

Анализ временной серии снимков Landsat для выявления климатически обусловленных изменений в структуре ландшафтов острова Колгуев

А. Г. Шматова, Ю. А. Лощагина, П. М. Глазов

Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mail: a.shmatova@yandex.ru

Опробован метод анализа временных серий снимков Landsat для выявления климатически обусловленных ландшафтных изменений в тундровой зоне. В качестве модельной территории выбран о. Колгуев. Предложены способы решения проблем применения метода в этом регионе (облачность, гетерогенность ландшафта). Для получения статистически значимых результатов использована большая временная серия (1987–2020 гг., 12 временных срезов). Для этого опробованы критерии подбора снимков. Используются снимки без атмосферной коррекции со съёмочных систем Landsat-5, -7, -8, сделанные в период активной вегетации. Обучающая выборка для проведения классификации снимков создавалась по полевым описаниям ландшафтов, а затем увеличивалась и корректировалась в несколько этапов. Попиксельное сравнение классифицированных изображений позволило локализовывать изменения, благодаря чему возможно дополнительно уточнять обучающую выборку, а также лучше интерпретировать результаты. Наблюдаемые в каждом пикселе изменения были обобщены для всего региона и представлены в виде графиков. На них динамика суммарной площади класса разложена на составляющие переходы из/в другие классы. Рассчитанный коэффициент достоверной аппроксимации (R^2) отдельных трендов достигает 0,6. Интерпретация выявленных изменений проводилась в соответствии с ландшафтным значением классов и проверкой по более детальным снимкам. В результате на территории о. Колгуев было выявлено зарастание осоковых ложбин ивняками, пересыхание обводнённых территорий, «позеленение» мохово-лишайниковых тундр. При этом процессы деградации плоскобугристых болот на Колгуеве не выявлены, площадь открытых песков имеет слабый тренд на сокращение. Таким образом, рассмотренный метод можно рекомендовать для комплексного выявления изменений в структуре тундровых ландшафтов.

Ключевые слова: анализ временной серии, Landsat, динамика ландшафтов, изменение климата, тундра, Колгуев

Одобрена к печати: 12.05.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-149-164

Введение

Глобальные изменения климата наиболее значительно проявляются в Арктической зоне. Они приводят к различным ландшафтным трансформациям: увеличению глубины сезонного протаивания мерзлоты (Брушков, 2015; Оберман, 2007), вытаяванию полигонально-жильных льдов (Liljedahl et al., 2016), деградации мерзлотных бугров (Olvmo et al., 2020), изменениям в растительном покрове (Белоновская и др., 2016; Beamish et al., 2020; Heijmans et al., 2022; Lavrinenko, Lavrinenko, 2022; Lavrinenko et al., 2022).

Дистанционное изучение изменений в растительном покрове тундровой зоны в основном базируется на анализе динамики вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) (Myers-Smith et al., 2020). Во многих работах было показано увеличение этого индекса для большинства арктических территорий (Елсаков, 2017; Елсаков, Телятников, 2013; Тигеев и др., 2021), наряду с этим были выявлены также обратные процессы и пространственная неоднородность трендов NDVI (Bhatt et al., 2017; Fu et al., 2019; Lara et al., 2018; Phoenix, Bjerke, 2016).

Кроме анализа динамики NDVI существует и другой дистанционный метод, который позволяет более детально рассмотреть изменения структуры ландшафтов (*англ.* Land Cover Changes) в некотором регионе и, таким образом, объяснить тренды NDVI, а также выявить процессы, не связанные с растительностью. Метод основан на сравнении результатов клас-

сификации разновременных снимков. В основном он разработан для освоенных территорий (Mortey et al., 2023; Serra et al., 2003). Для тундровой зоны со слабоконтрастным и гетерогенным покровом работы единичны (Magnusson et al., 2021; Shevtsova et al., 2020). Количество изменений, выявляемых этим методом, пропорционально числу выделенных классов. Количество переходов между классами, число временных срезов и задачи работы определяют поиск различных подходов к последующей визуализации результатов. Это, например, матрица переходов (*англ.* Transition matrix) (Черных и др., 2018; Serra et al., 2003), визуализация на карте (Shevtsova et al., 2020), диаграммы Цепей Маркова (Magnusson et al., 2021) или другие варианты диаграмм (Черных и др., 2018; Mortey et al., 2023).

При рассмотрении двух-трёх временных срезов крайне важна точность самой классификации. Этого можно достичь разделением на контрастные, чётко выделяющиеся классы и/или тщательной подборкой и подготовкой снимков (Shevtsova et al., 2020). При этом оценить достоверность конечных результатов довольно сложно. В настоящей работе был выбран другой путь: подбор максимально дробного временного ряда. Это позволило проводить оценку точности как классификации, так и результатов.

Таким образом, цель настоящей работы состояла в том, чтобы опробовать и доработать метод выявления региональных изменений в структуре ландшафтов, который можно было бы применять для тундровой зоны. Для этого были поставлены задачи: 1) в условиях короткого вегетационного сезона и частой облачности разработать критерии подбора достаточного количества снимков для достижения статистической значимости временного ряда; 2) подобрать оптимальный метод классификации изображений и разработать последовательность создания обучающей выборки для достижения наибольшей точности при классификации гетерогенных и слабоконтрастных ландшафтов; 3) определить наиболее удобный для анализа способ сворачивания и наглядного представления большого объёма данных: результатов классификации и их попиксельного сравнения.

Объект

Анализ проводился для большей части территории о. Колгуев, которая представляет собой равнинные ландшафты зоны типичных и южных тундр. Климат острова субарктический, морской. В течение всех месяцев года на острове наблюдается значительная облачность (Атлас..., 1985). Разнообразие ландшафтов острова и их высокая неоднородность определяется тем, что Колгуев сформировался в период чередования стадий морских трансгрессий и этапов оледенения (Журавлёв и др., 2014). На острове распространены термокарстовые озёра и западины, в местах выхода песков встречаются котлы дефляции (Зинченко, 2014). На поверхности морских террас сформированы торфяники с многолетней мерзлотой на глубине 30 см. Всего на острове выделено семь геоботанических районов, различающихся наличием и обилием ивняков, ерника и лишайников в покрове (Лавриненко, 2012; Лавриненко и др., 2016).

Хозяйственная деятельность на о. Колгуев представлена нефтедобычей (сосредоточена в восточной части, не анализировавшейся в работе) и традиционным хозяйством коренного населения — выпасом оленей. Согласно работе И. А. Лавриненко (2018), техногенных нарушений растительного покрова на большей части территории острова не выявлено. При этом, как указано в другом исследовании (Лавриненко, Лавриненко, 2014), «начиная с 1990-х гг. и до настоящего времени практикуется вольный выпас», что вместе с превышенной пастбищной нагрузкой привело к тому, что «под влиянием почти столетнего выпаса лишайниковые покровы уступили место мохово-лишайниковым». Таким образом, можно считать, что основным драйвером изменений прямо или опосредованно выступает климат (через мерзлотно-ландшафтные условия и сукцессионные смены растительности).

Материалы

В работе использовались космические снимки со спутников Landsat-5, -7, -8, находящиеся в открытом доступе и имеющие уровень обработки L1TP (без атмосферной коррекции).

Подбор временной серии

В высоких широтах трассы пролёта спутников Landsat накладываются друг на друга, благодаря чему для исследованной территории была возможность использовать снимки с двух соседних орбитальных витков (табл. 1). В работе использовались по возможности все доступные летние (июль, август) снимки, за исключением тех, на которых присутствовали крупные снежники. Главным критерием включения снимка в работу была максимально свободная от облаков территория. Пригодность снимка (стадия вегетации, содержание аэрозолей в атмосфере, оптимальная влажность территории и т. д.) подтверждалась в процессе работы.

