

Картографирование темнохвойных лесов Северо-Западного Кавказа методом нейронных сетей

А.Ф. Комарова^{1,2}, Н.В. Куксина^{2,3}, А.Г. Зудкин¹

¹Гринпис России, Москва, 125040, Россия

E-mail: anna.komarova@greenpeace.org

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119234, Россия

³НП Прозрачный мир, Москва, 119021, Россия

Статья посвящена картографированию лесов с преобладанием пихты кавказской и ели восточной на Северо-Западном Кавказе. Целью работы было получение и оценка точности выделения слоя темнохвойных лесов. Работа построена на принципах иерархического подхода в классификации ДЗЗ. Используются космические снимки Landsat TM, метод нейронных сетей и массив полевых данных. Подробно описана методика получения слоя темнохвойных лесов. Оценка точности результата проведена по регулярной сетке с шагом 2 км с использованием стандартной матрицы ошибок. Точность выделения темнохвойных лесов составила 95,9%, каппа – 0,81. Леса с доминированием пихты и ели занимают 236,9 тыс. га, или около 12% всех лесов территории исследования. Самые большие абсолютные площади елово-пихтовых лесов сосредоточены в Краснодарском крае за счет его большой площади. Процент темнохвойных лесов от всех лесов региона заметно выше в Адыгее и Карачаево-Черкессии. Рассматриваемая методика основана на доступных инструментах и данных и может быть воспроизведена в других регионах. Полученные результаты могут быть использованы для выделения и характеристики компонентов фитоценоза на следующем, более детальном иерархическом уровне – уровне групп типов леса, а также для анализа распространения темнохвойных лесов по элементам рельефа.

Ключевые слова: пихта Нордманна, ель восточная, Северо-Западный Кавказ, методы дистанционного зондирования, Landsat, космические снимки, нейронные сети, иерархический подход

Одобрена к печати: 17.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-157-166

Введение

Пихтовые и пихтово-еловые леса Северо-Западного Кавказа – уникальные экосистемы, имеющие относительно небольшую площадь распространения. Пихтовые леса включены в перечень редких растительных сообществ на уровне союзов *Vaccinio-Fagion orientalis* и *Rhododendrono pontici-Fagion orientalis* (в том числе подсоюз *Abieti-Fagenion orientali*), с ними связано большое число редких растений, включенных в Красные книги России и регионов (Solomeshch et al., 1997). Являясь горными лесами, они имеют важное средозащитное значение. Все экосистемы российской части Северо-Западного Кавказа находятся под постоянной угрозой уничтожения в связи с развитием сети рекреационных объектов. Значительная часть пихтарников активно используется для заготовки древесины.

В связи с этим актуальны вопросы природоохранного зонирования территории распространения темнохвойных лесов, оценки их состояния и существующих угроз, выделение наиболее ценных не обеспеченных охраной участков, создание рекомендаций в отношении лесопользования. Это невозможно без детальной их инвентаризации на всём ареале. Огромное значение при рассмотрении этих вопросов имеют классические лесоводственные работы, посвящённые темнохвойным лесам Северо-Западного Кавказа (Орлов, 1951; Бебия, 1999, 2002; Рысин и др., 2012), но, несмотря на продолжительную историю изучения пихтово-еловых лесов Северо-Западного Кавказа, пространствен-

ных данных о них недостаточно и картографирование их на всем ареале не проводилось (Темботова и др., 2012).

Цель данной работы – получение и валидация слоя темнохвойных лесов (таких, где темнохвойные породы в господствующем пологе преобладают над лиственными).

Данные дистанционного зондирования, и, в частности, снимки со спутника Landsat широко используются в изучении лесного покрова (McRoberts et al., 2010, Banskota et al., 2014, Курбанов и др., 2014). Они очень полезны именно в тех случаях, когда объект изучения широко распространён (Fassnacht et al., 2006). Накоплен большой опыт их использования для дистанционного картографирования лесных сообществ на уровне типа растительности; выделение сообществ на уровне формаций проводилось преимущественно на равнинных территориях или в глобальном масштабе. Созданию подобных продуктов на региональном уровне или получению более детальной информации, чем формация, тем более в условиях горных территорий, было уделено меньше внимания.

