

УДК 630*181:528.8

ПРОДВИЖЕНИЕ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЛЕСА НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА ЮГЫД ВА ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЙ

Т.А. Мыльникова¹, В.В. Елсаков²

¹Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина

²Институт биологии Коми НЦ УрО РАН

В статье изложены результаты исследования изменений сомкнутости крон деревьев залесённых участков предгорных и горных территорий Приполярного Урала по зимним спутниковым снимкам Landsat. Анализ проводился на трех модельных участках, расположенных в широтном градиенте. Для исследования спектрально-отражательной яркости лесов использовались ранневесенние снимки в диапазоне 0,63-0,69 мкм (красный канал), т.к. сохраняющийся снежный покров маскирует различные элементы рельефа и растительного покрова, оставляя лишь древесную растительность, плотность крон которой можно оценить математически. Для построения модели изменения сомкнутости древостоев использовался метод простой линейной регрессии, который показал, что положительные слабо выраженные изменения являются наиболее распространенными на всех участках, при этом их доля возрастает по широтному градиенту – с севера на юг. Также на всех анализируемых площадках зафиксирована наименьшая частота проявления отрицательных сильно выраженных изменений. Для отображения продвижения границы леса по высотному градиенту на модельных участках были проведены трансекты, отображающие высоту рельефа и показатели сомкнутости за первый и последний годы наблюдений. На всех участках отмечается рост сомкнутости в экотонных зонах (лес-тундра), при этом наибольшие изменения сомкнутости локализованы на больших высотах при продвижении к югу. Количественную оценку результатов обработки спутниковых изображений проводили с привлечением полевых измерений и Каппа-статистики. Анализ корректности моделей, построенных на основании спутниковых изображений, и зон прироста с картосхем демонстрирует хороший уровень сходимости (80 %).

Ключевые слова: граница леса, моделирование, сомкнутость крон, дистанционное зондирование, Landsat, изменение климата.

THE EXPANSION OF UPPER FOREST BOUNDARY IN THE NATIONAL PARK YUGYD VA UNDER CLIMATIC IMPACT

T.A. Mylnikova¹, V.V. Elsakov²

¹Pitirim Sorokin Syktyvkar State University

²Institute of Biology of Komi Science Centre (IB FRC Komi SC UB RAS)

The article presents the results of a research study of changes in tree crown density in wooded foothills and mountainous areas of the Subpolar Urals according to winter Landsat satellite images. Three model locations along the latitudinal gradient were subjected to the analysis. Early spring photos in the 0.63-0.69 μm (red band) wavelength range were used to examine the spectral-reflective brightness of forests because the persisting snow cover occludes different elements of the relief and vegetation cover, leaving only woody vegetation whose crown density can be assessed mathematically. A simple linear regression technique was used to build a model for modifying the density of forest stands, and the results showed that positive, weakly expressed changes are the most common across all locations, while their proportion rises along the latitudinal gradient, or from north to south. Also, across all of the examined areas, the lowest frequency of negatively strong changes was observed. Transects, which represent the height of the relief and the density

indicators for the first and last years of data, were drawn on the model plots to show the progression of the forest boundary along the altitudinal gradient. Ecotone zones (forest-tundra) exhibit a general increase in density, but the biggest variations in density are seen as one moves southward and are concentrated at high altitudes. Using field surveys and kappa statistics, the results of the processing of satellite images were quantified. A high level of convergence (80 %) is observed in the analysis of the accuracy of models created using satellite images and growing zones from cartographic diagrams.

Keywords: forest boundary, modeling, crown density, remote sensing, Landsat, climate change.

Введение

Выявление и количественная оценка трансформации и биологической продуктивности горных лесных экосистем – одни из актуальных задач экологии, роль которых значительно повышается на фоне современного изменения климата (Григорьев и др., 2019). Особый интерес вызывают исследования предгорных и горных лесов (Шиятов и др., 2005; Шиятов, 2009) в связи с более яркой выраженностью градиента эколого-ценотических условий, приводящей к зональным сменам растительности на более компактной по площади территории, чем на равнинной части. Основные тенденции изменения лесных фитоценозов на верхней границе леса предгорных и горных участков прослеживаются в продвижении границы леса и увеличении сомкнутости крон залесённых участков, усилении радиального прироста древесины (Ойдупаа и др., 2004), что связывается с климатическими сдвигами.