Таблица 1. Отобранные для работы космические снимки.
Красным выделены снимки, в дальнейшем исключённые из работы

Дата съёмки	Спутник	Высота Солнца, град	Кадр (Path; Row)
18.07.1987	Landsat-5	40,75–41,83	178; 011, 012
21.07.1989		40,07	179; 011
10.07.1990		41,72–42,77	177; 011, 012
29.07.1992		38,21	179; 011
28.07.1994		38,38	178; 011
27.08.1996		29,59–30,68	178; 011, 012
16.07.2001	Landsat-7	41,44–42,63	
16.07.2007	Landsat-5	41,58	178; 011
30.07.2009		38,58–39,77	178; 011, 012
01.08.2013	Landsat-8	38,23	178; 011
07.08.2015		36,74	
21.08.2017		32,31–33,56	178; 011, 012
30.07.2018		38,75	178; 011
18.08.2019		33,44	
19.07.2020		41,00	

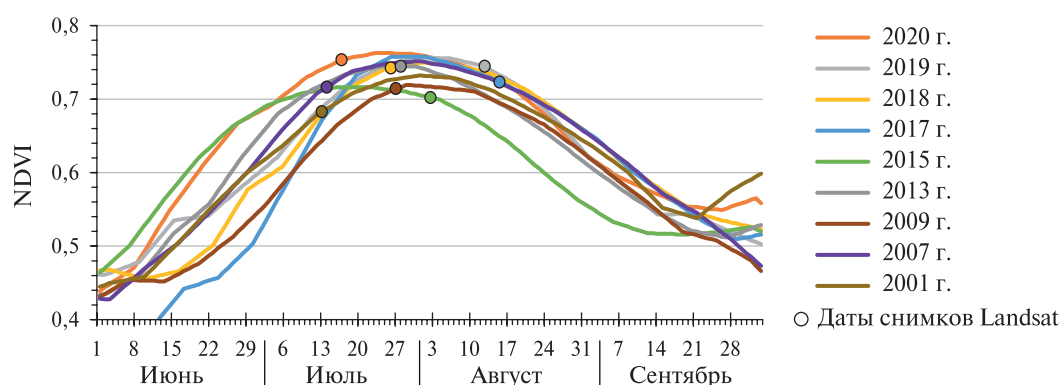


Рис. 1. Динамика 7-дневного NDVI для тундровых ландшафтов Ненецкого автономного округа по данным MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer); графики построены с использованием возможностей сервиса «Вега-Science» (<http://sci-vega.ru/>) (Лупян и др., 2011)

Если снимок классифицировался некорректно и выпадал из общего ряда, то он исключался: например, 1989 и 1990 гг. — неясная атмосферная дымка, 2018 г. — очень сухой год (см. табл. 1).

Была предпринята попытка использовать сентябрьские снимки, но они классифицировались некорректно. Однако нет полной уверенности, что это связано с сезоном, так как

могло быть вызвано и другими причинами (самая вероятная — иссушение ландшафта к концу сезона).

В итоге из всех имеющихся снимков было отобрано 12, лежащих в пределах периода наиболее активной вегетации (рис. 1, см. с. 151). Охваченный период составил 33 года (1987–2020). Максимальный временной разрыв между годами — 6 лет (2001–2007).

Подготовка снимков к анализу

При классификации изображений использовались следующие спектральные каналы: зелёный, красный, ближний инфракрасный и средний инфракрасный (1,55–1,75 мкм для Landsat-7 и Landsat-5; 1,65–1,66 мкм для Landsat-8). Сочетание красного и ближнего инфракрасного каналов даёт возможность оценивать интенсивность вегетации, средний инфракрасный — влажность, наиболее чётко выделять границы водных объектов. Зелёный канал был вспомогательным.

Все снимки были обрезаны по единой маске облачности (рис. 2). Для получения более точных результатов изначально были маскированы места весеннего присутствия снежников, относительно крутые склоны ($>13^\circ$) и овраги шириной около 60–90 м (2–3 пикселя)*. Долины рек (см. рис. 2) отсекались после проведения классификации, так как до этого они были важны для создания обучающей выборки. Таким образом, анализируемая площадь составила 2490 км².

Атмосферная коррекция снимков не проводилась, поскольку, во-первых, в ряде случаев использовались сшитые снимки с одного пролёта, а во-вторых, в любом случае коррекция была бы недостаточно точной, так как для исследуемой территории нет наземных данных о состоянии атмосферы.

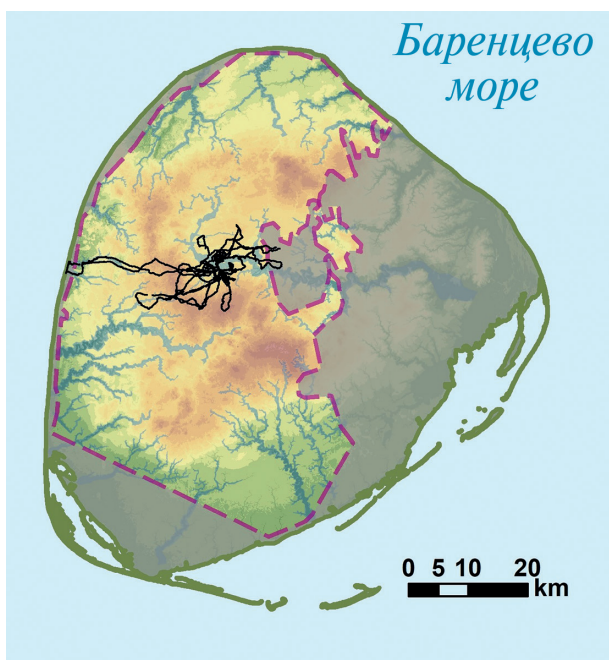


Рис. 2. Остров Колгуев. Границы маски облачности, треки полевых исследований и долины рек



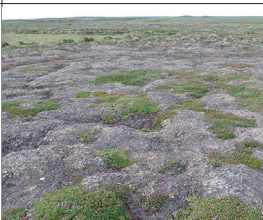



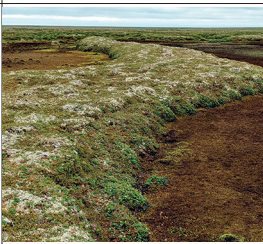



Методы

Подбор метода классификации

Классификация космических снимков была проведена путём автоматизированного дешифрирования с обучением методом опорных векторов (англ. Train Support Vector Machine Classifier) в программном пакете ArcGIS. Этот метод показал наилучшие результаты по сравнению с другими: Maximum Likelihood (максимального правдоподобия) и Train Random Trees (случайных деревьев) в ArcGIS; Gaussian Mixture Model (смесь нормальных распределений) (плагин dzetsaka), Spectral Angle Mapping (классификация по спектральному углу) и минимального расстояния (англ. Minimum Euclidean Distance) (плагин Semi-Automatic Classification) в Q-GIS).

* Склоны и овраги выделены на основе цифровой модели местности ArcticDEM, 5 м.