Идее постепенного «углубления», увеличения детальности картографирования лесного покрова отвечает иерархический подход в классификации растительных сообществ (Townsend, Walsh, 2001). Основное его преимущество в том, что на каждом следующем уровне могут быть применены более сложные методы и более детальные данные.

Основой для нашего исследования стали полевые данные, собранные авторами в 2008–2011 годах. В 2008 году геоботанические описания были выполнены А. Комаровой и Н. Куксиной в рамках совместного проекта Набу-Кавказ, НП «Прозрачный мир» и кафедры геоботаники МГУ им. М.В. Ломоносова. В 2010–2011 годах геоботанические описания выполнены А. Комаровой и А. Зудкиным в составе экспедиций биологического ф-та МГУ (2010) и WWF России (2011). В дальнейшем выполнение проекта велось на базе Гринпис России и кафедры геоботаники биологического ф-та МГУ.

Материалы и методы

Территория исследования и основные лесообразующие породы

В качестве территории исследования была выбрана российская часть Северо-Западного Кавказа в пределах ареала распространения темнохвойных лесов (рис. 1). Для определения этой территории из слоя административных районов OpenStreetMaps Карачаево-Черкессии, Краснодарского края и Адыгеи были выбраны районы, в которых по литературным или гербарным (MW, LE) данным встречается пихта (*Abies nordmanniana* (Stev.) Spach).

Абсолютное большинство темнохвойных лесов на Северо-Западном Кавказе образовано пихтой Нордманна или кавказской (*Abies nordmanniana*). Совместно с ней в древостое участвуют ель восточная (*Picea orientalis* (L.) Link.) и бук (*Fagus orientalis* L.). Реже встречается примесь сосны (*Pinus sylvestris* L. subsp. *hamata* (Steven) Fomin), клёнов

Траутветтера (*Acer trautvetteri* Medw.) и явора (*A. pseudoplatanus* L.), осины (*Populus tremula* L.). Примесь ели обычно невелика, а лесов с её преобладанием совсем немного. В нашем случае ель преобладала лишь в 9 из 224 геоботанических описаний, а встречаемость её в первом ярусе составила 7,6%. Таким образом, объект нашего исследования – темнохвойные леса – являются, как правило, пихтарниками с примесью ели.

