## Картографирование наземных экосистем Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей на основе восстановленных мультивременных спутниковых данных Landsat

Е.А. Гаврилюк<sup>1</sup>, А.С. Плотникова<sup>1</sup>, Д.Е. Плотников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН Москва, 117997, Россия E-mail: egor@ifi.rssi.ru <sup>2</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

Работа посвящена созданию актуальной тематической карты лесных и прочих наземных экосистем на территорию Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей на основе спутниковых данных Landsat. Мы использовали метод восстановления мультивременных серий спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, чтобы компенсировать нехватку безоблачных разносезонных наблюдений в течение года для всей интересующей нас территории. На основе восстановленных измерений мы сформировали четыре разносезонных трёхканальных (в красном, ближнем ИК и среднем ИК диапазонах) композитных изображения, которые совместно с информацией о рельефе местности (ЦМР по данным ALOS и ASTER) использовались для объектно-ориентированной тематической классификации. Сегментация спутниковых изображений выполнялась алгоритмом Full Lambda Schedule, классификация — методом случайных лесов. В качестве переменных для классификации использовались базовые статистические метрики (среднее, стандартное отклонение, максимум, минимум и др.), рассчитанные в пределах каждого сегмента по всем каналам разносезонных композитных изображений, спектральным индексам, полученным на их основе, а также ЦМР и её производным. Мы оценивали информативность статистических метрик и исходных признаков в процессе обучения классификатора с целью определения минимального необходимого набора переменных для достижения наилучшей разделимости тематических классов. В результате на основе 11 наиболее информативных переменных (средние значения в каналах зимнего, весеннего и летнего композитных изображений, а также высот и крутизны склонов ЦМР) мы получили карту с общей точностью классификации 90,8 %. Оценка точности была произведена с использованием выбранных случайным образом контрольных точек. Полученная карта наземных экосистем предназначена для дальнейшего использования в качестве исходных данных при разработке методов динамического картографирования пожарных режимов лесов на локальном уровне.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, тематическое картографирование, восстановление временных серий, наземные экосистемы, лес, Печоро-Илычский заповедник, Landsat, Full Lambda Schedule, Random Forest

Одобрена к печати: 15.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-141-153

### Введение

В настоящее время мультиспектральные спутниковые изображения высокого и среднего пространственного разрешения являются универсальным, оперативным и общедоступным материалом для картографирования наземных экосистем нашей планеты. Помимо большого количества локальных исследований (Курбанов и др., 2014), ряд научных работ последних лет продемонстрировал широкие возможности использования данных спутниковой системы Landsat для тематического картографирования растительности как на уровне отдельных стран и регионов (Ершов и др., 2015; Li et al., 2014; Thompson et al., 2015), так и в глобальном масштабе (Chen et al., 2014; Hansen et al., 2013) ввиду достаточно высокой пространственной детальности съёмки и наличия необходимых спектральных каналов. Использование серии разновременных спутниковых изображений, отражающих последовательность фенологических изменений лесного покрова в течение всего года, позволяет существенно повысить точность тематической классификации при оценке породной структуры древостоев (Барталев и др., 2016; Гаврилюк, Ершов, 2012; Pasquarella et al., 2018; Zhu, Liu, 2014). Ввиду низкой частоты повторной съёмки спутниковой системой Landsat (одно наблюдение в 8–16 дней) получение непрерывной серии безоблачных наблюдений земной поверхности в течение года является затруднительным. Данная проблема может быть решена путём совместного использования спутниковых данных разных лет (часто и их бывает недостаточно) либо применением методов восстановления пропущенных наблюдений, из которых наиболее известными являются, в частности, STARFM и STDFA (Gao et al., 2006; Wu et al., 2015, 2016).

Леса Печоро-Илычского государственного природного биосферного заповедника становились объектом многих научных исследований, в том числе содержащих результаты тематического картографирования (Елсаков, Марущак, 2011; Ершов и др., 2017), однако для большей части прилегающих к нему районов подобная информация отсутствует. Целью нашей работы было создание актуальной тематической карты лесных и прочих наземных экосистем заповедника и его окрестностей в пределах Припечорской низменности по спутниковым данным Landsat. Мы использовали восстановленные мультивременные серии спутниковых изображений, чтобы компенсировать нехватку безоблачных разносезонных наблюдений в течение одного года для всей интересующей нас территории в сочетании с объектно-ориентированным подходом при их тематической обработке. Полученная карта наземных экосистем предназначена, прежде всего, для использования в качестве опорных данных при разработке методов динамического картографирования пожарных режимов лесов на локальном уровне в рамках проекта РФФИ № 17-05-00300 совместно с уже имеющимися результатами работ по восстановлению истории лесных пожаров данного региона (Алейников и др., 2015; Drobyshev et al., 2004).