Даже недолговременные климатические вариации напрямую влияют на продуктивность экосистем и динамику растительного покрова. Одним из методов исследования динамики растительности в горах под влиянием климата является метод ландшафтной фотографии, или ландшафтного фотографирования (Шиятов, 2009). Суть метода заключается в фотофиксации определенных территорий с одного и того же места, но с большим временным интервалом. Затем пространственно-временные изменения отображаются на топографических картах. В итоге получаются картосхемы, на которых особым знаком или цветом отмечены основные массивы прироста древесной и кустарниковой растительности. Развитие системы дистанционного мониторинга, средств системного анализа данных и привлечение архивных метеорологических данных позволяет проводить анализ трендов изменения свойств растительного покрова для крупных территориальных единиц: Гренландии (Karlsen, 2003), Кольского полуострова (Shutova et al., 2006), Феноскандии (Karlsen et al., 2006).

Сомкнутость крон древостоев – один из важнейших показателей временных изменений лесных фитоценозов. Предварительный анализ данных показал, что достоверность выявления показателей сомкнутости возрастает при использовании зимних изображений, что, с одной стороны, связано с маскированием многих форм микрорельефа земной поверхности снежным покровом (Алексеев, Сваткова, 2008), а с другой – с отсутствием листвы и погребением лишайниково-мохового, травяно-кустарничкового и частично кустарничкового яруса, что приводит к большей контрастности исследуемых компонент (Елсаков, Марущак, 2011).

Цель исследования

Оценка горизонтального и вертикального сдвигов верхней границы леса за счет распространения сомкнутых древостоев на модельных участках Приполярного Урала на территории национального парка Югыд Ва, произошедшие с 1986 по 2021 год.

Задачи:

- 1) построить модель изменения сомкнутости крон древостоев на основании материалов спутниковой съемки Landsat;
- 2) выявить индивидуальные и общие тенденции изменений лесных фитоценозов национального парка Югыд Ва на основе анализа модельных участков;
- 3) определить процент сходства между данными, результаты которых были рассчитаны по модели и картосхемам, с привлечением Каппа-статистики.

Область исследования

Объектом исследования являются горные лесные фитоценозы на трех модельных участках (рис. 1) Приполярного Урала:

- 1) верховья р. Лимбекою;
- 2) хребет Сабля;
- 3) в районе оз. Торговое и р. Малый Паток.

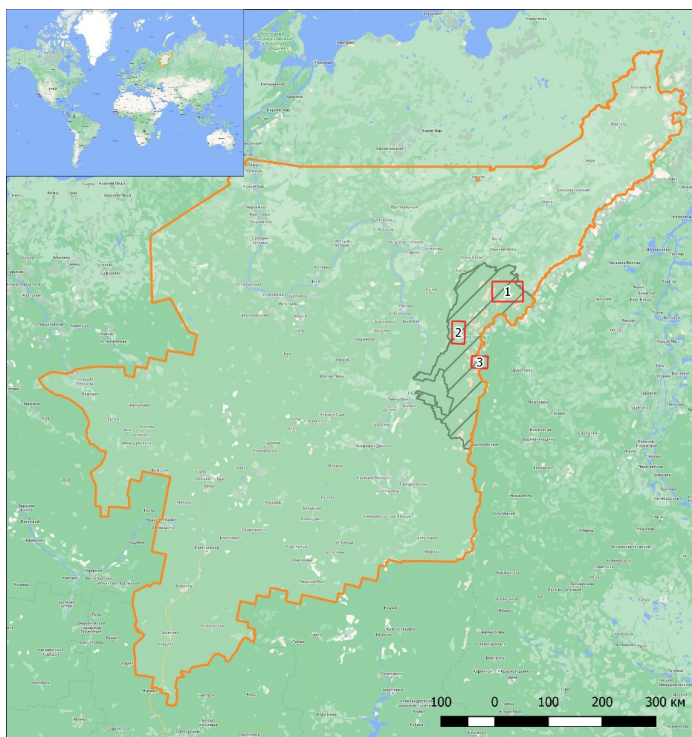


Рис. 1. Область исследования

Материалы и методика исследований

В качестве исходных материалов использовались космоснимки спутников серии Landsat (TM, OLI) с наличием снежного покрова. Снежный покров приводит к маскированию на спутниковых изображениях различных типов земного покрова за исключением древесной растительности (Барталев и др., 2016). Модельные участки располагаются на Приполярном Урале, поэтому в зимний период падающие тени горных вершин имеют большую площадь и искажают показатели сомкнутости крон. Вследствие этого было решено использовать материалы спутниковой съемки за ранневесенний период (март-апрель), пока снег маскирует весь напочвенный покров, а падающие тени скальных выходов имеют меньшую площадь (табл. 1).