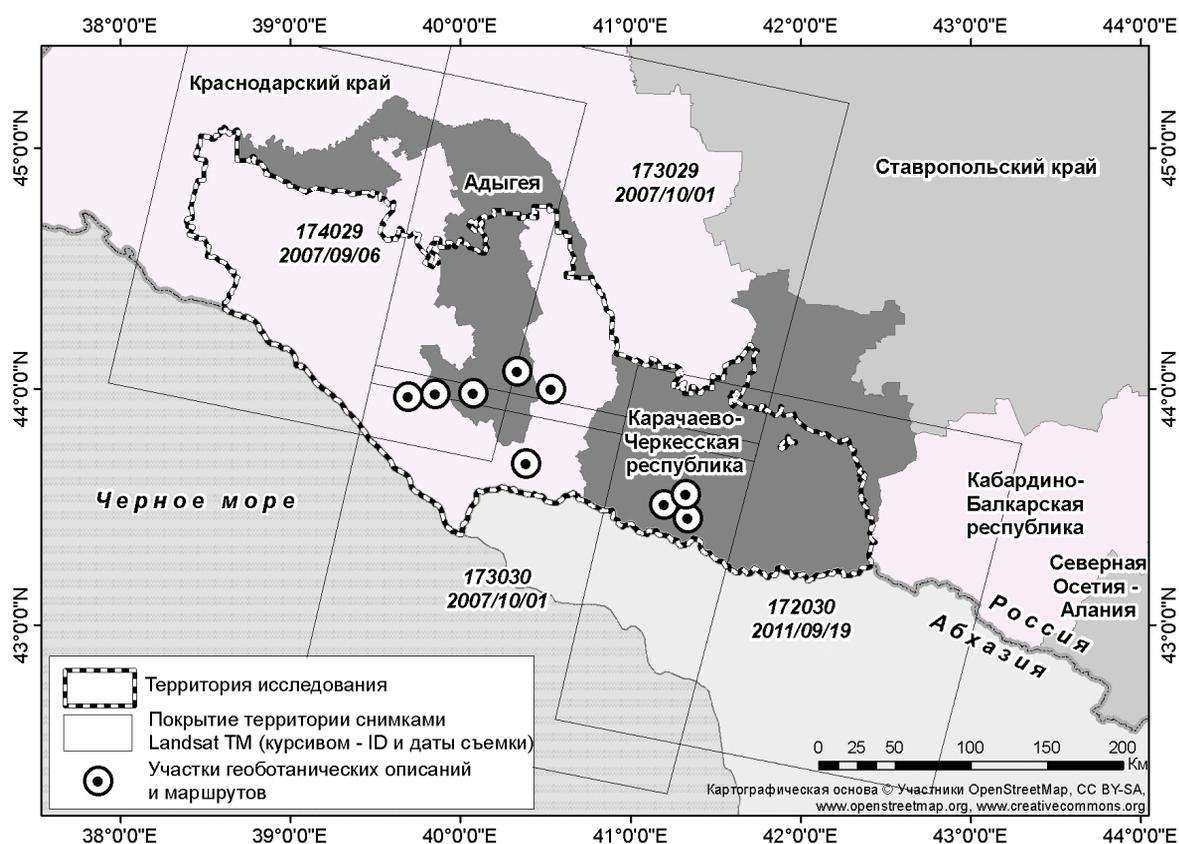


Рис. 1. Территория исследования и районы геоботанических описаний

Полевые данные

На территории исследования выполнено 224 полных геоботанических описания в 9 районах (68 – на пробных площадях 10 м на 10 м и 166 – на пробных площадях 20 м на 20 метров) во всех группах типов елово-пихтовых лесов (рис. 1) (Рысин и др., 2012). Каждая пробная площадь заложена в пределах однородного участка леса радиусом 50 м, что обеспечило возможность описания однородного участка леса, и в то же время позволило охарактеризовать участок, представленный на снимке Landsat группой из не менее чем четырёх пикселей.

Также выполнено 626 сокращённых («маршрутных») описаний на визуально ограниченной площади радиусом около 20 м (параметры: уклон, экспозиция, элемент мезорельефа, сомкнутость древостоя (общая и по породам), тип леса (на уровне группы) и др.). Все описания имеют географическую привязку по GPS и фотографии.

Данные дистанционного зондирования и программное обеспечение

Для получения слоя пихтово-еловых лесов использовали 4 безоблачные сцены Landsat TM за сентябрь 2007 и 2011 годов уровня 1G, полученные из архива Геологической службы США (glovis.usgs.gov). Этот период близок по времени к полевым исследованиям. Сентябрьские снимки хорошо подходят для дешифрирования растительности; кроме того, на Северо-Западном Кавказе в сентябре наблюдается наименьшее число облачных дней. Чтобы избежать взаимного несоответствия между сценами, снимки были корегистрованы к единой мозаике N 37-40 с учетом цифровой модели рельефа SRTM; проведена радиометрическая коррекция.

Классификация снимков проведена в программе ScanEx Image Processor 3.6.8, валидация слоёв, пространственный анализ и визуализация результата – в программе ArcGIS 10.x.

Иерархический подход в классификации и общая схема исследования

Элементы иерархического подхода в классификации растительности по данным ДЗЗ часто используются на практике; теоретически же его преимущества обсуждались мало (Townsend, Walsh, 2001). Этот подход заключается в разбиении работы на последовательные этапы, каждый из которых увеличивает детальность результата, полученного на предыдущем этапе. В данной работе получение слоя темнохвойных лесов проведено в два этапа. Сначала методом ISODATA получена маска лесов, а затем в ее пределах методом нейронных сетей, который ранее показал высокую эффективность в изучении лесного покрова (Joshi et al., 2006; Rogan et al., 2008; Stefanidou et al., 2015), выделены темнохвойные леса.

