

*М.И. Захаров^{1,2}, С. Гадаль^{1,2}*¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия² Университет Экс-Марсель, г. Экс-ан-Прованс, Франция

E-mail: mi.zakharov@s-vfu.ru

E-mail: sebastien.gadal@univ-amu.fr

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ В ГОРНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ЛАНДШАФТАХ ПО АРХИВНЫМ ДАННЫМ LANDSAT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Аннотация. Обнаружение ландшафтных изменений на основе разновременных, мультиспектральных и мультисенсорных спутниковых изображений с накоплением огромного массива архивных данных и многочисленных методологических разработок становится главным инструментом для территориального планирования и оценок устойчивости геосистем. Динамика и эволюция горных мерзлотных ландшафтов Арктики и северотаежных регионов представляют интерес процессам в контексте изменения климатических условий в следствии глобального потепления. Для изучения структурным и хронологическим процессов ландшафтных изменений часто используются большие массивы разновременных спутниковых данных, охватывающих 30-летний период. Как показывают многочисленные публикации, по-прежнему трудным является выбор подходящего метода обнаружения изменений, особенно в сложных горных территориях с ярко выраженными функциональными изменениями в ландшафтах. В этой статье мы демонстрируем методику моделирования динамики горных мерзлотных ландшафтов на восточном склоне хребта Орулган (Северо-Восток Сибири). Анализ главных компонент был использован для улучшения информации об изменениях из суммированных мультиспектральных разновременных данных. Результаты показали, что в период с 1999 по 2021 год в горных мерзлотных ландшафтах произошли значительные изменения, связанные с процессами сдвигов границ бореальных лесов и «озеленения» тундры.

Ключевые слова: ландшафтные изменения, динамика ландшафтов, эволюция ландшафтов, мерзлотные ландшафты, Landsat, ландшафтная структура, разновременные снимки, анализ главных компонент, ГИС, дистанционное зондирование, хребет Орулган, Северо-Восток Сибири

*M.I. Zakharov^{1,2}, S. Gadal^{1,2}*¹ North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia² Aix Marseille Univ, Université Côte d'Azur, Avignon Université, Aix-en-Provence, France

E-mail: mi.zakharov@s-vfu.ru

E-mail: sebastien.gadal@univ-amu.fr

MOUNTAIN PERMAFROST LANDSCAPE CHANGES ASSESSMENT BY ARCHIVE LANDSAT DATA USING THE PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

Abstract. Detection of landscape changes based on multitemporal, multispectral and multisensor satellite imagery with the accumulation of a vast array of archival data and numerous methodological developments is becoming a major tool for spatial planning and assessments of geosystem resilience. The dynamics and evolution of mountain permafrost landscapes in the Arctic and boreal regions are of interest in the context of climate regime change as a consequence of global warming. Large multi-temporal satellite data sets covering a 30-year period are often used to study the structural and chorological processes of landscape change. As numerous publications show, selecting a suitable method of change detection remains a challenge, especially in complex mountainous areas with pronounced functional changes in landscapes. In this paper, we demonstrate a methodology for modelling the dynamics of mountain permafrost landscapes on the eastern slope of the Orulgan Ridge (North-Eastern Siberia). Principal component analysis was used to improve information on changes from summarized

multispectral multitemporal data. The results showed that between 1999 and 2021, the mountain permafrost landscapes underwent significant changes associated with the processes of boreal forest boundary shifts and “greening” of the tundra.

Keywords: landscape changes, landscape dynamics, landscape evolution, permafrost landscapes, Landsat, landscape structure, multi-temporal imagery, principal component analysis, GIS, remote sensing, Orulgan Ridge, North-East Siberia

Введение

По данным Global Mountain Explorer, горы в Якутии занимают 60 % всей территории [1]. По ландшафтному районированию на территории Якутии в качестве периферии Байкальского рифта выделяются 9 плоскогорных, 7 низкогорных и 7 среднегорных провинций Северо-Восточной Сибири и Южной Сибири [2].