Характеристика спутниковых снимков Landsat

№ участка	Сенсор, Path/Row	Дата съемки	Время съемки	Высота солнца	Азимут солнца
1	LT05 169 014	1985/03/30	07:01:01	27.022	160.808
	LC08 167 014	2020/04/01	07:17:58	28.792	169.130
2	LT04 168 015	1988/04/08	06:51:11	31.604	158.410
	LC08 168 015	2021/04/11	07:24:35	33.752	168.078
3	LT05 168 015	1987/05/16	06:48:42	43.226	156.771
	LC08 169 015	2019/04/29	07:30:27	39.78	168.523

Данные дистанционного зондирования спутников серии Landsat проходят первичную обработку, включающую радиометрическую коррекцию и масштабирование полученных значений на шкалу возможных значений яркости элемента изображения. Исследования спектрально-отражательных яркостей лесов проводились в диапазоне 0,63-0,69 мкм (красный канал), соответствующем линии поглощения света живой растительностью («хлорофилловая яма»). Однако в зимний период, когда листва/хвоя отсутствует в пологе древостоя, а земная поверхность покрыта снегом, этот диапазон может использоваться для оценки плотности стволов деревьев за счет интенсивности отраженных от снега солнечных лучей в межкроновых пространствах (Сочилова, Ершов, 2012).

Оценка сомкнутости производилась по методу многомерной линейной регрессии вида $y=kx+b$, где y – сомкнутость (%), k – рассчитанный свободный коэффициент, x – значение красного канала, b – коэффициент при i -м канале набора снимков.

Применяемая формула изменяет величину сомкнутости пропорционально яркостным характеристикам космоснимков. Ввиду этого экспериментально были установлены величины сомкнутости, в которых участки с низкими показателями яркости идентифицируются как области с максимальной сомкнутостью (90-100 %), а участки повышенной яркости соответствуют минимальным показателям (0 %). Таким образом, за период с 1986 по 2021 год накопился большой корпус данных, способствующих созданию тренда изменений.

Также в нашем распоряжении оказались картосхемы анализируемых участков, предоставленные коллегами из Института экологии растений и животных (ИЭРиЖ УрО РАН) (рис. 2, 3, 4), где зоны прироста лесных насаждений выделены красным цветом. Мы произвели географическую привязку предложенных картосхем, а также автоматическую классификацию по методу K-Means, чтобы выделить зоны расширения лесной растительности, и сопоставили с нашими моделями, чтобы вычислить процент сходства.

Результаты исследования

В ходе выполнения работы нами были созданы модели, демонстрирующие динамику сомкнутости крон на модельных участках Приполярного Урала в течение 35 лет наблюдений с использованием данных ДЗЗ (рис. 4, 5, 6).

Для выявления общей тенденции изменений модельных участков была построена диаграмма распределения классов изменений (рис. 8). Смещение всех графиков в правую сторону говорит о том, что в целом анализируемые площадки характеризуются положительным трендом изменений или увеличением сомкнутости крон.