Таблица 2. Ландшафтная интерпретация классов и основных переходов между ними

Класс	Ландшафтная интерпретация класса		Фото	Предполагаемые переходы между классами и их интерпретация
Пески	Территории, лишённые растительного покрова (общее проективное покрытие <50 %)	Расположены на вершинах песчаных сопок и по бровкам рек. Их существование связано с пастбищной нагрузкой и дефляцией		→ лишайниковые тундры (зарастание открытых песков)
		Косы в руслах рек		—
Лишайниковые тундры	Территории, занятые растительными сообществами с высокой долей лишайников, в том числе выбитые мохово-лишайниковые тундры; сюда же относятся зарастающие мхом <i>Racomitrium lanuginosum</i> пески; территории сложены лёгкими отложениями; особенно распространены на морских террасах			→ пески (дефляция); → типичные тундры («позеленение»)
Типичные тундры	Кустарничково-моховые типичные тундры, в том числе редкоивовые и стланиковоерниковые; занимают преимущественно пологие суглинистые склоны; имеют широкий экологический ряд и граничат практически со всеми другими классами			→ ивняки (закустаривание)
Ивняки	Территории, занятые растительными сообществами с высокой долей кустарников (ив) высотой от полуметра; занимают нижние части склонов, пологие ложбины, высокие поймы рек			→ типичные тундры (угнетение вегетации ив)
Осоковые сообщества	Пологие ложбины, занятые сообществами с преобладанием разных видов осок, в том числе пушицы			→ ивняки (закустаривание)
Плоскобугристые болота	Плоскобугристые болота, где сочетаются контрастные по влажности, но с одинаково слабо вегетирующей растительностью бугры и мочажины; первые заняты кустарничковыми сообществами, вторые — сфагновыми сообществами с небольшой долей осок			→ обводненные территории (деградация торфяных бугров)
Обводненные территории	Болота и мелководья, занятые гигрофильными сообществами, проективное покрытие которых сильно варьирует; образуются при деградации плоскобугристых болот, реже — по берегам озёр			→ типичные тундры (пересыхание)
Вода	Озёра, в том числе термокарстового происхождения			→ обводнённые территории (пересыхание)
	Реки со старицами			—

Определение выделяемых классов

Количество классов в обучающей выборке было определено опытным путём таким образом, чтобы список состоял из минимального количества классов, имеющих как определённую ландшафтную интерпретацию, так и чёткое различие по спектральным признакам. Ландшафтная характеристика выделенных классов проводилась по материалам полевых описаний и данным высокодетальных космических снимков (для необследованных районов). Названия классам были даны по общему ландшафтному признаку, который отвечает за спектральный образ класса. Таким образом, были выделены следующие классы (табл. 2): пески, лишайниковые тундры, типичные тундры, ивняки, осоковые сообщества, плоскобугристые болота, обводнённые территории, водные объекты (озёра).

Исходя из литературных данных по другим регионам и общих представлений о ландшафте, можно предположить проявление следующих изменений ландшафтной структуры острова вследствие изменения климата: трансформацию растительных сообществ, включающую «позеленение», частными случаями которого являются закустаривание (Beamish et al., 2020; Heijmans et al., 2022) и увеличение доли трав (Белоновская и др., 2016; Heijmans et al., 2022; Lavrinenko, Lavrinenko, 2022); краткосрочные процессы угнетения растительности (Gamm et al., 2018; Phoenix, Vjerke, 2016); деградацию плоскобугристых болот (Olvmo et al., 2020); пересыхание озёр и обводнённых территорий; дефляцию или зарастание открытых песков. Далее необходимо определить, какие переходы между классами будут отображать данные ландшафтные изменения, если они проявляются на Колгуеве. Это было сделано на основании ландшафтной интерпретации классов (см. табл. 2). Предполагаемые климатически обусловленные переходы и их ландшафтная интерпретация приведены в последней колонке табл. 2. В дальнейшем это облегчило интерпретацию результатов, так как позволило выделить климатически обусловленные переходы среди всех выявленных.

Чтобы исключить не связанные с климатическими трендами изменения в долинах рек (сезонный уровень воды и затопление песчаных отмелей, первичные сукцессии растительности на пойме и т. д.), на полученных классифицированных изображениях они были отсечены (см. рис. 2).

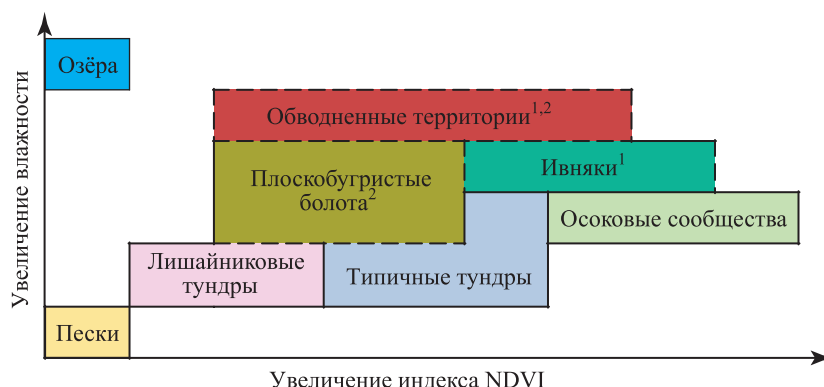


Рис. 3. Соотношение выделяемых классов по интенсивности вегетации и влажности. 1 — классы с лабильным диапазоном значений NDVI; 2 — классы с лабильным диапазоном влажности (см. рис. 4)

С точки зрения спектральных характеристик ландшафтные классы можно расположить в матрице по соотношению влажности (определялась по яркости в среднем инфракрасном канале) и по NDVI как показателю степени вегетационной активности (рис. 3). Видно, что осоковые сообщества характеризуются стабильными и более высокими значениями NDVI, чем другие классы, в том числе ивняки.

Создание обучающей выборки

Основой корректной классификации всех отобранных снимков было создание единой релевантной обучающей выборки. Идея заключалась в том, чтобы выделить участки, не изменившиеся в рассматриваемый период времени, и добиться максимально равномерного распределения эталонов по всей территории.

Выборку создавали в несколько этапов. На первом этапе основой были полевые описания ландшафтов (см. *рис. 2*). Далее проводилась первая классификация изображений и были выделены территории, оставшиеся неизменными в течение всего периода (операцию повторяли и на следующих этапах, при этом стабильно классифицируемая площадь никогда не превышала 50 %). Эти территории стали основой дальнейшего увеличения обучающей выборки и расширения на необследованные участки. Однако использование только выделенных неизменных участков приводило к переобучению и некорректным результатам.

Затем было выявлено, что положение некоторых классов в пространстве спектральных признаков в отдельные годы может смещаться относительно остальных классов (*рис. 4*). Так, класс плоскобугристых болот имеет лабильные значения яркости в среднем инфракрасном канале, ивняки — лабильные значения NDVI, а класс обводнённых территорий лабилен по обоим признакам. Для того чтобы изменчивость эталонов не влияла на результаты классификации, к проблемным классам были добавлены такие пиксели, которые бы компенсировали отклонения.