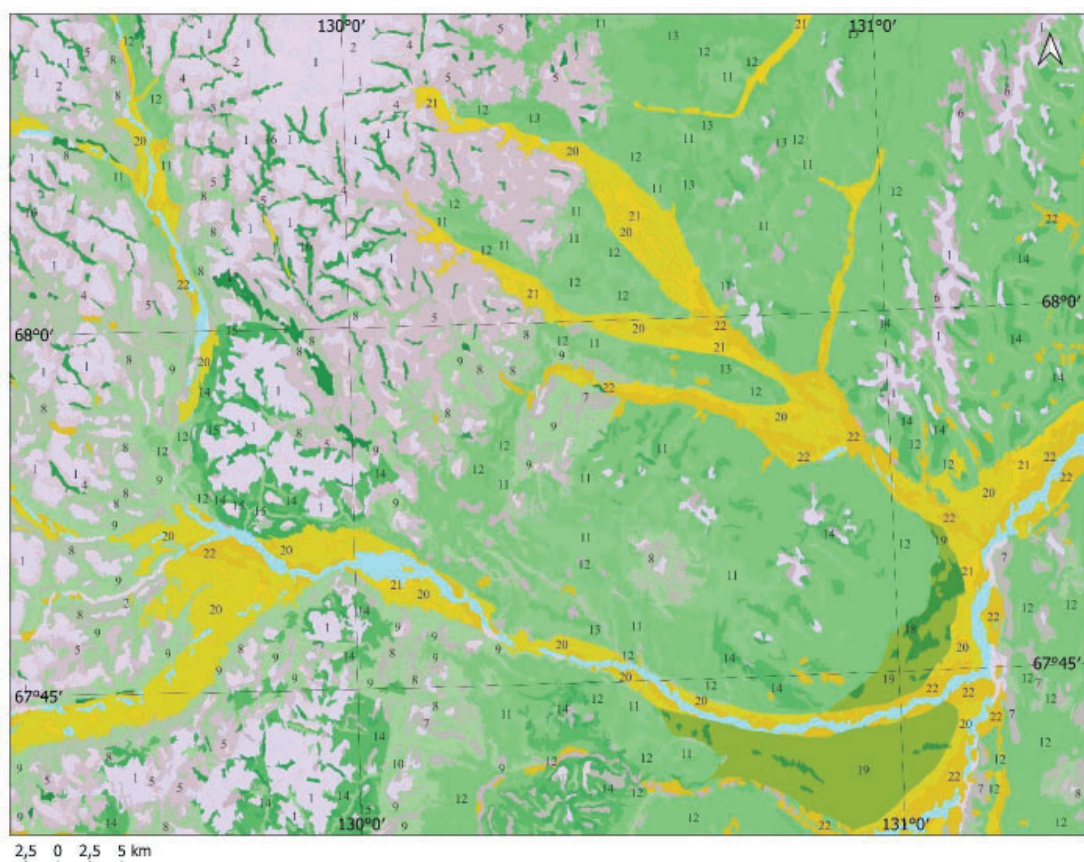
Согласно описанию [3], высотная поясность Северо-Востока Сибири представлена четырьмя типами ландшафтов. Горные пустыни представлены эпилитно-лишайниковым покровом, приуроченным к водоразделам среднегорья и высокогорья. Горные тундры характеризуются двумя типами растительного покрова: лишайниково-моховым и кустарничково-разнотравно-дриадовыми. Кустарниковыми зарослями называют горные мерзлотные ландшафты, отличающиеся наличием кедрового стланика в сочетании с ольховниками, характерными для верхних частей склонов. Нижний ярус представлен горными лиственничными редколесьями с множеством вариантов подлесков: кустарниковой, кустарничково-лишайниковой, лишайниково-моховой, лишайниковой и др. По днищам горных долин широко распространены интразональные ландшафты. В долинах рек за счет согревающего действия воды и выделения внутренней энергии Земли по тектоническим разломам биоразнообразие и биопродуктивность ландшафтов значительно выше, чем в зональных.