Методика

1. Слой лесов в пределах территории исследования был получен с помощью классификации без обучения методом ISODATA (Iterative Self-Organising Data Analysis Technique). Каждая сцена 20 итерациями была классифицирована на 50 кластеров по 2 (0,53-0,61 мкм), 3 (0,63-0,69 мкм), 4 (0,78-0,90 мкм) и 5 (1,55-1,75 мкм) спектральным каналам, которые затем были перекодированы в классы «ЛЕС» и «ПРОЧЕЕ» (рис. 2а, б). Основная задача слоя лесов – уменьшить разброс яркостных характеристик за счет исключения не относящихся к лесам пикселей, поэтому перекодировка была проведена так, чтобы минимизировать потери класса «ЛЕС». Кластеры, объединяющие «лесные» и «нелесные» пиксели, относили к классу «ЛЕС». Одиночные пиксели были удалены двукратным медианным фильтром радиусом 1. При этом вероятность потери интересующих нас объектов минимальна, т.к. кавказская пихта не образует опушку (Герасимов, 1948). Результат классификации векторизовали с параметрами минимальной площади 1 га с очисткой слоя и сглаживанием вершин. Допустимая заданная величина изменений при генерализации – 30 м.

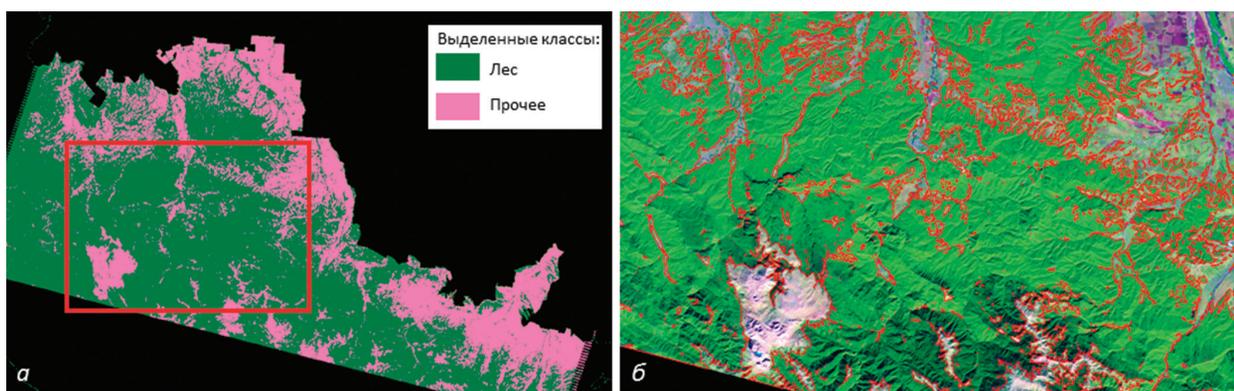


Рис. 2. Маска лесов, полученная методом ISODATA. Результат классификации (а) и векторный результат, наложенный на исходный снимок (б)

2. Калибровочный векторный слой для автоматической интерпретации нейронной сети был создан на основе геоботанических описаний. Для калибровки использовались только те описания, где полог сомкнут (сомкнутость более 40% с учетом окон) и преобладают пихта и/или ель (то есть проективное покрытие темнохвойных составляет более половины общего покрытия). Остальные точки не использовались, так как представляют собой переходный класс и могут помешать интерпретации нейронной сети. Для поддержания баланса между южными и северными склонами привлечены данные о наличии темнохвойных лесов на территориях, которые не были пройдены маршрутами. Например, наличие темнохвойных лесов на отдельных южных склонах было установлено по литературным данным и подтверждено с помощью позднесенних снимков Landsat ETM+. В качестве эталонов отсутствия темнохвойных использованы точки маршрутов, где отсутствие пихты и ели специально отмечено, и данные экспертной оценки, а также несколько геоботанических описаний широколиственных лесов.

В зависимости от степени точности полигонам были присвоены удельные веса. Участки темнохвойных лесов, установленные путем наземного обследования, получили максимальный вес (1), полигоны без пихтарников, добавленные в результате экспертной оценки – минимальный (0,4).