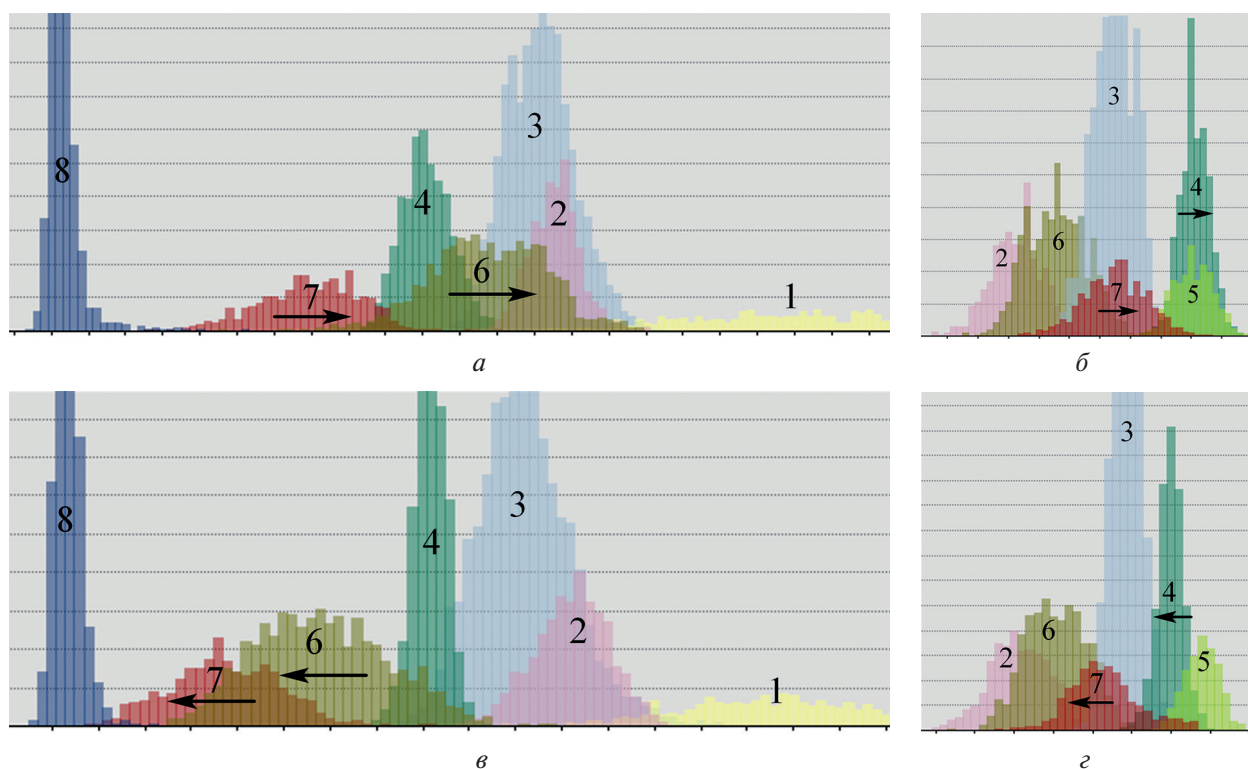


Рис. 4. Распределение яркости классов в среднем инфракрасном диапазоне (*а, в*); распределение NDVI классов (*б, г*). Стрелками обозначено смещение классов с лабильными спектральными образцами. Классы: 1 — пески; 2 — лишайниковые тундры; 3 — типичные тундры; 4 — ивняки; 5 — осоковые сообщества; 6 — плоскобугристые болота; 7 — обводнённые территории; 8 — водные объекты

Вследствие высокой пространственной неоднородности ландшафтов площадь отдельных эталонов для большинства классов составляла в среднем несколько десятков пикселей, что затрудняло увеличение выборки. В итоге обучающая выборка была представлена 926 полигонами общей площадью 16,5 км², т. е. 0,6 % от классифицируемой площади.

Сворачивание данных и визуализация

В результате автоматического дешифрирования снимков был получен ряд из 12 классифицированных изображений, которые сами по себе несут важную информацию о динамике площади каждого класса. Для того чтобы выявить, с какими переходами между классами связана динамика площади, последовательно было проведено сравнение классифицированных изображений и получено 11 *растров переходов* с информацией об изменении (56 вариантов переходов) или его отсутствии в каждом конкретном пикселе за один временной промежуток.

Ландшафты острова весьма мозаичны, и зачастую в пределах одного пикселя находится несколько фаций ландшафтов. В результате то, к какому классу будет отнесён пиксель, зависит от соотношения величин яркости компонентов. Это определяет нестабильность классовой принадлежности некоторых пикселей от года к году, а также то, что в некоторых случаях сумма спектров двух разных типов поверхности может оказываться близкой третьему. В то же время именно для мозаичных ландшафтов можно предположить наибольшую реакцию в ответ на климатические изменения. Для того чтобы среди шума случайных переходов выявить тренд направленных изменений, данные были обобщены для всего региона, а затем вместо 56 парных переходов А→Б и Б→А была оставлена только их разница (соответственно, 28 однонаправленных изменений в каждый временной интервал).

В качестве способа визуализации был выбран вид графиков как наиболее наглядный для отображения изменений во времени. На графиках были отражены не все переходы между классами (рис. 5, см. с. 157), а только имеющие значимый вклад в динамику общей площади класса (более 5 %).

Результаты

Данные, полученные предложенным методом

Полученные результаты включают в себя данные о динамике общей площади классов за 33-летний период (см. рис. 5, графики с заливкой фона, правая шкала) и данные об отдельных изменениях (переходах между классами), её слагающих (см. рис. 5, графики-линии, левая шкала). Так, например, динамика площади класса осоковых сообществ (см. рис. 5б) складывается из следующих компонентов: 1) направленного сокращения за счёт перехода в класс ивняков (бирюзовая линия), что можно интерпретировать как смену осоковых сообществ ивняками; 2) перехода в класс типичных тундр (серая линия), который вносит больший вклад в сокращение площади, однако менее стабилен и в основном определяет флуктуации в динамике общей площади класса.

Благодаря разложению на составляющие можно выявить скрытую динамику класса, когда общая его площадь не изменяется или имеет сложную закономерность. Например, класс ивняков (см. рис. 5а) расширяется за счёт класса осоковых сообществ (салатовая линия), при этом общая динамика площади класса имеет более сложную закономерность.

Достоверность полученных данных

В полученных рядах данных присутствуют выбросы (рис. 5г, д — 2007 г., рис. 5е — 1992 г., рис. 5ж — 1996 г.). Однако «аномальные» по некоторым классам годы достаточно «типичны» для остальных, поэтому снимки за эти годы использовались при анализе.

В отношении выбросов было возможно поступить тремя способами: если причина неясна, то или оставить (например, рис. 5е — 1992 г.), или исключить из ряда при значительном превышении (рис. 5а — 1996 г., рис. 5в, д — 2007 г.); в третьем случае, если удаётся установить причину, выброс можно убрать. Разберём на примере резкого обратимого перехода класса песков в лишайниковые тундры в 1996 г. (см. рис. 5ж). Если на растре переходов за интервал 1994–1996 гг. визуализировать только пиксели перехода «пески → лишайниковые тундры», то будет видно, где локализованы ошибочно классифицированные места (рис. 6а, см. с. 158).