Одним из важных понятий, которое необходимо учитывать, является понятие темпоральности в исследованиях пространственной динамики ландшафтов, географических пространств и территорий [4]. Это приводит к необходимости учитывать, как прошлые, так и будущие изменения, и в этом случае моделирование может принимать форму как ретроспективного, так и перспективного. В вопросах временной организации мерзлотных ландшафтов используется два понятия динамика и эволюция, согласно представлениям геосистемной концепции В.Б. Сочавы. Динамикой называют изменения состояния ландшафтов, происходящие в пределах одного инварианта [5], к таковым, прежде всего, относятся послепожарные восстановительные сукцессии. Эволюция – необратимое коренное преобразование структуры, связанное с трансформацией инвариантных свойств, к таким процессам мы можем отнести, например, экспансию лесов в сторону тундры.

В этом исследовании мы ставим цель выявить динамические и эволюционные процессы ландшафтных изменений с помощью доступных архивных данных Landsat.

Объект исследования

Район исследования выбран ключевой участок на восточном склоне хребта Орулган (рис. 1). В наших предыдущих публикациях [6, 7], мы провели геоинформационное картографирование и ландшафтный анализ этого участка с выявлением 22 типов урочищ; 8 типов местности и 6 типов (подтипов) зональных(высотно-поясных) и интразональных ландшафтов. В растительности преобладают горные лиственничные редколесья с постепенным переходом в редины близ верхних границ и на переувлажненных участках.



Terrian type	Landscape class								
	Mountain desert	Mountain tundra			Mountain woodland			Intrazonal	
	Land cover classes (geobotanic unit)								
	Epilithic lichen and bare rock	Moss, lichen and low shrub	Grass, forbs and low shrub	Sparse forest with lichen and grass	Sparse forest with low shrub, moss, lichen and grass	Sparse forest with low shrub and moss	Bogged sparse forest and shrub	Valley forest with shrub and meadow	
Rock-ridge	1 -11...-13 0,5-1,0	3 -8...-11 0,7-2,0							
Glacial-valley		16 -2...-5 0,6-1,4					17 -2...-5 0,8-1,4		
Colluvial	2 -11...-13 1,0-1,5		4 -8...-11 0,7-2,0			10 -2...-6 2,0-3,0			
Deluvial colluvial			5 -8...-11 0,5-1,5	7 -2...-6 1,5-2,5	8 -2...-6 1,5-2,5	9 -2...-6 2,0-3,0			
Outwash				12 -4...-8 0,8-1,4	11 -4...-8 0,8-1,4		13 -4...-8 0,8-1,4		
Moraine			6 -8...-11 0,7-2,0	14 -0,5...-1,5 1,5-2,5		15 -4...-8 0,8-1,4			
Mid-terrace				18 -3...-5 0,8-1,2		19 -3...-5 0,8-1,2			
Low terrace					20 -2...-6 0,7-1,2		21 -1...-4 0,7-1,2	22 -2...-6 0,7-1,2	

Рис. 1. Ландшафтная структура района исследования на восточном склоне хребта Орулган

Fig. 1. Landscape structure of the research area on the eastern slope of the Orulgan ridge

Горная тундра непосредственно граничит с редколесьем, подгольцово-кустарниковые заросли не создают отдельный высотный тип. На сухих крутых и покатых склонах напочвенный покров представлен зелеными мхами и лишайником, реже встречается ерник. Более увлажненные пологие склоны преимущественно заняты кустарничково-зеленомошными лиственничными редколесьями. Ведущую роль в ландшафтном разнообразии восточного склона хребта Орулган играет сочетание различных геологических структур, которое обусловлено верхнечетвертичными тектоническими поднятиями и создает эрозионно-тектонические типы местности.

Методика и данные Landsat

Как правило, обнаружение изменений включает в себя применение мультивременных наборов данных для количественного анализа временных эффектов явления. Для мерзлотных ландшафтов для распознавания различных изменений используется множество различных подходов моделирования данных дистанционного зондирования [8].