#### Материалы и методы

Территория исследования расположена в пределах Троицко-Печорского муниципального района на юго-востоке Республики Коми. Помимо Печоро-Илычского заповедника, в неё



Рис. 1. Расположение территории исследования

включены части прилегающих Комсомольского и Печоро-Илычского лесничеств (рис. 1). По ландшафтным признакам данная территория может быть разделена на равнинный, предгорный и горный районы, которые последовательно сменяют друг друга при перемещении с запада на восток от Припечорской низменности к хребтам северного Урала. Общая площадь территории составляет примерно 14,2 тыс. км<sup>2</sup>, около 90 % которой покрыто среднетаёжными лесами с преобладанием темнохвойных (ель, в меньшей степени пихта и очень редко кедр) или светлохвойных (сосна, очень редко лиственница) пород в пологе, но также встречаются и участки лиственных древостоев (берёза, очень редко осина и прочие).

В работе была использована цифровая модель высот ALOS World 3D — 30 m (AW3D30) версии 2.1 (http://www. eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm) в качестве источника информации о рельефе местности (далее — ЦМР). Участки пропущенных значений в ЦМР ALOS заполнялись на основе альтернативной цифровой модели высот ASTER GDEM версии 2 (https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp). Кроме значений высот сформированной ЦМР мы использовали стандартные производные показатели крутизны и ориентации склонов, также извлечённые из модели рельефа.

В качестве основы для формирования обучающей выборки для тематической классификации мы использовали карту основных типов наземных экосистем Печоро-Илычского заповедника по состоянию на 2014 г. (далее — Карта 2014 г.), созданную в рамках проекта РФФИ № 13-04-01521 (Ершов и др., 2017), а также актуальные данные проекта Global Forest Change (далее — GFC) о сомкнутости и изменениях лесного покрова (Hansen et al., 2013).

Исходный набор спутниковых данных состоял из 960 сцен Landsat (продукт уровня L2 для приборов ETM+ и OLI) из открытого архива Геологической службы США (https:// earthexplorer.usgs.gov) за период с 2014 по 2016 г., содержащих измерения спектральной яркости на уровне земной поверхности в трёх информативных для мониторинга растительности спектральных каналах — красном (далее — RED, 0,63–0,69 мкм), ближнем инфракрасном (NIR, 0,75–0,9 мкм) и первом среднем инфракрасном (SWIR, 1,55–1,75 мкм) с пространственным разрешением 30 м. Получение и обработка данных осуществлялась с частичным использованием ресурсов ЦКП ИКИ РАН (Лупян и др., 2015).

Предварительная обработка изображений включала в себя маскирование участков облачности и теней от неё модифицированным алгоритмом FMASK (Колбудаев и др., 2016), а также воссоздание временных серий безоблачных измерений на основе метода локализованного поиска объектов земной поверхности со схожей многолетней динамикой спектрально-отражательных характеристик. Указанный метод позволяет находить и выбирать наиболее подходящие спектрально-динамические эталоны восстанавливаемого объекта в процессе пространственно-временного анализа временных серий предварительно обработанных изображений Landsat. Прогнозирование значений коэффициентов спектральной яркости восстанавливаемого объекта происходит на основе известных спектрально-отражательных характеристик его эталонов и их весов, а также найденных в процессе поиска уравнений, описывающих спектрально-динамические связи внутри группы схожих объектов. Восстановление изображений осуществлялось для всех дат съёмки, в достаточной мере обеспеченных безоблачными измерениями. Более подробно метод восстановления и условия его работы описаны, в частности, в работе (Плотников и др., 2018). Для формирования непрерывного и регулярного временного ряда на заключительном этапе использовался метод интерполяции временных серий скользящим полиномом второй степени (Плотников и др., 2014), который, помимо собственно интерполяции, также позволил вернуть часть пропущенных измерений, ошибочно отнесённых к облачности или теням от неё на этапе предварительной обработки. Каждый спектральный канал был восстановлен независимо от остальных.

В результате восстановления была сформирована временная серия ежедневных измерений в RED, NIR и SWIR диапазонах длин волн в интервале с 20 февраля по 1 октября 2016 г. на всю территорию исследования. Пример поэтапного восстановления изображения Landsat на часть территории заповедника приведён на *puc. 2* (см. с. 144).