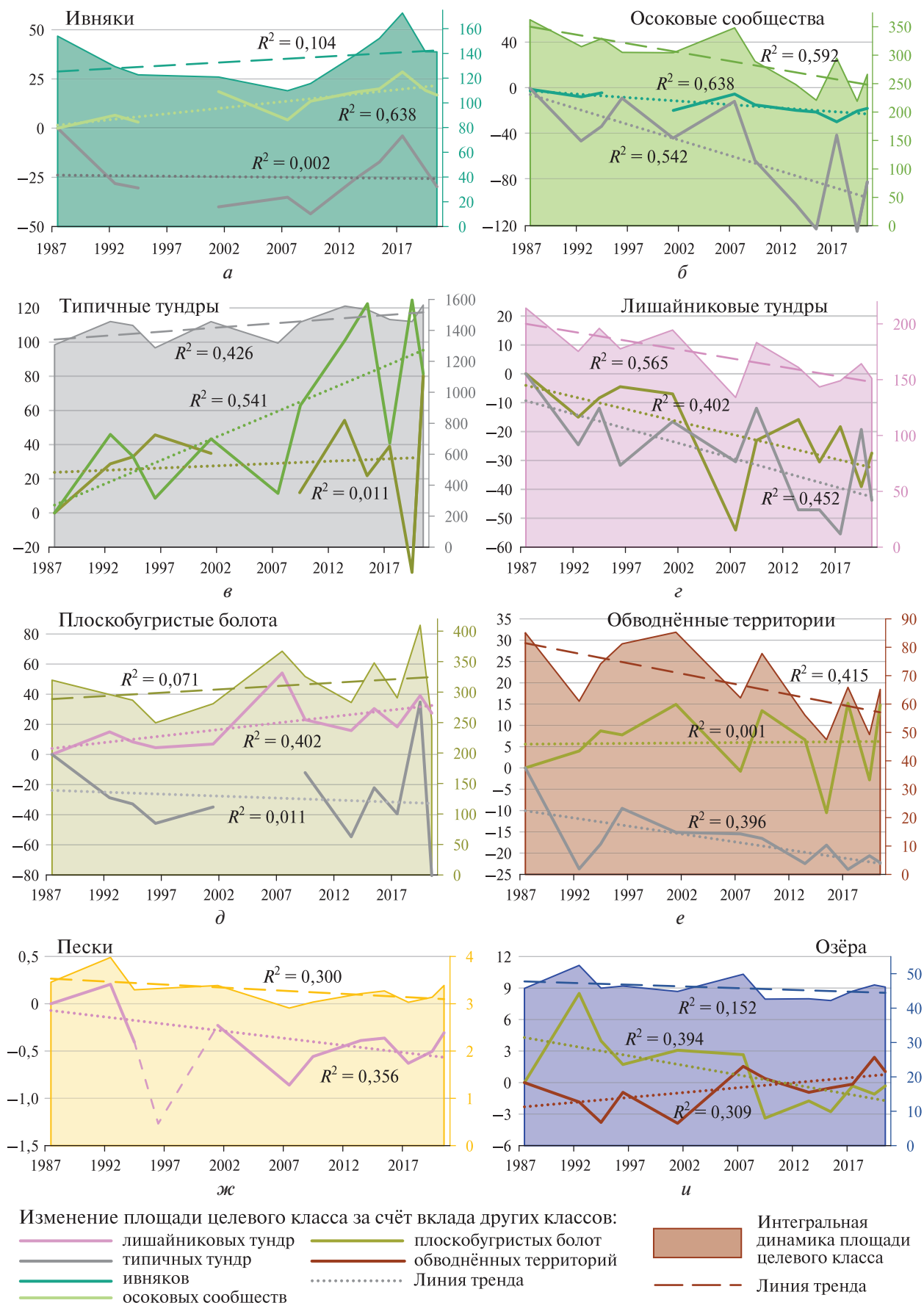


Рис. 5. Вклад переходов между отдельными классами (левая шкала, км²) в интегральную динамику площади целевого класса (правая шкала, км²)

Спектральные образы этих пикселей в 1996 г. имели пониженную яркость в среднем инфракрасном канале (рис. 6б), что связано с их большей влажностью.

Подобные случаи могут быть учтены на этапе доработки обучающей выборки.

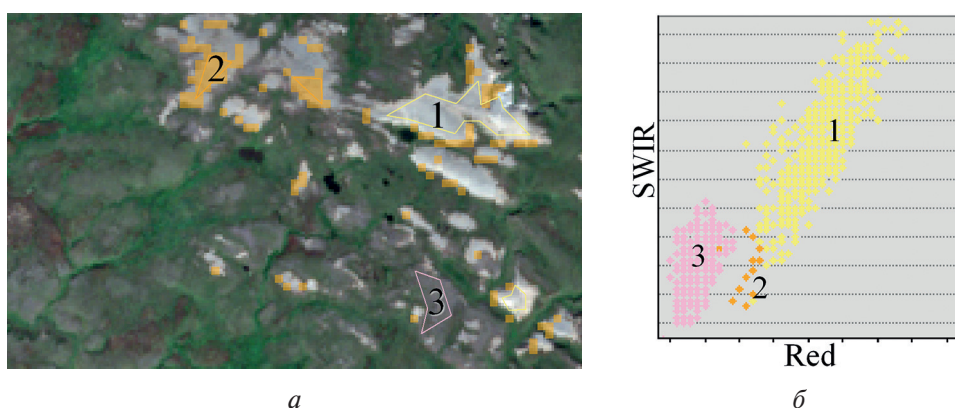


Рис. 6. Пиксели, отвечающие за выброс в данных по динамике площади песков (см. рис. 5ж): а — ошибочно классифицированные пиксели (оранжевые) на снимке Sentinel-2; б — распределение яркости пикселей песков (1), влажных песков (2) и лишайниковых тундр (3) в красном и среднем инфракрасном каналах

Для оценки достоверности выявленных изменений был рассчитан коэффициент достоверной аппроксимации (R^2). Стоит обратить внимание, что при разложении суммарной динамики на составляющие последние в ряде случаев имеют большую достоверность. Максимальные значения коэффициента аппроксимации (R^2) получены для тренда увеличения площади класса ивняков за счёт класса осоковых сообществ (см. рис. 5а, б) — 0,638 (по 11 значениям) и для тренда сокращения общей площади осоковых сообществ (см. рис. 5б) — 0,592 (по 12 значениям).

Обсуждение

Вопрос выбора оптимальной площади

Отклонения от общего тренда встречаются на всех этапах анализа, и их необходимо отсеивать. Соответственно, крайне важно изначально подбирать достаточно большой временной ряд. При этом возникает проблема облачности и приходится искать баланс между количеством снимков и необходимым охватом. При сокращении площади анализа может возникнуть проблема с подготовкой обучающей выборки. Редко встречающиеся классы придётся объединять с другими или маскировать, что может ухудшать понимание ландшафтной динамики, так как компоненты структуры ландшафта будут представлены недостаточно. Например, ивняки на изученной территории встречаются во всех ландшафтах, но преимущественно в виде совсем небольших ареалов (несколько пикселей) и только в южной части и по долинам рек — достаточно крупными массивами. Таким образом, наиболее крупные эталоны класса ивняков были выделены в этих областях, что увеличило объём выборки, а географическая репрезентативность достигалась за счёт рассеянных по остальной территории эталонов.

Интерпретация выявленных изменений

Сопоставление полученных графиков (см. рис. 5) с предложенной интерпретацией (см. табл. 2) возможных переходов между классами выявляет следующие процессы: зарастание осоковых ложбин ивняками (достоверность тренда — 0,64 по 11 точкам), «позеленение»

мохово-лишайниковых тундр (0,45 по 12 точкам), пересыхание обводнённых территорий (0,42 по 12 точкам). В то же время на Колгуеве не выявлено процессов деградации плоскобугристых болот. Площадь открытых песков отличается стабильными значениями и слабо выраженным трендом к сокращению ($R^2 = 0,36$ по 11 точкам), что входит в кажущееся противоречие с более ранней работой (Тишков и др., 2019), однако может быть объяснено расхождением как в региональном, так и во временном охвате. Также стоит учесть значительное различие в методиках и недостаточную для сравнения достоверность полученных трендов в обоих случаях.

Наряду с направленными изменениями, имеющими ландшафтную интерпретацию, были выявлены тренды переходов, для которых неочевиден ландшафтный процесс, их обуславливающий. Для того чтобы понять их природу, необходимо в первую очередь обратиться к растром переходов и более детальным космическим снимкам, как было сделано при выявлении причин выбросов (см. *рис. 6*). Так, смена класса осоковых сообществ типичными тундрами (см. *рис. 5б, в*), а лишайниковых тундр — плоскобугристыми болотами (см. *рис. 5г, д*) связана со специфическими ландшафтами: в первом случае — полигональными торфяниками, во втором — бугорковатыми тундрами. То есть переход между классами оказывается более специфичен и имеет более узкое ландшафтное значение, чем каждый из классов по отдельности. Таким образом, выделение направлений отдельных переходов между классами позволяет разделить компоненты ландшафта, имеющие один спектральный образ (в рассмотренном случае — осоковые сообщества и полигональные торфяники, плоскобугристые болота и бугорковатые тундры).

Стоит отметить, что доля бугорковатых тундр, попадающих в класс плоскобугристых болот, весьма значительна. В подобных случаях, когда класс представлен широким ландшафтным рядом (плоскобугристые болота, типичные тундры), направление изменения общей площади класса не имеет физического смысла (см. *рис. 5в, д*).

Также было установлено, что, напротив, по-отдельности не имеют значения переходы из класса/в класс водных объектов (см. *рис. 5и*). Пиксели, расположенные по берегам озёр и относящиеся к классам плоскобугристых болот или обводнённых территорий, зачастую ими не являются, а лишь имеют близкий спектр. Поэтому в данном случае можно судить лишь об общей динамике площади озёр.