В платформе Google Earth Engine мы использовали коллекции Top of Atmosphere, доступные для спутников Landsat 5, 7 и 8. Все спутниковые сцены в этих коллекциях скорректированы с учетом атмосферных эффектов с помощью алгоритмов TOA. Для всех изображений, полученных в период с 1 июля по 30 августа каждого года, мы маскировали облака, тени облаков и снег, определенные BQA, и рассчитывали NDVI на основе красного и ближнего инфракрасного диапазонов. Значения NDVI выше и ниже 0,9 и -0,9 были замаскированы чтобы удалить оставшиеся артефакты, которые возникли локально, например, из-за ошибки коррекции линии развертки Landsat 7. Впоследствии мы создали мозаику NDVI, рассчитав минимальное значение NDVI всех доступных сцен по трехлетним периодам с 1999-2021 гг.

В этой статье мы демонстрируем возможности обнаружения изменений на основе анализа главных компонент (PCA) [9], которое фиксирует максимальные отклонения в конечном числе ортогональных компонент на основе анализа собственных векторов матрицы корреляции данных, используемых для обнаружения изменений в различных исследованиях из-за того, что этот метод прост в применении и значительно обогащает информацию об изменениях [10]. Методика заключается в объединении исходных разновременных минимальных значений нормализованных вегетационных индексов (NDVI) в мозаику по трехлетним периодам данных Landsat в пространстве уменьшенной размерности путем определения новых полос значений, обобщающих информацию, содержащуюся в исходных, таким образом, чтобы максимизировать, со статистической точки зрения, количество исходной информации в ограниченное количество компонент (рис. 2).



Рис. 2. Методологическая схема изучения ландшафтных изменений по анализу главных компонент

Fg. 2. Methodological scheme of studying landscape changes based on the analysis of the main components

Для обнаружения изменений с помощью основных компонент мы использовали плагин PCA4CD (<https://github.com/SMBYC/PCA4CD>), адаптированный для работы в QGIS. Мы также сравниваем обнаруженные изменения с картой типов урочищ.

Результаты

Мы применили PCA к 6 мозаикам со средним значением NDVI. Таким образом, полученные главные компоненты (4 главных компонента) соответствуют не точной дате, а сумме активности хлорофилла за весь период наблюдений (в данном случае за июль и август 1999-2021 гг.) (рис. 3). Кроме того, в каждом из них концентрируется процент информации, соответствующий той или иной сводке активности хлорофилла в изучаемом районе. Первый компонент имеет самую большую сводку информации из всех наших спутниковых изображений Landsat NDVI и составляет 93,64 % информации. От второго компонента объединенная информация становится гораздо менее значимой в процентном отношении, так как второй компонент концентрирует 2,46 %, третий 1,36 % и четвертый 1,04 %.