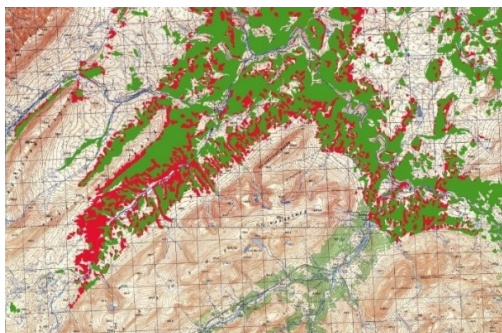


Рис. 2. Участок № 1. Верховья р. Лимбекою

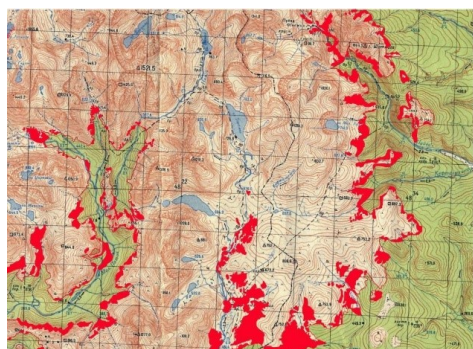


Рис. 3. Участок № 3. Район оз. Торговое и р. Малый Паток

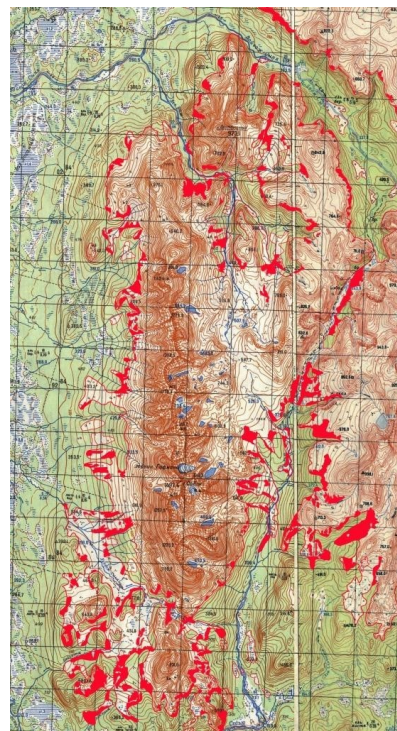


Рис. 4. Участок № 2. Хребет Сабля

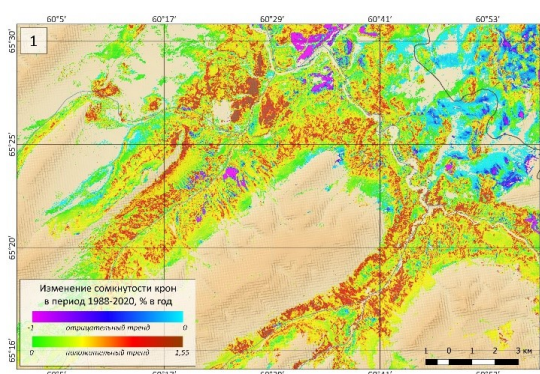


Рис. 5. Модель изменения сомкнутости в верховьях р. Лимбекою

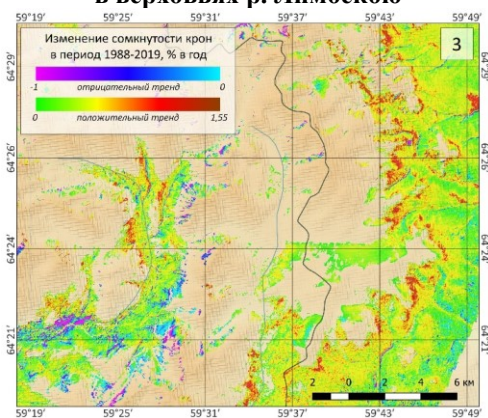


Рис. 6. Модель изменения сомкнутости в районе р. Малый Паток и оз. Торговое

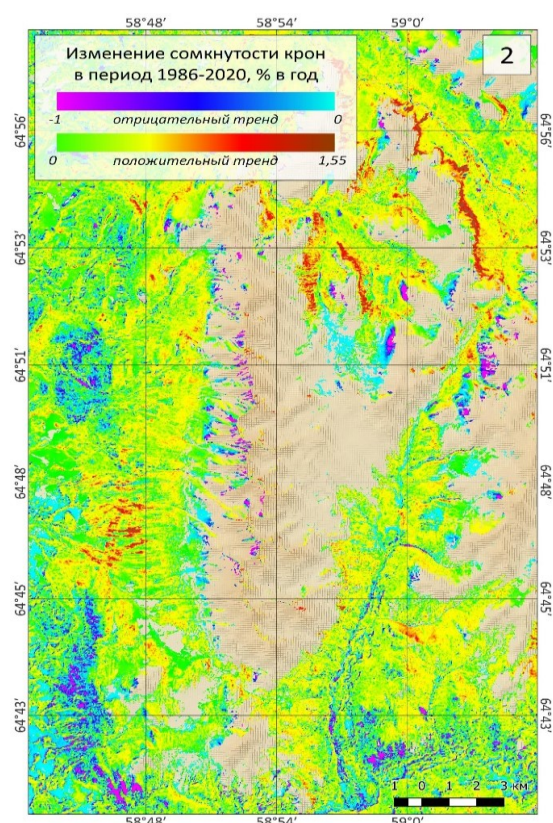


Рис. 7. Модель изменения сомкнутости на хребте Сабля

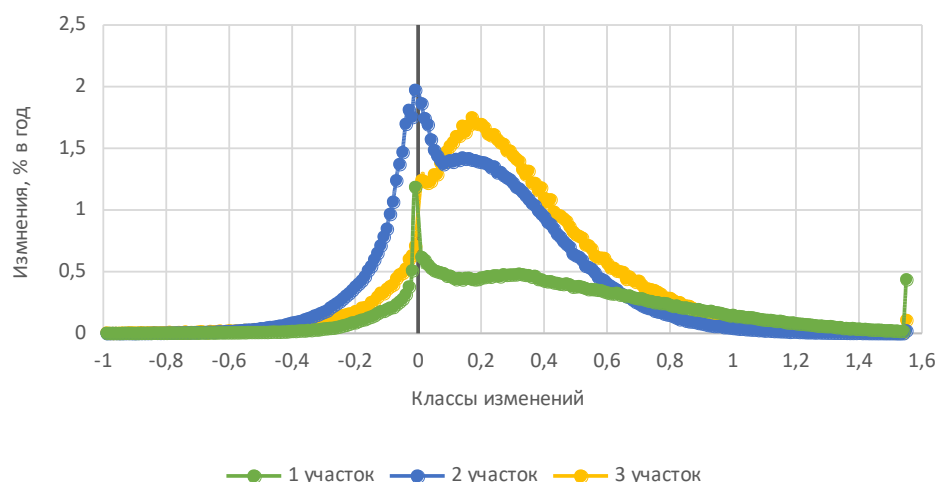


Рис. 8. Распределение классов изменений на исследуемых участках

Также распределение классов изменений можно представить в виде круговой диаграммы для каждого участка (рис. 9, 10, 11), разделив их (изменения) на четыре основных класса (табл. 2).

Таблица 2

Классы изменений

№ участка			Интервал значений изменений	Класс изменений
1	2	3		
			$[-1;-0,51]$	Отрицательные сильно выраженные
			$[-0,5;0]$	Отрицательные слабо выраженные
			$[0;0,5]$	Положительные слабо выраженные
			$[0,51;1,55]$	Положительные сильно выраженные

