., Парамонов А.В. Геоморфологическая индикация мерзлотных и немерзлотных ландшафтов средней тайги Центральной Сибири // Геоморфология. 1998. № 4. С. 55–61.
4. Горшков С.П., Ванденберг Дж., Алексеев Б.А. и др. Климат, мерзлота и ландшафты Среднеенисейского региона: к 8-й Международной конференции по вечной мерзлоте. М.: Географический факультет МГУ, 2003. 90 с.
5. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание. М.: Наука, 2003. 246 с.
6. Медведков А.А. Геоэкологический отклик среднетаёжных ландшафтов Приенисейской Сибири на потепление климата конца XX–начала XXI века // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 6. С. 513–524.
7. Медведков А.А. Среднетаежные геосистемы Приенисейской Сибири в условиях меняющегося климата. М.: Макс-Пресс, 2016. 144 с.
8. Медведков А.А. Картографирование криогенных ландшафтов на основе анализа тепловых снимков // Материалы международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС». Ростов-на-Дону, Зальцбург (Австрия). 2016. Т. 22. № 1. С. 380–384.
9. Мельников Е.С., Вейсман Л.И., Москаленко Н.Г. и др. Ландшафты криолитозоны Западно-Сибирской газоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1983. 163 с.
10. Тумель Н.В., Зотова Л.И. Геоэкология криолитозоны: Учебное пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2014. 244 с.
11. Федоров А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования. Якутск, 1991. 140 с.
12. Medvedkov A.A. Geoenvironmental response of the Yenisei Siberia mid-taiga landscapes to global warming during late XX–early XXI centuries // Water Resources. 2015. Vol. 42. Iss. 7. pp. 922–931.

REFERENCES

1. Astakhov V.I., Gerasimov L.M., Eromenko V.Yu, et al. *Kompleks distantsionnykh metodov pri geologicheskoy kartirovaniy taizhnykh raionov (na primere Prieniseiskoi Sibiri)* [The complex of remote sensing methods in geological mapping of taiga regions (by the example of the Yenisei Siberia)]. Leningrad, Nedra Publ., 1978. 247 p.
2. Budyko M.I. *Klimat i zhizn'* [Climate and life]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 472 p.
3. Gorshkov S.P., Karrash H., Paramonov A.V. Geomorfologicheskaya indikatsiya merzlotnykh i nemerzlotnykh landshaftov srednei taygi [Geomorphological indication nemerson permafrost and landscapes of the middle taiga of Central Siberia]. In: *Geomorfologiya* [Geomorphology RAS], 1998, no. 4, pp. 55–61.
4. Gorshkov S.P., Vandenberg Dzh., Alekseev B.A.. et al. *Klimat, merzlota i landshafty Sredneeniseiskogo regiona: k 8-i Mezhdunarodnoi konferentsii po vechnoi merzlotte* [Climate, permafrost and landscapes of the middle Enisei region: 8th International conference on permafrost]. Moscow, Geograficheskii fakul'tet MGU Publ., 2003. 90 p.

5. Zolotokrylin A.N. *Klimaticheskoe opustynivanie* [Climatic desertification]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 246 p.
6. Medvedkov A.A. Geoekologicheskii otklik srednetaezhnykh landshaftov Prieniseyskoy Sibiri na poteplenie klimata kontsa XX – nachala XXI veka [Geo-ecological response of the middle-taiga landscapes in the Yenisei Siberia to climate warming of the late XX – early XXI century]. In: *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [Geoeology], 2014, no. 6, pp. 513–524.
7. Medvedkov A.A. *Srednetaezhnye geosistemy Prieniseiskoi Sibiri v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Mid-taiga geosystems of the Yenisei Siberia in a changing climate]. Moscow, Maks-Press Publ., 2016. 144 p.
8. Medvedkov A.A. Kartografirovaniye kriogennykh landshaftov na osnove analiza teplovykh snimkov [Mapping of cryogenic landscapes based on the analysis of thermal images]. In: *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii «InterKarto/InterGIS»* [Proceedings of the international conference "InterCarto / InterGIS"]. Rostov-on-Don, Salzburg (Austria), 2016, vol. 22, no. 1, pp. 380–384.
9. Mel'nikov E.S., Veisman L.I., Moskalenko N.G. et al. *Landshafty kriolitozony Zapadno-Sibirskoi gazonosnoi provintsii* [Landscapes of permafrost zone of the West Siberian gas province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 163 p.
10. Tumel' N.V., Zotova L.I. *Geoekologiya kriolitozony* [Geoeology of the permafrost zone]. Moscow, Geograficheskii fakul'tet MGU Publ., 2014. 244 p.
11. Fedorov A.N. *Merzlotnye landshafty Yakutii: metodika vydeleniya i voprosy kartografirovaniya* [Permafrost landscapes of Yakutia: a method for the separation and the issues of mapping]. Yakutsk, 1991. 140 p.
12. Medvedkov A.A. Geoenvironmental response of the Yenisei Siberia mid-taiga landscapes to global warming during the late XX–early XXI centuries. In: *Water Resources*, 2015, vol. 42, iss. 7, pp. 922–931.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 16-35-00327-мол_а) и Совета по грантам Президента РФ (проект МК-2396.2017.5).

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-35-00327-mole_a) and the Grant Council of the President of the Russian Federation (project MK-2396.2017.5).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Медведков Алексей Анатольевич – кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии мира и геоэкологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова;
e-mail: a-medvedkov@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Alexey A. Medvedkov – PhD in Geographic sciences, associate professor at the Department of Physical Geography of the World and Geoecology, M.V. Lomonosov Moscow State University;
e-mail: a-medvedkov@bk.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Медведков А.А. Индикация состояния мерзлотно-таёжных ландшафтов на южной периферии криолитозоны в условиях изменяющегося климата // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. 2018. № 1. С. 18-28

DOI: 10.18384/2310-7189-2018-1-18-28

FOR CITATION

Medvedkov A.A. Indication of the state of taiga permfrost landscapes on the southern periphery of cryolithozone under conditions of a changing climate. In: *Bulletin of the Moscow Region State University. Series: Natural Sciences*, 2018, no. 1, pp. 18-28

DOI: 10.18384/2310-7189-2018-1-18-28