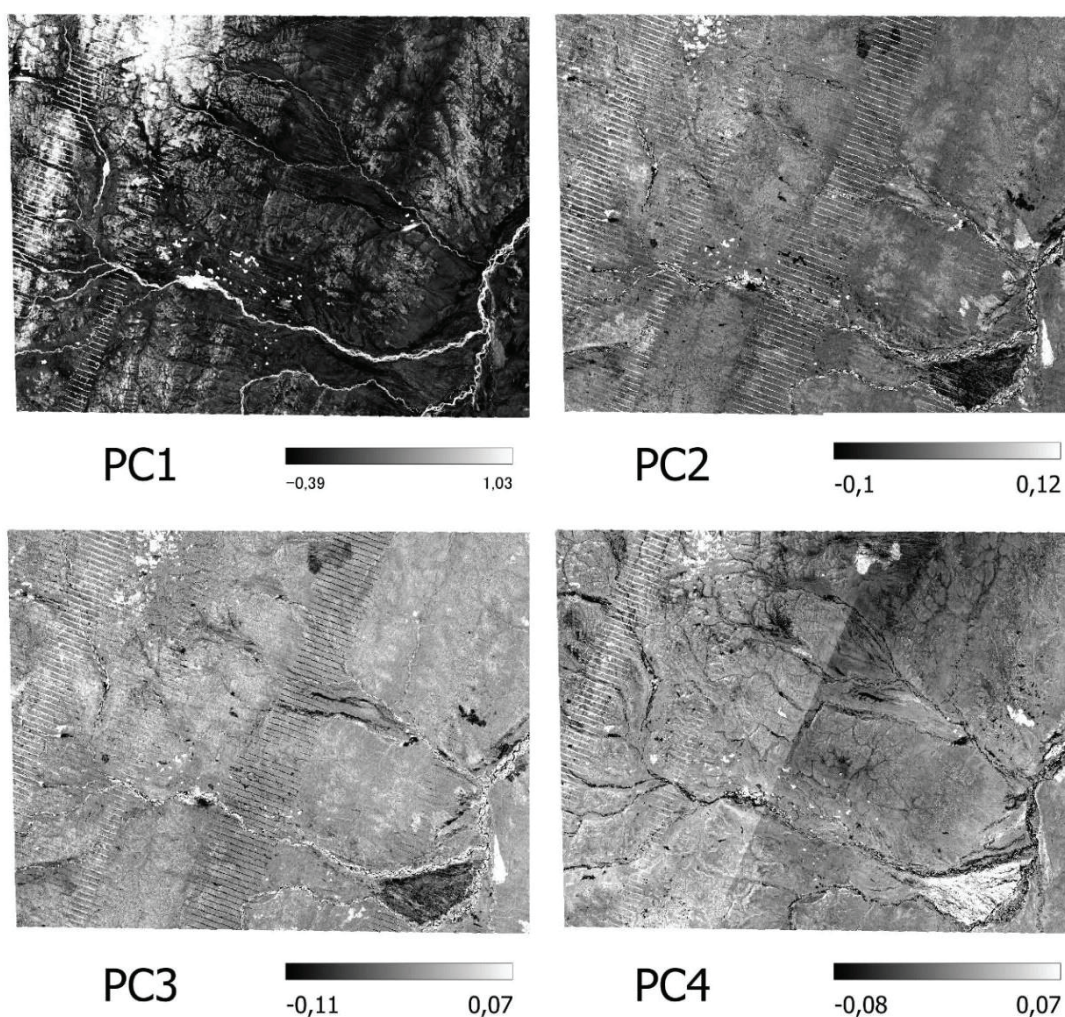


Рис. 3. Четыре главных компонента по использованным датасетам Landsat

Fig. 3. The four main components of the used Landsat datasets

Результаты анализа главных компонент показаны на рисунке 4. Анализ изменения первого главного компонента хорошо показывает многолетние процессы изменения ландшафтов и продуктивности биомассы, прежде всего процесс озеленения тундры и наступление на горную

пустыню, т. е. миграцию кустарников в высокогорья (рис. 4, а). Как показывают исследования [11] в условиях глобального потепления наблюдаются тенденции роста продуктивности тундровой зональной растительности, а также в ответ на нарушения целостности растительного покрова.