Таким образом, при интерпретации результатов стоит не только обращать внимание на подразумеваемое ландшафтное значение классов, но и проверять гипотезы, сверяясь с локализацией переходов.

Заключение

В работе был успешно опробован метод анализа временной серии Landsat для выявления ландшафтных изменений в тундровой зоне.

При достаточной представленности временного ряда (12 снимков за период с 1987 по 2020 г.) была показана возможность сопоставления результатов классификации исходных снимков со съёмочных систем Landsat-5, -7, -8, сделанных в период наиболее активной вегетации. Анализируемая территория после маскирования облачности составила 2490 км², что для данного региона представляется максимально возможным и оптимальным для создания обучающей выборки при наиболее полном выявлении компонентов ландшафтов (восемь классов). Метод опорных векторов показал себя как наиболее подходящий для классификации изображений. Обучающая выборка была составлена с использованием наземных данных и скорректирована с учётом выявленных неизменных участков поверхности, вариации спектральных признаков классов. Была проведена корректировка обучающей выборки в соответствии с проверкой изменений по съёмке более высокого пространственного разрешения.

Выявить изменения, связываемые преимущественно с климатическими трендами, позволило маскирование редких и нестабильных участков на этапе подготовки снимков и отсечение долин на классифицированных изображениях. Полученная динамика площади классов была разложена на отдельные составляющие, что позволило выявить климатически

обусловленные изменения в структуре ландшафтов, в том числе в тех случаях, когда динамика общей площади класса не имеет определённой направленности, а также изменения, связанные с компонентами ландшафтов, имеющими один спектральный образ. Опробованный метод позволяет оценить достоверность выявленных изменений расчётом коэффициента достоверной аппроксимации (R^2).

Интерпретация результатов проводилась в соответствии с ландшафтным значением классов, их спектральными характеристиками и проверкой по более детальным снимкам. Это позволило выявить следующие климатически обусловленные изменения в структуре ландшафтов острова: зарастание осоковых ложбин ивняками ($R^2 = 0,64$), пересыхание обводнённых территорий ($R^2 = 0,42$), «позеленение» мохово-лишайниковых тундр ($R^2 = 0,45$), слабое сокращение площади открытых песков ($R^2 = 0,36$). Изменения, направленность которых имеет низкую достоверность, а также ряд выявленных ландшафтных трансформаций, природа которых неясна, требуют привлечения других методов для их проверки.

Таким образом, предложенный метод позволяет получать обобщённые по площади данные об отдельных переходах между классами, что указывает на ландшафтные изменения более или менее очевидной природы. Метод можно рекомендовать для анализа территорий тундровой зоны, в том числе с высокой гетерогенностью и мозаичностью. Верхний предел площади определяется частотой облачности в данном месте, а нижний — возможностью составления обучающей выборки, т.е. структурой ландшафта, его гетерогенностью и количеством значимых для анализа компонентов. Состав последних, их сочетание и возможные переходы должны быть определены с учётом полевых наблюдений. Для выявления региональной специфики процессов можно рекомендовать выполнять расчёт изменений не по всей территории, а по отдельным районам.

Статья подготовлена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-17-00168 «Биогеографические последствия изменений климата в Российской Арктике». Авторы благодарят Н. О. Тельнову за всестороннюю помощь в подготовке публикации.

Литература

1. Атлас Арктики. М.: ГУГК, 1985. 204 с.
2. Белоновская Е. А., Тишков А. А., Вайсфельд М. А., Глазов П. М., Кренке-мл. А. Н., Морозова О. В., Покровская И. В., Царевская Н. Г., Тертицкий Г. М. «Позеленение» Российской Арктики и современные тренды изменения её биоты // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2016. № 3. С. 28–39. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-28-39>.
3. Брушков А. В. Глобальные изменения окружающей среды, реакция криолитозоны и устойчивость инженерных сооружений // Инженерные изыскания. 2015. № 14. С. 14–26.
4. Елсаков В. В. Пространственная и межгодовая неоднородность изменений растительного покрова тундровой зоны Евразии по материалам съёмки MODIS 2000–2016 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 56–72. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72.
5. Елсаков В. В., Телятников М. Ю. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 260–271.
6. Журавлёв В. А., Кораго Е. А., Костин Д. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Сер. Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-39,40 — о. Колгуев — прол. Карские Ворота. Объяснительная записка. СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 405 с. https://webftp.vsegei.ru/GGK1000/R-39,40/R-39-40_ОбЗар.pdf.
7. Зинченко А. Г. Геоморфологическая схема. Масштаб 1:2 500 000 // Карта плиоцен-четвертичных образований. Лист R-39,40 (о. Колгуев — прол. Карские Ворота). СПб.: Картогр. фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 1 л.
8. Лавриненко И. А. Использование дистанционных методов при геоботаническом районировании восточно-европейских тундр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 269–276.

9. *Лавриненко И. А.* Карта техногенной нарушенности растительного покрова Ненецкого автономного округа // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 2. С. 128–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136.
10. *Лавриненко О. В., Лавриненко И. А.* Растительный покров оленьих пастбищ острова Колгуев: преемственность исследований и современные подходы // *Тр. Международ. науч. конф., посвященной 300-летию основания БИН РАН: Ботаника: История, теория, практика*. 2014. С. 124–131.
11. *Лавриненко И. А., Романенко Т. М., Лавриненко О. В.* Геоботаническое районирование острова Колгуев // *Решение актуальных проблем продовольственной безопасности крайнего севера: сб. ст. Мурманск: МАГУ, 2016. С. 101–105.*
12. *Лулян Е. А., Савин И. Ю., Барталев С. А., Толпин В. А., Балашов И. В., Плотников Д. Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности «Вега» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
13. *Оберман Н. Г.* Глобальное потепление и изменение криолитозоны Печоро-Уральского региона // *Разведка и охрана недр*. 2007. № 4. С. 63–68.
14. *Тигеев А. А., Московченко Д. В., Фахретдинов А. В.* Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 4. С. 166–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177.
15. *Тишков А. А., Белоновская Е. А., Глазов П. М., Кренке А. Н., Титова С. В., Царевская Н. Г., Шматова А. Г.* Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 4. С. 38–51. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-38-51.
16. *Черных Д. В., Бирюков Р. Ю., Золотов Д. В., Першин Д. К.* Пространственно-временная динамика ландшафтов водосборных бассейнов алтайского региона в последние 40 лет // *География и природные ресурсы*. 2018. № 3. С. 104–115. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(104-115).
17. *Beamish A., Reynolds M. K., Epstein H., Frost G. V., Macander M. J., Bergstedt H., Bartsch A., Kruse S., Miles V., Tanis C. M., Heim B., Fuchs M., Chabrilat S., Shevtsova I., Verdonen M., Wagner J.* Recent trends and remaining challenges for optical remote sensing of Arctic tundra vegetation: a review and outlook // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 246. Article 111872. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111872>.
18. *Bhatt U. S., Walker D. A., Reynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., Pinzon J. E., Tucker C. J., Steele M., Ermold W., Zhang J.* Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // *Environmental Research Letters*. 2017. V. 12. No. 5. Article 055003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0b>.
19. *Fu D., Su F., Wang J., Sui Y.* Patterns of Arctic Tundra Greenness Based on Spatially Downscaled Solar-Induced Fluorescence // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. No. 12. Article 1460. <https://doi.org/10.3390/rs11121460>.
20. *Gamm C. M., Sullivan P. F., Buchwal A., Dial R. J., Young A. B., Watts D. A., Cahoon S. M. P., Welker J. M., Post E.* Declining growth of deciduous shrubs in the warming climate of continental western Greenland // *J. Ecology*. 2018. V. 106. P. 640–654. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12882>.
21. *Heijmans M. M. P. D., Magnússon R., Lara M. J., Frost G. V., Myers-Smith I. H., van Huissteden J., Jorgenson M. T., Fedorov A. N., Epstein H. E., Lawrence D. M., Limpens J.* Tundra Vegetation Change and Impacts on Permafrost // *Nature Reviews Earth and Environment*. 2022. V. 3. P. 68–84. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00233-0>.
22. *Lara M. J., Nitzé I., Grosse G., Martin P., McGuire A. D.* Reduced arctic tundra productivity linked with landform and climate change interactions // *Scientific Reports*. 2018. V. 8. Article 2345. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20692-8>.
23. *Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A.* Twenty-one year dynamics of vegetation from long-term plots in East European tundra // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2022. V. 13. No. 2. P. 70–103. DOI: 10.18822/edgcc109513.
24. *Lavrinenko O. V., Tyusov G. A., Petrovskii V. V.* Impact of climate warming on floristic diversity of the East European tundra // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 2022. V. 13. No. 1. P. 25–34. DOI: 10.18822/edgcc101643.
25. *Liljedahl A. K., Boike J., Daanen R. P., Fedorov A. N., Frost G. V., Grosse G., Hinzman L. D., Iijma Y., Jorgenson J. C., Matveyeva N., Necsoiu M., Reynolds M. K., Romanovsky V. E., Schulla J., Tape K. D., Walker D. A., Wilson C. J., Yabuki H., Zona D.* Pan-arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. P. 312–318. <https://doi.org/10.1038/ngeo2674>.
26. *Magnusson R. I., Limpens J., Kleijn D., Huissteden K., Maximov T. C., Lobry S., Heijmans M. M. P. D.* Shrub decline and expansion of wetland vegetation revealed by very high resolution land cover change detection in the Siberian lowland tundra // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 782. Article 146877. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146877>.