Ежедневные данные далее были осреднены по условным сезонам, формируя четыре разносезонных трёхканальных композитных изображения (композита). Периоды были определены по результатам визуального анализа восстановленных изображений: до 10 мая («зима»), с 10 мая до 10 июня («весна»), с 10 июня до 10 августа («лето») и с 10 августа до 10 сентября («осень»). Для каждого композитного изображения также рассчитывались спектральные индексы NDVI (Rouse et al., 1974) и SWVI (также известен как NDWI, (Gao, 1996)) в качестве дополнительных признаков для тематической классификации.

Мы использовали объектно-ориентированный подход к классификации, подразумевающий предварительную сегментацию (выделение однородных участков) изображений, после которой все дальнейшие процессы тематической обработки проводятся на уровне сегментов, а не пикселей. В нашем случае это позволило снизить влияние неоднородностей, артефактов и частичных пропусков данных в восстановленных композитных изображениях на результат последующей классификации. Границы сегментов были выделены автоматически по летнему композиту и ЦМР алгоритмом Full Lambda Schedule (Redding et al., 1999) с масштабом, равным 20 (величина, эквивалентная среднему размеру сегмента в пикселях изображения).

Из сегментов площадью не менее 1 га, полностью покрытых восстановленными разносезонными композитами, тематически однородных по Карте 2014 г. и не содержащих изменений по данным GFC, была сформирована обучающая выборка для последующей автоматической классификации спутниковых изображений. Из исходного набора классов Карты 2014 г. мы выделили десять основных типов наземных экосистем, разграничение которых принципиально при оценке пожарных режимов: леса с преобладанием темнохвойных, светлохвойных и лиственных пород, смешанные хвойные (елово-сосновые) и хвойно-лиственные леса, горная тундра, болота, луга, открытые грунты (включая скалы и гольцы) и водные объекты. Учитывая орографические особенности территории, с использованием ЦМР были выделены три дополнительных класса горных (высота более 500 м) темнохвойных, смешанных хвойнолиственных и лиственных лесов для компенсации различий в спектральных характеристиках с равнинными и предгорными лесами тех же классов. Всего было получено 14 418 эталонных сегментов общей площадью 66,9 тыс. га (4,7 % от общей площади территории картографирования и менее 2 % от общего числа сегментов).

Тематическая классификация проводилась методом случайных лесов (Breiman, 2001) с базовыми статистическими метриками, рассчитанными в пределах каждого сегмента по всем исходным спектральным (каналы восстановленных композитных изображений и производные индексы) и орографическим (высота, крутизна и ориентация склонов) признакам в качестве переменных. Случайные леса позволяют оценивать информативность переменных и качество выстроенной на их основе классификационной модели. Для этого методом Out-of-bag (OOB) в процессе обучения оценивается потенциальная вероятность ошибочной классификации при использовании полученной модели (характеризуется величинами OOB-точности и/или OOB-каппы, рассчитанными по матрице ошибок распознавания исходной обучающей выборки), а также вычисляются показатели MDA (Mean Decrease in Accuracy), характеризующие влияние каждой переменной на величину этой вероятности (Liaw, Wiener, 2002). Мы использовали эти показатели при выявлении наиболее значимых спектральных и орографических признаков и рассчитанных на их основе статистических метрик сегментов с целью формирования оптимального набора переменных для тематической классификации.



*Рис. 2.* Пример поэтапного восстановления изображения Landsat за 9 июня 2016 г. для части территории Печоро-Илычского заповедника: исходное изображение после исключения облачности и теней (*слева*), результат восстановления (*в центре*), результат после интерполяции серии восстановленных изображений (*справа*)

Ввиду отсутствия актуальной открытой информации (как геопространственной, так и статистической) о структуре наземных экосистем в границах территории исследования для верификации полученной карты мы использовали контрольные точки, выбранные случайным образом. Точки распределялись пропорционально площадям тематических классов (но не менее 20 на класс) только на территориях Якшинского и Курьинского участковых лесничеств, которые не участвовали в формировании обучающей выборки. Тематическая принадлежность контрольных участков определялась путём визуальной интерпретации исходных данных Landsat и спутниковых изображений высокого пространственного разрешения DigitalGlobe (digitalglobe.com).