Анализ полученных данных позволяет констатировать следующее. Наибольшие сильно выраженные положительные изменения наблюдаются на северном участке (№ 1). Положительные слабо выраженные изменения являются наиболее распространенными на всех участках, при этом их доля возрастает по широтному градиенту – с севера на юг. Также на всех анализируемых площадках зафиксирована наименьшая частота проявления отрицательных сильно выраженных изменений – их доля составляет менее 1 %. Наибольшая величина отрицательных слабо выраженных изменений была зафиксирована на среднем участке (№ 2) и составляла 25 % от общего тренда изменений.

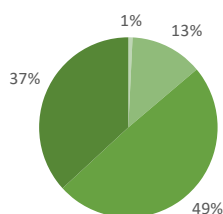


Рис. 9. Структура изменений на участке № 1

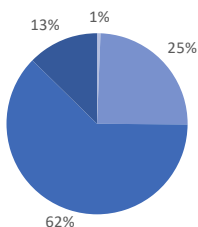


Рис. 10. Структура изменений на участке № 2

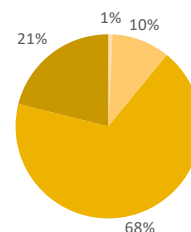


Рис. 11. Структура изменений на участке № 3

Для отображения продвижения лесной растительности вверх по высотному градиенту на модельных участках были проведены трансекты. Используя значения, снятые с трансект,

были построили профили местности, отображающие высоту рельефа и показатели сомкнутости за первый и последний год наблюдений (рис. 12, 13, 14). На всех участках наблюдается рост сомкнутости в экотонных зонах, при этом наибольшие изменения сомкнутости локализованы на больших высотах при продвижении к югу.