Для каждой сцены использовали 200 калибровочных полигонов в центре и по краям снимка на склонах всех экспозиций. Это несколько избыточно, но при недостаточности информации часть нейронов не классифицируются и результат калибровки нельзя считать удовлетворительным. Избыточность призвана нивелировать ошибки, связанные с возможными искажениями на краях снимков и разницей в освещенности склонов разной экспозиции.

3. Обучение нейронной сети в пределах векторной маски лесов для каждой сцены проведено на 5 каналах (2–7 каналы снимка Landsat TM), относительный вес 4 и 5 каналов удвоен. Применен алгоритм SOM, так как он является классическим, чаще используется и потому лучше разработан и предоставляет больше пользовательских возможностей для настройки обучения. Стратегия выбора локальной окрестности – гауссовская, метрика рас-

стояния от входного сигнала до класса – манхэттенское расстояние, применена коррекция дисторсии на краях решетки (Тематик Про..., 2011).

Нейронная сеть строится на основе статистики, собранной программой по всему растру в пределах маски. Такая статистическая обработка – еще один плюс метода нейросетевого анализа в сравнении с обучаемой классификацией. В случае обучаемой классификации обучение проводится на основе заданных пользователем полигонов, и вероятность отклонений велика; в данном же случае вероятность отклонений ниже за счет статистической обработки большого количества пикселей.

4. Классификация обученной нейронной сетью проведена на основе тех же каналов и весов, что и обучение. Параметр «Сохранить наиболее вероятный класс» позволяет сопоставить все пиксели изображения нейронам сети без потери информации. На *рис. 3а, 3б* видно, что темнохвойные леса хорошо выделяются в отдельную область на разных снимках. Поскольку яркости по каналам на разных снимках неодинаковы, структура сетей отличается, но класс темнохвойных лесов на всех снимках «сгущенный» и отстоит от других точек. Кодировка раstra: 1 – темнохвойные, 50 – прочие леса.

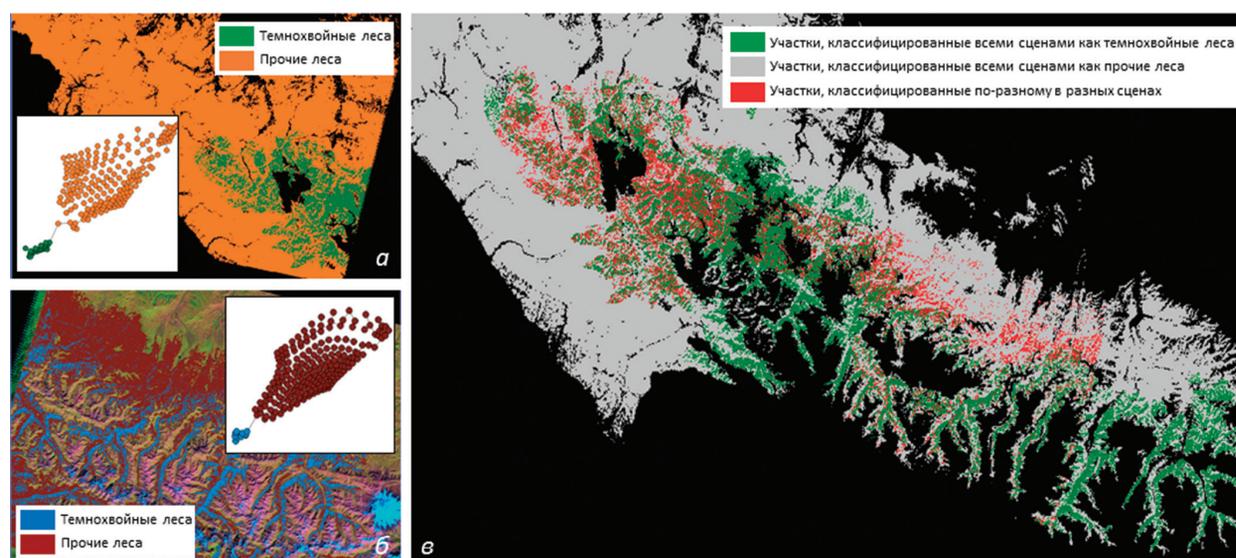


Рис. 3. Классификация нейронными сетями под маской леса: результаты классификации отдельных сцен и структура соответствующих нейронных сетей (а, б); объединение четырех сцен, классифицированных отдельно (в)