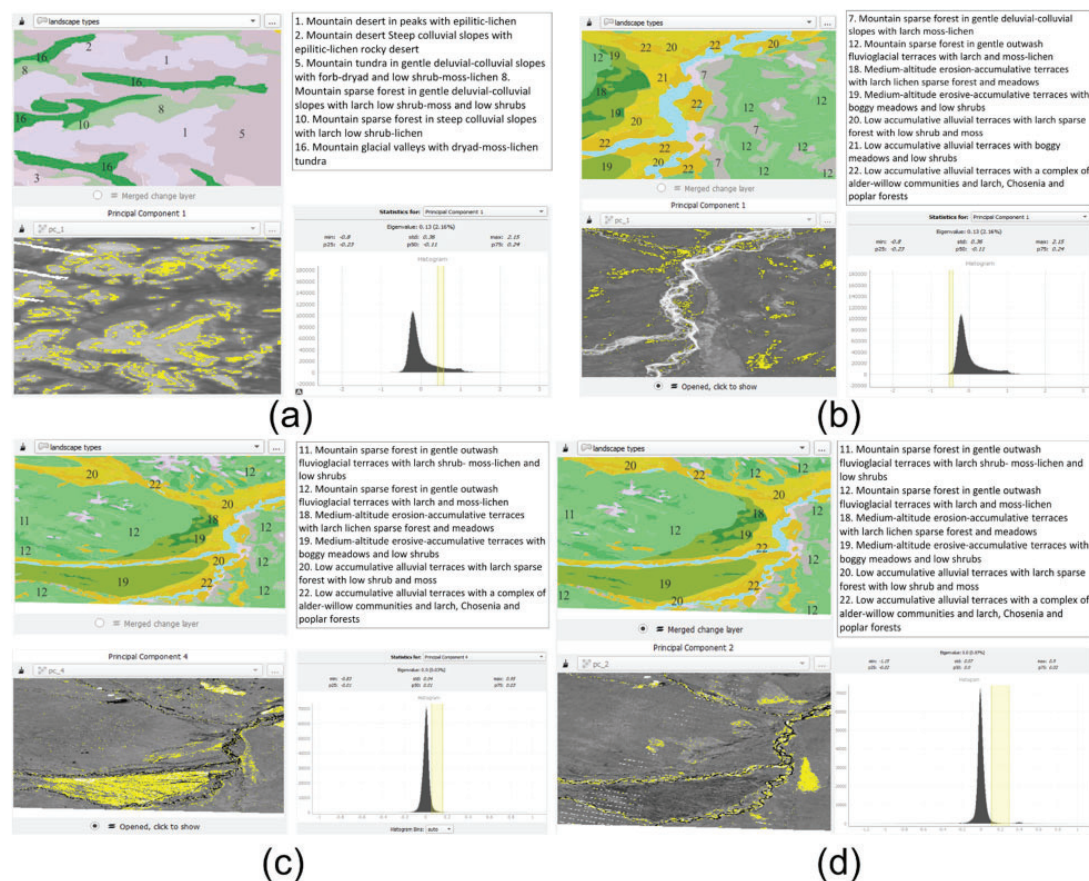


Рис. 4. Анализ изменений по главным компонентам (а) “озеленение” тундры; (б) структурные изменения в северотаежных лесах; (с) сукцессионная динамика лиственничных редколесий (молодая гарь); (д) сукцессионная динамика лиственничных редколесий (старая гарь)

Fig. 4. Analysis of changes in the main components (a) “greening” of the tundra; (b) structural changes in the North taiga forests; (c) successional dynamics of larch woodlands (young ash); (d) successional dynamics of larch woodlands (old gar)

Первый главный компонент (рис. 4, б) выявляет изменения в высокопродуктивных северотаежных интразональных ландшафтах, также связанные с долгосрочным повышением продуктивности лесов, и колебания низинных лугов, связанные с послепожарными сукцессиями. Эти изменения на исследуемой территории наблюдаются в интразональной тайге, преимущественно по долинам рек Бытантай и Омоллой, а также в горных редколесьях зандровых пологих склонов.

Существенные изменения наблюдаются при анализе четвертого главного компонента. Выделяется горелый лес 2000 г., который к 2021 г. практически вернулся в исходное состояние, то есть первый компонент проявляет постепенную тенденцию к восстановлению и прохождению сукцессионных стадий. Примечательно, что остальные пожары 2016 и 2019 годов не отображались в первой компоненте. Но второй основной компонент хорошо выделяет старые

гари и изменения, связанные с лесными пожарами. Негативные изменения более заметны для долинных ландшафтов, представленных на рис. 4 с и d, где такие потери зеленой массы фиксируются для некоторых участков густой растительности, что, безусловно, связано с речной эрозией, так как для горных рек характерна частая смена полос и резкие подъемы русла, подмывающие берега.

Ландшафтные изменения приводят к переходу лиственнично-лишайниковых редколесий в лиственничные кустарничково-мохово-лишайниковые редколесья. Это достаточно существенные эволюционные изменения, не связанные с лесными пожарами, и большинство вероятно, спровоцировано изменением климата.

Заключение

Всего на исследуемой территории выделено 5 категорий эволюционных и динамических ландшафтных изменений: 1) «озеленение» тундры; 2) «залесение» и расширение лесов; 3) осадконакопление и речная эрозия; 4) молодая гарь; 5) старый сгоревший участок.