#### Результаты и обсуждение

На основе восстановленной мультивременной серии данных Landsat мы получили четыре разносезонных трёхканальных композитных изображения в качестве основы для тематической классификации (*puc. 3*). Качество и полнота восстановления данных варьирует в зависимости от времени года и спектрального диапазона (*maбл. 1*). Среди спектральных каналов лучшие результаты восстановления для всех четырёх сезонов были получены в ближнем инфракрасном диапазоне. В максимальной мере удалось восстановить данные для летнего периода, очевидно благодаря наибольшему числу безоблачных наблюдений в течение года. Минимальная доля восстановленных данных соответствует осеннему периоду, для которого характерна высокая частота облачных дней.

Каналы	Доля общей площади, покрытая восстановленными данными, %										
	Зима	Весна	Лето	Осень	Все сезоны	Три сезона (без осени)					
RED	93,7	95,3	99,8	59,3	58,8	93,5					
NIR	96,1	96,8	99,8	73,6	73,4	96,0					
SWIR	93,4	95,3	99,8	73,6	72,8	93,3					
Все каналы	91,1	93,8	99,8	52,3	51,6	90,9					

Таблица 1. Успешность восстановления данных Landsat по каналам и сезонам



*Рис. 3.* Фрагменты восстановленных разносезонных композитных изображений. *Слева направо*: зима, весна, лето, осень. Синтез RGB: NIR-SWIR-RED



*Рис. 4.* Оценки информативности переменных при обучении классификатора: *a*, *б* — отмасштабированные величины MDA для статистических метрик и исходных признаков (больше — лучше); *в* — ООВ-точность и ООВ-каппа классификационной модели при использовании разных наборов обучающих признаков

Пространственное расположение пропусков данных характеризуется высокой концентрацией в предгорном и горном районах Печоро-Илычского заповедника. С учётом того, что на этих участках также происходило обучение классификатора, осенний композит был исключён из процесса тематической классификации. Доля территории исследования, покрытой информативными значениями в трёх сезонных композитных изображениях, полученных на основе восстановленных спутниковых данных, составила 90,9 %, а с учётом обработки на уровне сегментов — 95,8 %. Оставшиеся участки, для которых не удалось восстановить данные в полном объёме, представлены главным образом скалами и открытыми грунтами (58 %), горной тундрой (22,4 %), водной поверхностью (3,4 %), луговой растительностью (3,1 %), а также следами недавних пожаров, вырубок и ветровалов. Лесные и болотные экосистемы, будучи наиболее стабильными с точки зрения межгодовой динамики спектральной яркости, характеризуются наилучшими результатами восстановления.

Анализ информативности базовых статистических метрик сегментов при обучении классификационной модели случайных лесов не выявил значимой прибавки к точности распознавания тематических классов за счёт использования показателей, отличных от среднего значения. Среднее, медиана, максимум и минимум показали близкие значения MDA при одновременном использовании всех тестируемых метрик (*puc. 4a*), но лишь за счёт высокой корреляции между собой (R > 0,9). При использовании только одного среднего в сочетании с некоррелированными метриками — стандартным отклонением, разбросом и коэффициентом вариации, малая значимость последних явно прослеживается. При этом общая OOB-точность классификационной модели остаётся примерно на одном уровне (более 94%) даже при отказе от всех метрик, кроме среднего. По всей видимости, это связано с относительно низким пространственным разрешением данных Landsat, так как для данных более высокого разрешения (>10 м) подобные метрики обычно обладают достаточно высокой значимостью при дискриминации различных типов наземного покрова. Таким образом, результаты анализа демонстрируют достаточную информативность осреднённых в пределах сегментов значений спектральных и орографических признаков при формировании итогового набора переменных для тематической классификации.

Анализ значимости непосредственно самих признаков продемонстрировал высокую значимость высоты рельефа, что объясняется наличием классов горных лесов и тундры, которые однозначно дискриминируются по этому показателю, а также заметное преимущество отдельных спектральных каналов над индексами, рассчитанными на их основе (*puc.* 46,  $\beta$ ).



*Рис. 5.* Карта наземных экосистем Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей по состоянию на 2016 г. с пространственным разрешением 30 м. Общегеографическая основа и фоновое изображение — OpenStreetMap

Более высокая информативность летнего и зимнего композитных изображений, по сравнению с весенним, в нашем случае может быть объяснена задачей распознавания лесных классов только на уровне групп хвойных и лиственных пород без более подробного подразделения по отдельным, прежде всего лиственным, породам, когда весенние измерения могли бы быть решающими. В результате мы выбрали 11 признаков — спектральные каналы разносезонных композитов, высота и крутизна склонов, которые обеспечили ООВ-точность классификационной модели на уровне не ниже, чем при использовании всех доступных переменных (более 95 %).