Рис. 12. Пространственно-временное изменение сомкнутости крон на участке № 1

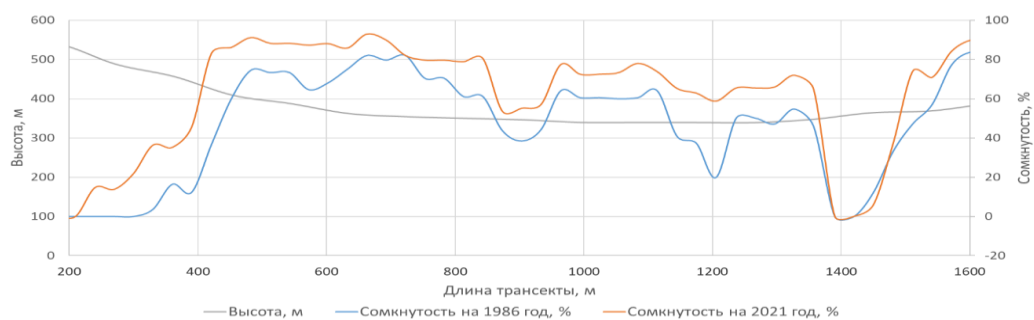


Рис. 13. Пространственно-временное изменение сомкнутости крон на участке № 2

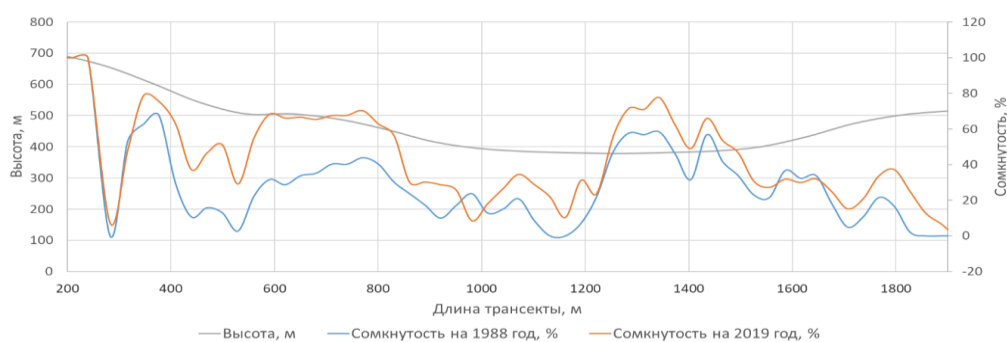


Рис. 14. Пространственно-временное изменение сомкнутости крон на участке № 3

Количественную оценку результатов обработки спутниковых изображений проводили с привлечением Каппа-статистики (Stehman, 1996). Между собой сравнивали количество красных пикселей картосхем с количеством пикселей сильно выраженных положительных изменений моделей. Показатель «общая сходимость» говорит о том, насколько в целом согласованы данные, а показатель Каппа показывает, насколько согласованы данные с учетом возможности совпадения случайно. Анализ корректности моделей, построенных на основании спутниковых изображений, и зон расширения леса с картосхем, предоставленных

А.А. Григорьевым (2019), демонстрирует хороший уровень сходимости. Общая сходимость всех участков в среднем составляет порядка 82 %, Каппа-коэффициент — 40 %. Наиболее полно модель с картосхемой совпали на южной анализируемой площадке: общая сходимость выделенных единиц составила 90,4 %, Каппа-коэффициент — 52,7 % (табл. 5). Скорее всего, это связано с тем, что это наименьший по площади участок, на котором статистический анализ производился с меньшим количеством значений, — следовательно, коэффициент ошибки был меньше. Также стоит отметить, что, при осуществлении геопривязки картосхемы коэффициент ошибки был наименьшим, поэтому точность совпадения пикселей картосхемы с пикселями модели тоже может быть обусловлена этим фактором.

На северной площадке общая сходимость составляет 78,1 %, Каппа-коэффициент - 39,4 % (табл. 3). Стоит сказать, что картосхема этого участка была привязана с наибольшим показателем ошибки, что могло повлиять на достоверность представленных результатов. Средний анализируемый участок характеризуется общей сходимостью выделенных единиц в размере 76,9 %, Каппа-коэффициент — 27,9 % (табл. 4). Такие низкие показатели кроме того могут быть обусловлены ошибкой привязки картосхем, а также несколько разным охватом территорий для сопоставления: измерение сомкнутости на участке № 1 происходило на большей площади, чем измерения зон расширения растительности на картосхемах.