Очевидно, что на изучаемой территории проявляется больше свидетельств смены структуры типов тундрового ландшафта. Таким образом, за последние два десятилетия в горной тундре, по сравнению с другими типами ландшафтов, произошли более качественные изменения, связанные с распространением отдельных видов кустарников и травянистой растительности. Эти сдвиги можно рассматривать как увеличение количества зелени на полученных картах NDVI. Интенсивность роста таких видов растительности, как *Dryas punctata*, *Eriophorum vaginatum*, *Carex starts*, *C. rariflora*, *C. chordorrhiza*, *C. rotundata*, *Dupontia psilosantha* является реакцией на глобальное потепление и увеличение вегетационного периода этих преобладающих растительных сообществ. в тундре существенно изменяются [11]. Распространение тундры на возвышенные участки сильно ограничивается высотой и высокой устойчивостью горных пустынь, в которых сосудистые растительности довольно трудно приживаются, поэтому увеличения тундры не отмечено.

Наблюдается значительное увеличение площади леса за счет увеличения высоты, захватывающей тундровую зону. Преобладающие древесные породы (*Larix cajanderi*) и подрост кедра (*Pinus pumila*), низкорослые кустарники (*Betula divaricata*, *B. exilis*, *B. middendorffii*), ольха (*Duschekia fruticosa*) проявляют высокую устойчивость к изменению климата и, вероятно, составляют наиболее биопродуктивные лесные пейзажи горного хребта. Настоящее исследование доказало, что можно обнаружить и оценить композиционные и структурные сдвиги в типах ландшафта во время глобального потепления, используя временные ряды Landsat. Однако нельзя отрицать, что реакция каждого вида растительности на потепление не одинакова, что, вероятно, связано с их особыми экологическими характеристиками и основными потребностями, а также состоянием местонахождения. Степень реакции различных макросклонов на глобальное потепление еще предстоит выяснить, и в дальнейших исследованиях необходимо изучить виды растительности. Для горных районов характерны изменения растительного покрова в результате речных процессов. Отрицательные тренды в биомассе интразональных бореальных ландшафтов низкой террасы являются следствием процесса речной эрозии и лесных пожаров. Как правило, полосовые процессы 188 носят не деструктивный, а флуктуационный характер, учитывая еще и низкую вовлеченность этих территорий в землепользование.

Литература

1. Karagulle, D. Modelling global Hammond landform regions from 250-m elevation data / D. Karagulle, C. Frye, R. Sayre, S. Breyer, P. Aniello, R. Vaughan, D. Wright // Transactions in GIS – 2017. – 21. – P.1040–1060. <https://doi.org/10.1111/tgis.12265>
2. Федоров, А.Н. Мерзлотные ландшафты Якутии: методика выделения и вопросы картографирования / А.Н. Федоров. – Якутск, 1991. – 140 с.

3. Федоров, А.Н. Эволюция и динамика мерзлотных ландшафтов : 25.00.08 автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук: / Федоров Александр Николаевич. – Якутск, 2020. – 38 с. – Текст : непосредственный.
4. Арманд, А.Д. Самоорганизация и саморегулирование географических систем / А.Д.Арманд. – Москва : Наука, 1988. – 264 с.
5. Сочава, В.Б. Введение в учение о геосистемах / В.Б. Сочава. – Новосибирск: Наука, 1978. – 318 с
6. Захаров, М.И. Анализ ландшафтной структуры восточного склона хребта Орулган / М.И. Захаров, Ю.Г. Данилов, С. Гадал [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 3. – С. 49-55. <https://dx.doi.org/10.17513/use.37791>
7. Захаров, М.И. Мерзлотные ландшафты восточного склона хребта Орулган (на примере ключевого участка озера Булгунняхтах / М.И. Захаров, Ю.Г. Данилов, С. Гадал [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2022. – № 3, ч. 2. – С. 68-72. <https://dx.doi.org/10.23670/IRJ.2022.117.3.050>
8. Jorgenson, M.T. Remote Sensing of Landscape Change in Permafrost Regions. / M.T. Jorgenson, G. Grosse. // Permafrost and Periglacial Process. – 2016 – 27: – P. 324-338. <https://doi.org/10.1002/ppp.1914>
9. Jolliffe, I.T. Principal Components Analysis / I. T. Jolliffe // 2nd ed. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer. – 2002 – 488 pp. <https://doi.org/10.1007/b98835>
10. Deng, J.S. PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data / J.S. Deng, K. Wang, Y.H. Deng, G.J. Qi // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – 29:16. – P. 4823-4838. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160801950162>
11. Epstein, H. Tundra Greenness / H. Epstein, U. Bhatt, M. Raynolds, D. Walker, B.C. Forbes, T. Horstkotte, [et. al.] // Arctic Report Card. – 2018