27. *Mortey E. M., Annor T., Arnault J., Inoussa M. M., Madougou S., Kunstmann H., Nyantakyi E. K.* Interactions between Climate and Land Cover Change over West Africa // *Land*. 2023. V. 1. Article 355. <https://doi.org/10.3390/land12020355>.
28. *Myers-Smith I. H., Kerby J. T., Phoenix G. K., Bjerke J. W., Epstein H. E., Assmann J. J., John C., Andreu-Hayles L., Angers-Blondin S., Beck P. S., Berner L. T., Bhatt U. S., Bjorkman A. D., Blok D., Bryn A., Christiansen C. T., Cornelissen J. H. C., Cunliffe A. M., Elmendorf S. C., Forbes B. C., Goetz S. J., Hollister R. D., de Jong R., Loranty M. M., Macias-Fauria M., Maseyk K., Normand S., Olofsson J., Parker T. C., Parmentier F. J. W., Post E., Schaepman-Strub G., Stordal F., Sullivan P. F., Thomas H. J., Tommervik H., Treharne R., Tweedie C. E., Walker D. A., Wilmsking M., Wipf S.* Complexity revealed in the greening of the Arctic // *Nature Climate Change*. 2020. V. 10. P. 106–117. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0688-1>.
29. *Olymo M., Holmer B., Thorsson S., Reese H., Lindberg F.* Sub-arctic palsa degradation and the role of climatic drivers in the largest coherent palsa mire complex in Sweden (Vissátvuopmi), 1955–2016 // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. Article 8937. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65719-1>.
30. *Phoenix G. K., Bjerke J. W.* Arctic browning: Extreme events and trends reversing arctic greening // *Global Change Biology*. 2016. No. 22. P. 2960–2962. DOI: 10.1111/gcb.13261.
31. *Serra P., Pons X., Saurí D.* Post-classification change detection with data from different sensors: some accuracy considerations // *Intern. J. Remote Sensing*. 2003. V. 24. P. 3311–3340. DOI: 10.1080/0143116021000021189.
32. *Shevtsova I., Heim B., Kruse S., Schroeder J., Troeva E., Pestryakova L. A., Zakharov E. S., Herzs Schuh U.* Strong shrub expansion in tundra-taiga, tree infilling in taiga and stable tundra in central Chukotka (north-eastern Siberia) between 2000 and 2017 // *Environmental Research Letters*. 2020. V. 15. Article 085006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9059>.

Analysis of Landsat time series to identify climate-induced land cover changes on Kolguev Island

A. G. Shmatova, J. A. Loshchagina, P. M. Glazov

*Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: a.shmatova@yandex.ru*

A method for analyzing Landsat time series was tested to identify climate-induced land cover changes in the tundra zone. Kolguev Island was chosen as a model area. Ways of solving the problems of applying the method in this region (cloudiness, landscape heterogeneity) are proposed. Long time series (1987–2020, 12 time slices) were used to obtain statistically significant results. For this purpose, criteria for selecting images were tested. We used images without atmospheric correction from Landsat-5, -7, -8 taken during active vegetation period. The training sample for image classification was created based on field descriptions of landscapes and then increased and corrected in several stages. Pixel-by-pixel comparison of classified images allowed to localize changes, which let to further refine the training sample, as well as to better interpret the results. The changes observed in each pixel were summarized for the entire region and presented as graphs. On them, the dynamics of the total area of a land cover class was decomposed into constituent transitions to/from other classes. The calculated coefficient of reliable approximation (R^2) of some trends reached 0.6. Interpretation of the identified changes was carried out according to the landscape interpretation of the classes, their spectral characteristics and verification using more detailed images. Thus, the following changes were revealed on Kolguev Island: overgrowing of sedge communities with willows, drying up of fens and “greening” of moss-lichen tundras. At the same time, the processes of palsa mire degradation were not identified; the area of open sands had a weak trend towards reduction. Thus, the considered method can be recommended for a comprehensive identification of land cover changes in tundra landscapes.

Keywords: time series analysis, Landsat, land cover changes, climate change, tundra, Kolguev