Результаты тематической классификации представлены на *рис. 5* (см. с. 147). На итоговой карте наземных экосистем выделенные для повышения точности обучения классы горных темнохвойных и смешанных хвойно-лиственных лесов были объединены с соответствующими классами равнинных и предгорных районов. Класс горных лиственных лесов, представленных в основном берёзовыми криволесьями, был оставлен обособленным. Дополнительно на карту был добавлен класс урбанизированных территорий, включающий крупные населённые пункты и пути сообщения, выделенный по открытым данным OpenStreetMap (openstreetmap.org).

Общая точность тематической классификации, оценённая на основе 400 контрольных точек, составила 90,8 % (каппа 0,89), что можно интерпретировать как высокую степень соответствия полученной карты контрольным данным (*maбл. 2*). Стоит отметить, что на территориях Якшинского и Курьинского участковых лесничеств отсутствуют классы горных лесов и тундры, а класс луговой растительности представлен в незначительном объёме, поэтому оценка точности здесь проводилась только на основе восьми классов. Для территории Печоро-Илычского заповедника мы осуществили пространственное попиксельное сопоставление полученной карты с Картой 2014 г. Совпадение соответствующих тематических классов двух карт было отмечено для 84,6 % территории. Наибольшие расхождения были выявлены для классов смешанных лесов и луговой растительности, что может быть следствием применения объектно-ориентированного подхода, когда мозаично расположенные пиксели различных классов выделяются как единый сегмент. При классификации такие сегменты могут быть отнесены как к одному из слагающих его классов, так и к производному от них смешанному классу.

Класс		1	2	3	4	5	6	7	8	Всего	U_Acc, %
Темнохвойные леса		79	0	0	3	0	0	0	0	82	96,3
Светлохвойные леса		1	96	0	4	0	1	1	0	103	93,2
Лиственные леса		0	3	39	0	1	0	0	0	43	90,7
Смешанные хвойные леса		2	1	0	31	1	0	0	0	35	88,6
Смешанные хвойно-листвен-		4	4	2	1	35	0	0	0	46	76,1
ные леса											
Болота и топи		0	2	0	0	1	43	0	0	46	93,5
Скалы, гольцы и открытые		0	0	0	0	0	4	21	1	26	80,8
грунты											
Реки, озёра и прочие водоёмы	8	0	0	0	0	0	0	0	19	19	100,0
Всего		86	106	41	39	38	48	22	20	400	89,9
P_Acc, %		91,9	90,6	95,1	79,5	92,1	89,6	95,5	95,0	91,1	90,8

*Таблица 2.* Матрица ошибок, построенная на основе контрольных точек в Якшинском и Курьинском участковых лесничествах

П р и м е ч а н и е: U\_Acc — User's Accuracy — точность пользователя карты, характеризует величину ошибок I рода; P\_Acc — Producer's Accuracy — точность производителя карты, характеризует величину ошибок II рода.

#### Выводы

Результаты нашей работы демонстрируют возможности применения восстановленных мультивременных изображений Landsat для тематического картографирования наземных экосистем, и прежде всего лесного покрова, на примере территории Печоро-Илычского заповедника и его окрестностей. Использованный метод восстановления позволяет воссоздавать временные серии безоблачных дистанционных измерений земной поверхности в течение вегетационного периода с необходимой частотой. Учитывая задачи настоящего исследования, мы ограничились созданием разносезонных композитных изображений. Несмотря на нехватку исходных безоблачных данных для восстановления непрерывной серии изображений на всю территорию интереса, нам удалось получить тематическую карту наземных экосистем достаточно высокой точности (более 90 %), компенсировав большую часть оставшихся после восстановления пропусков данных за счёт применения объектно-ориентированного подхода при тематической обработке. При этом было показано, что статистические метрики, отличные от среднего значения, не оказывают существенного влияния на дискриминацию классов при тематической классификации на уровне сегментов изображения Landsat (по крайней мере, для данного набора классов). Применённые в работе методы легко поддаются масштабированию и могут быть использованы для расширения пространственного охвата результатов картографирования (например, до уровня субъектов  $P\Phi$ ), а также обеспечивают возможность анализа мультиспектральных спутниковых данных более высокой детальности, например Sentinel-2.