Таблица 3

Оценка точности классификации площади расширения леса на участке № 1

	Фон	Положительные сильно выраженные изменения	Точность пользователя
Фон	720862 пикс.	5742 пикс.	99,2 %
Положительные сильно выраженные изменения	229465 пикс.	115745 пикс.	33,5 %
Точность производителя	75,9 %	95,3 %	
Общая сходимость: 78,1 %			
Каппа: 39,4 %			

Таблица 4

Оценка точности классификации площади расширения леса на участке № 2

	Фон	Положительные сильно выраженные изменения	Точность пользователя
Фон	239609 пикс.	6191 пикс.	97,5 %
Положительные сильно выраженные изменения	72764 пикс.	23673 пикс.	24,5 %
Точность производителя	76,7 %	79,3 %	
Общая сходимость: 76,9 %			
Каппа: 27,9 %			

Таблица 5

Оценка точности классификации площади расширения леса на участке № 3

	Фон	Положительные сильно выраженные изменения	Точность пользователя
Фон	723294 пикс.	13520 пикс.	98,2 %
Положительные сильно выраженные изменения	69759 пикс.	56738 пикс.	44,9 %
Точность производителя	91,2 %	81,8%	
Общая сходимость: 90,4 %			
Каппа: 52,7 %			

Выводы

Использование разновременных спутниковых изображений Landsat ранневесеннего периода в сочетании с картосхемами позволило выполнить анализ трендов изменения показателя сомкнутости крон древесного яруса на модельных территориях Приполярного Урала за 35-летний период. Предложенный алгоритм исследования может быть широко использован для выявления экологических и географических закономерностей изменения характеристик растительного покрова отдельных территорий под влиянием климатических трансформаций или антропогенных влияний.

Исследование выполнено в рамках з/б темы НИР «Оценка эколого-ценотического, видового и популяционного разнообразия растительного мира ключевых особо охраняемых природных территорий Республики Коми».

Библиографический список

1. Алексеенко Н.А., Сваткова Т.Г. Зимние топографические карты // Вестник Московского Университета. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 8-11.
2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. Москва: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В., Галимова А.А., Вьюхин С.О., Моисеев П.А. и др. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // Экология. 2019. № 4. С. 243-254. <https://doi.org/10.1134/S0367059719040073>.
4. Елсаков В.В., Кулюгина Е.Е. Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 65-77. <https://doi.org/10.7868/S0205961414030038>.
5. Елсаков В.В., Марущак И.О. Спектрозональные спутниковые изображения в выявлении трендов климатических изменений лесных фитоценозов западных склонов Приполярного Урала // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, №2. С. 281-286.
6. Ойдупаа О.Ч., Ваганов Е.А., Наурзабаев М.М. Длительные изменения летней температуры и радиальный рост лиственницы на верхней границе леса в Алтае-Саянской горной стране // Лесоведение. 2004. № 6. С. 14-24.
7. Сочилова Е.Н., Ершов Д.В. Анализ возможности определения запасов древесных пород по спутниковым данным Landsat ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 277-282.
8. Шиятов С.Г., Терентьев М.М., Фомин В.В. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале // Экология. 2005. № 2. С. 83-90. <https://doi.org/10.1007/s11184-005-0051-9>.
9. Шиятов С.Г. Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с.
10. Karlsen S.R., Elvebakk A.A. A method using indicator plants to map local climatic variation in the Kangerlussuaq/Scoresby sund area, East Greenland // Journal of Biogeography. 2003. Vol. 30, № 10. P. 1469-1491.
11. Karlsen S.R., Elvebakk A., Hogda K.A., Johansen B. Satellite-based mapping of the growing season and bioclimatic zones in Fennoscandia // Global Ecology and Biogeography. 2006. Vol. 15, № 4. P. 416-430.
12. Shutova E., Wielgolaski F.E., Karlsen S.R., Makarova O., Berlina N., Filimonova T., Haraldsson E., Aspholm L.F., Hogda K.A. Growing seasons of Nordic mountain birch in northernmost Europe as indicated by long-term field studies and analyses of satellite images // International Journal Biometeorology. 2006. Vol. 51. P. 155-166. DOI:10.1007/s00484-006-0042-y.
13. Stehman V. Estimating the kappa coefficient and its variance under stratified random sampling // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. Vol. 62, № 4. P. 401-407.