Accepted: 12.05.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-149-164

References

1. *Atlas Arktiki* (Atlas of the Arctic), Moscow: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii, 1985, 204 p. (in Russian).
2. Belonovskaya E. A., Tishkov A. A., Vaisfeld M. A., Glazov P. M., Krenke Jr. A. N., Morozova O. V., Pokrovskaya I. V., Tsarevskaya N. G., Tertitskii G. M., “Greening” of the Russian Arctic and the Modern Trends of Transformation of Its Biota, *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Ser. geograficheskaya*, 2016, No. 3, pp. 28–39 (in Russian), <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-3-28-39>.
3. Brouchkov A. V., Global environmental changes, the permafrost zone response and engineering structures stability, *Inzhenernye izyskaniya*, 2015, No. 14, pp. 14–26 (in Russian).
4. Elsakov V. V., Spatial and interannual heterogeneity of changes in the vegetation cover of Eurasian tundra: Analysis of 2000–2016 MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 56–72 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72.
5. Elsakov V. V., Teljatnikov M. Y., Effects of interannual climatic fluctuations of the last decade on NDVI in north-eastern European Russia and Western Siberia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 260–271 (in Russian).
6. Zhuravlev V. A., Korago E. A., Kostin D. A. et al., *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Ser. Severo-Karsko-Barentsevomorskaya. List R-39,40 — o. Kolguev — prol. Karskie Vorota. Ob'yasnitel'naya zapiska* (State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Ser. North Kara-Barents Sea. Sheet R-39,40 — Kolguev island — prol. Kara Gate. Explanatory Letter), Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2014, 405 p. (in Russian), https://webftp.vsegei.ru/GGK1000/R-39,40/R-39-40_ObZap.pdf.
7. Zinchenko A. G., Geomorphological scheme Scale 1:2 500 000, In: *Map of the Pliocene-Quaternary formations. Sheet R-39,40 (Kolguev Island — Kara Gate Strait.)*, Saint Petersburg: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2014, 1 p. (in Russian).
8. Lavrinenko I. A., Using remote sensing for geobotanical zoning of the East European tundra, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 269–276 (in Russian).
9. Lavrinenko I. A., Map of technogenic disturbance of Nenets Autonomous District, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 128–136 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-128-136.
10. Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A., Vegetation cover of reindeer pastures of Kolguev Island: continuity of research and modern approaches, *Trudy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 300-letiyu osnovaniya BIN RAN: Botanika: Istoriya, teoriya, praktika* (Proc. Intern. Scientific Conf. Dedicated to the 300th Anniversary of BIN RAS: Botany: History, Theory, Practice), 2014, pp. 124–131 (in Russian).
11. Lavrinenko I. A., Romanenko T. M., Lavrinenko O. V., Geobotanical zoning of Kolguev Island, *Reshenie actual'nykh problem prodovol'stvennoi bezopasnosti krainego severa*, Murmansk: MAGU, 2016, pp. 101–105 (in Russian).
12. Loupian E. A., Savin I. Yu., Bartalev S. A., Tolpin V. A., Balashov I. V., Plotnikov D. E., Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198 (in Russian).
13. Oberman N. G., Global warming and change in the permafrost zone of the Pechora-Ural region, *Razvedka i okhrana nedr*, 2007, No. 4, pp. 63–68 (in Russian).
14. Tigeev A. A., Moskovchenko D. V., Fahretidinov A. V., Current trends in natural and anthropogenic vegetation in Western Siberia's sub-tundra forests based on vegetation indices data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 166–177 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177.
15. Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Glazov P. M., Krenke A. N., Titova S. V., Tsarevskaya N. G., Shmatova A. G., Anthropogenic transformation of the Russian Arctic ecosystems: approaches, methods, assessments, *Arctic: ecology and economy*, 2019, No. 4, pp. 38–51 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2019-4-38-51.
16. Chernykh D. V., Biryukov R. Yu., Zolotov D. V., Pershin D. K., Spatiotemporal dynamics of landscapes of plain and mountain catchments in the Altai region during the last 40 years, *Geography and Natural Resources*, 2018, Vol. 39, No. 3, pp. 228–238, DOI: 10.1134/S187537281803006X.
17. Beamish A., Reynolds M. K., Epstein H., Frost G. V., Macander M. J., Bergstedt H., Bartsch A., Kruse S., Miles V., Tanis C. M., Heim B., Fuchs M., Chabrillat S., Shevtsova I., Verdonen M., Wagner J., Recent trends and remaining challenges for optical remote sensing of Arctic tundra vegetation: a review and outlook, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 246, Article 111872, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111872>.
18. Bhatt U. S., Walker D. A., Reynolds M. K., Bieniek P. A., Epstein H. E., Comiso J. C., Pinzon J. E., Tucker C. J., Steele M., Ermold W., Zhang J., Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables, *Environmental Research Letters*, 2017, Vol. 12, No. 5, Article 055003, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0b>.

19. Fu D., Su F., Wang J., Sui Y., Patterns of Arctic Tundra Greenness Based on Spatially Downscaled Solar-Induced Fluorescence, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 12, Article 1460, <https://doi.org/10.3390/rs11121460>.
20. Gamm C. M., Sullivan P. F., Buchwal A., Dial R. J., Young A. B., Watts D. A., Cahoon S. M. P., Welker J. M., Post E., Declining growth of deciduous shrubs in the warming climate of continental western Greenland, *J. Ecology*, 2018, Vol. 106, pp. 640–654, <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12882>.
21. Heijmans M. M. P. D., Magnússon R., Lara M. J., Frost G. V., Myers-Smith I. H., van Huissteden J., Jorgenson M. T., Fedorov A. N., Epstein H. E., Lawrence D. M., Limpens J., Tundra Vegetation Change and Impacts on Permafrost, *Nature Reviews Earth and Environment*, 2022, Vol. 3, pp. 68–84, <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00233-0>.
22. Lara M. J., Nitze I., Grosse G., Martin P., McGuire A. D., Reduced arctic tundra productivity linked with landform and climate change interactions, *Scientific Reports*, 2018, Vol. 8, Article 2345, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20692-8>.
23. Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A., Twenty-one year dynamics of vegetation from long-term plots in East European tundra, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2022, Vol. 13, No. 2, pp. 70–103, DOI: 10.18822/edgcc109513.
24. Lavrinenko O. V., Tyusov G. A., Petrovskii V. V., Impact of climate warming on floristic diversity of the East European tundra, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2022, Vol. 13, No. 1, pp. 25–34, DOI: 10.18822/edgcc101643.
25. Liljedahl A. K., Boike J., Daanen R. P., Fedorov A. N., Frost G. V., Grosse G., Hinzman L. D., Iijma Y., Jorgenson J. C., Matveyeva N., Necsoiu M., Reynolds M. K., Romanovsky V. E., Schulla J., Tape K. D., Walker D. A., Wilson C. J., Yabuki H., Zona D., Pan-arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology, *Nature Geoscience*, 2016, Vol. 9, pp. 312–318, <https://doi.org/10.1038/ngeo2674>.
26. Magnusson R. I., Limpens J., Kleijn D., Huissteden K., Maximov T. C., Lobry S., Heijmans M. M. P. D., Shrub decline and expansion of wetland vegetation revealed by very high resolution land cover change detection in the Siberian lowland tundra, *Science of the Total Environment*, 2021, Vol. 782, Article 146877, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146877>.
27. Mortey E. M., Annor T., Arnault J., Inoussa M. M., Madougou S., Kunstmann H., Nyantakyi E. K., Interactions between Climate and Land Cover Change over West Africa, *Land*, 2023, Vol. 1, Article 355, <https://doi.org/10.3390/land12020355>.
28. Myers-Smith I. H., Kerby J. T., Phoenix G. K., Bjerke J. W., Epstein H. E., Assmann J. J., John C., Andreu-Hayles L., Angers-Blondin S., Beck P. S., Berner L. T., Bhatt U. S., Bjorkman A. D., Blok D., Bryn A., Christiansen C. T., Cornelissen J. H. C., Cunliffe A. M., Elmendorf S. C., Forbes B. C., Goetz S. J., Hollister R. D., de Jong R., Loranty M. M., Macias-Fauria M., Maseyk K., Normand S., Olofsson J., Parker T. C., Parmentier F. J. W., Post E., Schaepman-Strub G., Stordal F., Sullivan P. F., Thomas H. J., Tommervik H., Treharne R., Tweedie C. E., Walker D. A., Wilmking M., Wipf S., Complexity revealed in the greening of the Arctic, *Nature Climate Change*, 2020, Vol. 10, pp. 106–117, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0688-1>.
29. Olvmo M., Holmer B., Thorsson S., Reese H., Lindberg F., Sub-arctic palsa degradation and the role of climatic drivers in the largest coherent palsa mire complex in Sweden (Vissátvuopmi), 1955–2016, *Scientific Reports*, 2020, Vol. 10, Article 8937, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65719-1>.
30. Phoenix G. K., Bjerke J. W., Arctic browning: Extreme events and trends reversing arctic greening, *Global Change Biology*, 2016, No. 22, pp. 2960–2962, DOI: 10.1111/gcb.13261.
31. Serra P., Pons X., Sauri D., Post-classification change detection with data from different sensors: some accuracy considerations, *Intern. J. Remote Sensing*, 2003, Vol. 24, pp. 3311–3340, DOI: 10.1080/0143116021000021189.
32. Shevtsova I., Heim B., Kruse S., Schroeder J., Troeva E., Pestryakova L. A., Zakharov E. S., Herzschuh U., Strong shrub expansion in tundra-taiga, tree infilling in taiga and stable tundra in central Chukotka (north-eastern Siberia) between 2000 and 2017, *Environmental Research Letters*, 2020, Vol. 15, Article 085006, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9059>.