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 17-05-00300 «Разработка методологии динамического картографирования пожарных режимов лесных экосистем на локальном уровне» (тематическая обработка данных) и ГЗ ЦЭПЛ РАН № 0110-2018-0001 «Концепция спутникового мониторинга состояния и динамики лесных экосистем» (подготовка исходных данных).

### Литература

- 1. Алейников А.А., Тюрин А.В., Симакин Л.В., Ефименко А.С., Лазников А.А. История пожаров в темнохвойных лесах Печоро-Илычского заповедника со второй половины XIX века по настоящее время // Сибирский лесной журн. 2015. № 6. С. 31–42.
- 2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
- 3. *Гаврилюк Е.А., Ершов Д. В.* Методика совместной обработки разносезонных изображений Landsat-TM и создания на их основе карты наземных экосистем Московской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 15–23.
- 4. *Елсаков В. В., Марущак И. О.* Спутниковые изображения в анализе количественных характеристик лесных фитоценозов Печоро-Илычского заповедника Республики Коми // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 303–309.
- 5. *Ершов Д. В., Гаврилюк Е.А., Карпухина Д.А., Ковганко К.А.* Новая карта растительности центральной части Европейской России по спутниковым данным высокой детальности // Доклады Академии наук. 2015. Т. 464. № 5. С. 639–641.
- 6. *Ершов Д. В., Бурцева В. С., Гаврилюк Е.А., Королева Н. В., Алейников А.А.* Диагностика современного сукцессионного состояния лесных экосистем Печоро-Илычского заповедника по спутниковым тематическим продуктам // Лесоведение. 2017. № 5. С. 3–15.
- Колбудаев П.А., Барталев С.А., Плотников Д. Е., Матвеев А. М. Технология обработки спутниковых данных Landsat-TM/ETM+ // 14-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. конф. 14–18 ноября 2016, Москва, ИКИ РАН. 2016. С. 37.
- 8. *Курбанов Э.А., Воробьев О. Н., Губаев А. В., Лежнин С.А., Полевщикова Ю.А., Демишева Е. Н.* Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестник Поволжского гос. технологич. ун-та. Сер. «Лес. Экология. Природопользование». 2014. № 1(21). С. 18–32.

- 9. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
- 10. Плотников Д. Е., Миклашевич Т. С., Барталев С.А. Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. №. 2. С. 103–110.
- 11. Плотников Д. Е., Колбудаев П.А., Барталев С.А., Лупян Е.А. Автоматическое распознавание используемых пахотных земель на основе сезонных временных серий восстановленных изображений Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 112–127.
- 12. Breiman L. Random forests // Machine Learning. 2001. V. 45. No. 1. P. 5–32.
- 13. Chen J., Ban Y., Li S. China: Open access to Earth land-cover map // Nature. 2014. V. 514. P. 434.
- 14. Drobyshev I., Niklasson M., Angelstam P., Majewski P. Testing for anthropogenic influence on fire regime for a 600-year period in the Jaksha area, Komi Republic, East European Russia // Canadian J. Forest Research. 2004. V. 34. No. 10. P. 2027–2036.
- 15. *Gao B. C.* NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. No. 3. P. 257–266.
- Gao F., Masek J., Schwaller M., Hall F. On the Blending of the Landsat and MODIS Surface Reflectance: Predicting Daily Landsat Surface Reflectance // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2006. V. 44. No. 8. P. 2207–2218.
- 17. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853.
- 18. Li C. C., Wang J., Hu L. Y., Yu L., Clinton N., Huang H. B., Yang J., Gong P. A circa 2010 thirty meter resolution forest map for China // Remote Sensing. 2014. V. 6. No. 6. P. 5325–5343.
- 19. Liaw A., Wiener M. Classification and Regression by randomForest // R News. 2002. V. 2. No. 3. P. 18–22.
- 20. *Pasquarella V.J.*, *Holden C.E.*, *Woodcock C.E.* Improved mapping of forest type using spectral-temporal Landsat features // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 210. P. 193–207.
- 21. *Redding N.J., Crisp D.J., Tang D., Newsam G. N.* An efficient algorithm for Mumford-Shah segmentation and its application to SAR imagery // Proc. Conf. "Digital Image Computing: Techniques and Applications" (DICTA-99), Perth, Australia, 1999. P. 35–41.
- 22. *Rouse J. R.*, *Haas J. S.*, *Deering D*. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS // Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp. NASA, 1974. V. 1. Sect. A. P. 309–317.
- 23. *Thompson S. D., Nelson T.A., White J. C., Wulder M.A.* Large area mapping of tree species using composited Landsat imagery // Canadian J. Remote Sensing. 2015. V. 41. No. 3. P. 203–218.
- Wu M., Zhang X., Huang W., Niu Z., Wang C., Li W., Hao P. Reconstruction of Daily 30 m Data from HJ CCD, GF-1 WFV, Landsat, and MODIS Data for Crop Monitoring // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 12. P. 16293–16314.
- 25. *Wu M.*, *Wu C.*, *Huang W.*, *Niu Z.*, *Wang C.*, *Li W.*, *Hao P.* An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining Landsat and MODIS data to generate daily synthetic Landsat imagery // Information Fusion. 2016. No. 31. P. 14–25.
- 26. *Zhu X.*, *Liu D.* Accurate mapping of forest types using dense seasonal Landsat time-series // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. V. 96. P. 1–11.