References

1. Karagulle, D. Modeling global Hammond landform regions from 250-m elevation data. / D. Karagulle, C. Frye, R. Sayre, S. Breyer, P. Aniello, R. Vaughan, D. Wright // Transactions in GIS – 2017. – 21. – P.1040-1060. <https://doi.org/10.1111/tgis.12265>
2. Fedorov A.N. Permafrost landscapes of Yakutia: identification technique and mapping issues / A.N. Fedorov. – Yakutsk, 1991. – 140 p.
3. Fedorov A.N. Evolution and dynamics of permafrost landscapes: dis. ... dr geogr. Sciences: 25.00.08 / Fedorov Alexander Nikolaevich. – Yakutsk, 2020. – 38 p.
4. Armand A.D. Self-organization and self-regulation of geographic systems / A.D. Armand. – M.: Nauka, 1988. – 264 p.
5. Sochava V.B. Introduction to the doctrine of geosystems / V.B. Sochava. – Novosibirsk: Nauka, 1978. – 318 p.
6. Zakharov, M.I. Analysis of the landscape structure of the eastern slope of the Orulgan ridge / M.I. Zakharov, Yu.G. Danilov, S. Gadal [et al.] // Successes of modern natural sciences. – 2022. – No. 3. – P. 49-55. <https://dx.doi.org/10.17513/use.37791>
7. Zakharov, M.I. Permafrost landscapes of the eastern slope of the Orulgan ridge (on the example of the key area of Lake Bulgunnyakhtakh / M.I. Zakharov, Yu.G. Danilov, S. Gadal [et al.] // International Scientific Research Journal. – 2022. – No. 3 hours. 2. – pp. 68-72 <https://dx.doi.org/10.23670/IRJ.2022.117.3.050>
8. Jorgenson, M.T. Remote Sensing of Landscape Change in Permafrost Regions. / M.T. Jorgenson, G. Grosse. // Permafrost and Periglacial Process. – 2016 – 27: – P. 324-338. <https://doi.org/10.1002/ppp.1914>
9. Jolliffe, I.T. Principal Components Analysis / I. T. Jolliffe // 2nd ed. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer. – 2002 – 488 pp. <https://doi.org/10.1007/b98835>
10. Deng, J.S. PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data / J.S. Deng, K. Wang, Y.H. Deng, G.J. Qi // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – 29:16. – P. 4823-4838. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160801950162>
11. Epstein, H. Tundra Greenness / H. Epstein, U. Bhatt, M. Raynolds, D. Walker, B.C. Forbes, T. Horstkotte, [et. al.] // Arctic Report Card. – 2018.

Сведения об авторах

ЗАХАРОВ Моисей Иванович – к.г.н., доцент эколого-географического отделения и с.н.с. лаборатории климата и северных экосистем ИЕН СВФУ, ассоциированный член лаборатории UMR ESPACE CNRS, г. Экс-ан-Прованс, Франция.

E-mail: mi.zakharov@s-vfu.ru

ZAKHAROV Moisei Ivanovich – Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor of the Department of Ecology and Geography and Senior Researcher at the Laboratory of Climate and Northern Ecosystems, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University, Associate Member of the UMR ESPACE CNRS Laboratory, Aix-en-Provence, France.

ГАДАЛЬ Себастьян – профессор Университета Экс-Марсель, г. Экс-ан-Прованс, Франция и профессор эколого-географического отделения ИЕН СВФУ.

E-mail: sebastien.gadal@univ-amu.fr

GADAL Sébastien – Full Professor, Habilitation Doctor, Aix-Marseille University, Aix-en-Provence, France.