References

1. Alekseenko N.A., Svatkova T.G. Zimnie topograficheskie karty (Winter topographic maps). *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 5. Geografija*, 2008. № 3. P. 8-11.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupjan E.A., Plotnikov D.E., Hvostikov S.A., Shabanov N.V. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii (Land cover mapping over Russia using Earth observation data). Moscow. Russian Academy of Sciences' Space Research Institute, 2016. 208 p.
3. Grigor'ev A.A., Djevi N.M., Kukarskih V.V., Galimova A.A., V'juhin S.O., Moiseev P.A. i dr. Struktura i dinamika drevostoev verhnej granicy lesa v zapadnoj chasti plato Putorana (Structure and dynamics of tree stands at the upper timberline in the western part of the Putorana Plateau). *Russian Journal of Ecology*, 2019. No. 4. P. 243-254. <https://doi.org/10.1134/S0367059719040073>.
4. Elsakov V.V., Kuljugina E.E. Rastitel'nyj pokrov Jugorskogo poluostrova v usloviyah klimaticheskikh izmenenij poslednih desjatiletij (Vegetation of Yygorsky Peninsula at Climate Changes of the Last Decades). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2014. No. 3. P. 65-77. <https://doi.org/10.7868/S0205961414030038>.
5. Elsakov V.V., Marushhak I.O. Spektrozonal'nye sputnikovye izobrazheniya v vyjavenii trendov klimaticheskikh izmenenij lesnyh fitocenozov zapadnyh sklonov Pripoljarnogo Urala (Spectrazonal satellite images in estimation of climatic trends of forest vegetation on west slopes of Subpolar Ural). *Komp'juternaja optika*, 2011. Vol. 35, No. 2. P. 281-286.
6. Ojdupaa O.Ch., Vaganov E.A., Naurzabaev M.M. Dlitel'nye izmenenija letnej temperatury i radial'nyj rost listvennic na verhnej granice lesa v Altae-Sajanskoj gornoj strane (Prolonged Changes in Summer Temperature and Radial Increment of Larch Trees at the Upper Timberline in the Altai-Sayan Mountains). *Lesovedenie*, 2004. No. 6. P. 14-24.
7. Sochilova E.N., Ershov D.V. Analiz vozmozhnosti opredelenija zapasov drevesnyh porod po sputnikovym dannym Landsat ETM+ (Possibility analysis of stem volume of forests assessment using Landsat ETM data). *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*. 2012. Vol. 9. No. 3. P. 277-282.
8. Shijatov S.G., Terent'ev M.M., Fomin V.V. Prostranstvenno-vremennaja dinamika lesotundrovyyh soobshchestv na Poljarnom Urale (Spatiotemporal dynamics of forest-tundra communities in the Polar Urals). *Russian Journal of Ecology*, 2005. No. 2. P. 83-90. <https://doi.org/10.1007/s11184-005-0051-9>.
9. Shijatov S.G. Dinamika drevesnoj i kustarnikovej rastitel'nosti v gorah Poljarnogo Urala pod vlijaniem sovremennyh izmenenij klimata (Dynamics of tree and shrub vegetation in the mountains of the Polar Urals under the influence of modern climate change). Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 216 p.
10. Karlsen S.R., Elvebakk A.A. A method using indicator plants to map local climatic variation in the Kangerlussuaq/Scoresby sund area, East Greenland. *Journal of Biogeography*, 2003. Vol. 30, No. 10. P. 1469-1491.
11. Karlsen S.R., Elvebakk A., Hogda K.A., Johansen B. Satellite-based mapping of the growing season and bioclimatic zones in Fennoscandia. *Global Ecology and Biogeography*, 2006. Vol. 15, No. 4. P. 416-430.
12. Shutova E., Wielgolaski F.E., Karlsen S.R., Makarova O., Berlina N., Filimonova T., Haraldsson E., Aspholm L.F., Hogda K.A. Growing seasons of Nordic mountain birch in northernmost Europe as indicated by long-term field studies and analyses of satellite images. *International Journal Biometeorology*, 2006. Vol. 51. P. 155-166. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0042-y>.
13. Stehman V. Estimating the kappa coefficient and its variance under stratified random sampling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996. Vol. 62, No. 4. P. 401-407.