## Land cover mapping of the Pechora-Ilych Nature Reserve and its vicinity based on reconstructed multitemporal Landsat satellite data

# E. A. Gavrilyuk<sup>1</sup>, A. S. Plotnikova<sup>1</sup>, D. E. Plotnikov<sup>2</sup>

#### <sup>1</sup> Center for Forest Ecology and Productivity RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: egor@ifi.rssi.ru <sup>2</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

The aim of this research was to create a new thematic map of forest and other land cover types for Pechora-Ilych Nature Reserve and its vicinity based on Landsat satellite data. We adopted a time series reconstruction technique for high spatial resolution imagery to compensate the lack of cloudless observations for the territory of interest. Based on the reconstructed images, we derived four seasonal multispectral (RED, NIR and SWIR bands) composites, which were used together with additional terrain information (DEM from ALOS and ASTER data) for object-based thematic classification. Preliminary segmentation of satellite images was performed using the Full Lambda Schedule algorithm, followed by Random Forest classification. The basic statistical metrics (mean, standard deviation, maximum, minimum, etc.), calculated within each segment for all bands of seasonal composites, spectral indices obtained on their basis, DEM and its derivatives, were used as variables for classification. We evaluated the importance of statistical metrics and mapping features during the classifier training process in order to identify the optimal set of variables, which was required for the best thematic classes' discrimination. As a result, we obtained a map with overall classification accuracy of 90.8 % based on the 11 most significant variables (mean values for the bands of winter, spring and summer composites, as well as the DEM height and slope). The mapping accuracy was estimated with a set of control points placed in random stratified manner. The produced map is a base layer for further research related to the development of methods for dynamic mapping of forest fire regimes at the local spatial level.

**Keywords:** remote sensing, thematic mapping, time series reconstruction, land cover mapping, forest mapping, Pechora-Ilych Nature Reserve, Landsat, Full Lambda Schedule, Random Forest

Accepted: 15.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-141-153

#### References

- Aleynikov A.A., Tyurin A.V., Simakin L.V., Efimenko A.S., Laznikov A.A., Istoriya pozharov v temnokhvoynykh lesakh Pechoro-Ilychskogo zapovednika so vtoroy poloviny XIX veka po nastoyashcheye vremya (Fire History of Dark Needle Coniferous Forests in Pechora-Ilych Nature Reserve from the Second Half of XIX Century to Present Time), *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2015, No. 6, pp. 31–42.
- 2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
- Gavrilyuk E.A., Ershov D.V., Metodika sovmestnoi obrabotki raznosezonnykh izobrazhenii Landsat-TM i sozdaniya na ikh osnove karty nazemnykh ekosistem Moskovskoi oblasti (Processing technique for terrestrial ecosystems mapping of Moscow Region based on Landsat-TM multi-seasonal images), *Sovremennye* problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2012, Vol. 9, No. 4, pp. 15–23.
- 4. Elsakov V.V., Marushchak I.O., Sputnikovyye izobrazheniya v analize kolichestvennykh kharakteristik lesnykh fitotsenozov Pechoro-Ilychskogo zapovednika Respubliki Komi (The satellite monitoring of quantitative parameters of forest ecosystems of Pechora-Ilych Nature Reserve), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 303–309.
- Ershov D. V., Gavrilyuk E.A., Karpukhina D.A., Kovganko K.A., Novaya karta rastitelnosti tsentralnoi chasti Evropeyskoi Rossii po sputnikovym dannym vysokoi detalnosti (A new map of the vegetation of central European Russia based on high-resolution satellite data), *Doklady Akademii nauk*, 2015, Vol. 464, No. 5, pp. 639–641.

- 6. Ershov D.V., Burtseva V.S., Gavrilyuk E.A., Koroleva N.V., Aleynikov A.A., Diagnostika sovremennogo suktsessionnogo sostoyaniya lesnykh ekosistem Pechoro-Ilychskogo zapovednika po sputnikovym tematicheskim produktam (Recognizing the recent succession stage of forest ecosystems in Pechora-Ilych Nature Reserve with thematic satellite products), *Lesovedeniye*, 2017, No. 5, pp. 3–15.
- Kolbudaev P.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M., Tekhnologiya obrabotki sputnikovykh dannykh Landsat-TM/ETM+ (Technology for processing Landsat-TM/ETM+ satellite data), 14-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (14<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2016, p. 37.
- Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N., Chetyre desyatiletiya issledovanii lesov po snimkam Landsat (Four decades of forest research with the use of Landsat images), *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya "Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie"*, 2014, No. 1 (21), pp. 18–32.
- 9. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivno-go pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya za-dach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
- 10. Plotnikov D. E., Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Vosstanovlenie vremennykh ryadov dannykh distantsionnykh izmerenii metodom polinomial'noi approksimatsii v skol'zyashchem okne peremennogo razmera (Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
- 11. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Bartalev S. A., Loupian E. A., Avtomaticheskoye raspoznavaniye ispolzuyemykh pakhotnykh zemel na osnove sezonnykh vremennykh serii vosstanovlennykh izobrazhenii Landsat (Automated annual cropland mapping from reconstructed time series of Landsat data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2. pp. 112–127.
- 12. Breiman L., Random forests, *Machine Learning*, 2001, Vol. 45, No. 1, pp. 5–32.
- 13. Chen J., Ban Y., Li S., China: Open access to Earth land-cover map, Nature, 2014, Vol. 514, pp. 434.
- 14. Drobyshev I., Niklasson M., Angelstam P., Majewski P., Testing for anthropogenic influence on fire regime for a 600-year period in the Jaksha area, Komi Republic, East European Russia, *Canadian J. Forest Research*, 2004, Vol. 34, No. 10, pp. 2027–2036.
- 15. Gao B.C., NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, No. 3, pp. 257–266.
- Gao F., Masek J., Schwaller M., Hall F., On the Blending of the Landsat and MODIS Surface Reflectance: Predicting Daily Landsat Surface Reflectance, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, Vol. 44, No. 8, pp. 2207–2218.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, pp. 850–853.
- 18. Li C. C., Wang J., Hu L. Y., Yu L., Clinton N., Huang H. B., Yang J., Gong P., A circa 2010 thirty meter resolution forest map for China, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, No. 6, pp. 5325–5343.
- 19. Liaw A., Wiener M., Classification and Regression by randomForest, *R News*, 2002, Vol. 2, No. 3, pp. 18–22.
- 20. Pasquarella V. J., Holden C. E., Woodcock C. E., Improved mapping of forest type using spectral-temporal Landsat features, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 210, pp. 193–207.
- Redding N.J., Crisp D.J., Tang D., Newsam G.N., An efficient algorithm for Mumford-Shah segmentation and its application to SAR imagery, *Proc. Conf. "Digital Image Computing: Techniques and Applications"* (*DICTA'99*), Perth, Australia, 1999, pp. 35–41.
- 22. Rouse J. R., Haas J. S., Deering D., Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, *Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp.*, NASA, 1974, Vol. 1, Sect. A., pp. 309–317.
- 23. Thompson S. D., Nelson T. A., White J. C., Wulder M. A., Large area mapping of tree species using composited Landsat imagery, *Canadian J. Remote Sensing*, 2015, Vol. 41, No. 3, pp. 203–218.
- 24. Wu M., Zhang X., Huang W., Niu Z., Wang C., Li W., Hao P., Reconstruction of Daily 30 m Data from HJ CCD, GF-1 WFV, Landsat, and MODIS Data for Crop Monitoring, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 12. pp. 16293–16314.

- 25. Wu M., Wu C., Huang W., Niu Z., Wang C., Li W., Hao P., An improved high spatial and temporal data fusion approach for combining Landsat and MODIS data to generate daily synthetic Landsat imagery, *Information Fusion*, 2016, No. 31, pp. 14–25.
- 26. Zhu X., Liu D., Accurate mapping of forest types using dense seasonal Landsat time-series, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, Vol. 96, pp. 1–11.