5. Комбинация результатов классификации по 4 сценам выполнена с помощью растрового калькулятора. Поскольку между собой могут перекрываться 2 или 3 сцены, результирующий растр имеет значения {1, 2, 3, 50, 51, 52, 100, 101, 150}. Таким образом, можно выделить пиксели, классифицированные разными сетями по-разному (неопределенные: значения 51, 52, 101). Их количество (*рис. 3в*) составило чуть менее 5% от всех включенных в анализ пикселей. Эти области были проверены и классифицированы вручную. Результат этого этапа принят как конечный, именно к нему применялась валидация.

Валидация результатов

Валидация слоя темнохвойных лесов проводилась в узлах регулярной сетки с шагом 2 км. Для каждого узла принадлежность к слою темнохвойных лесов определена по зимним снимкам Landsat ETM+. Затем все точки, отнесенные к темнохвойным лесам, были перепроверены по высокодетальным снимкам в программах Google Earth и SasPlanet. Оценка точности проводилась по матрице ошибок с расчетом коэффициента каппа (Малышева, 2012).

Результаты и обсуждение

Точность выделения темнохвойных лесов (*табл. 1*) составила 95,9% (каппа 0,81). Основной вклад в ошибку внесли крупные «окна» в пологе древостоя (в дальнейшем удалены при генерализации) и теневые склоны в высокогорьях. Такие ошибки маски лесов на этапе постклассификационной обработки удалены вручную.

Таблица 1. Оценка точности слоя темнохвойных лесов

Значения растра	Проверочные данные		Σ	UA
	1 (темн.)	2 (не темн.)		
1 (темнохвойные)	496	97	593	0,84
50 (прочие)	102	4161	4263	
Σ	598	4258	4856	
PA	0,83		OA	0,96

Примечание: OA – общая точность, UA – точность пользователя (отношение количества правильно классифицированных элементов к общему количеству элементов выделенного класса), PA – точность классификатора (отношение количества правильно классифицированных элементов к общему количеству элементов проверочного класса).

Общая площадь лесов с доминированием темнохвойных пород в Краснодарском крае, Адыгее и Карачаево-Черкесии составляет 236,9 тыс. га или 12% от лесов территории исследования. Распределение темнохвойных лесов по административным районам (*табл. 2*) показывает, что больше всего темнохвойные леса распространены в Карачаево-Черкесии; на нее приходится почти половина темнохвойных лесов. В абсолютных значениях площади чуть меньше темнохвойных лесов приходится на Краснодарский край. При этом процент темнохвойных лесов от лесов региона выше в Адыгее. Таким образом, для Адыгеи темнохвойные леса более типичны, чем для Краснодарского края, где большие площади заняты лиственными лесами. Во всех субъектах доля темнохвойных лесов составляет четверть или менее от всех лесов.

Полученные данные можно использовать в природоохранном планировании, а также для выявления сопряженности параметров рельефа и распространения темнохвойных

лесов. Пространственная непрерывность результата дает возможность проверки гипотез о факторах, влияющих на распространение темнохвойных лесов, методами пространственного анализа. Информация о существующем и потенциальном (за счет анализа рельефа) распределении массивов темнохвойных лесов может быть полезна для моделирования местообитаний или оценки распространения отдельных ассоциаций и видов.

Таблица 2. Распространение темнохвойных лесов в регионах Северо-Западного Кавказа

<i>Административные единицы</i>	<i>Темнохвойные леса</i>		
	<i>Площадь, тыс. га</i>	<i>% от лесов района</i>	<i>% от всех темнохвойных лесов</i>
Туапсинский район	4,8	2,2%	2,0%
Апшеронский район	15,7	7,4%	6,6%
Сочи	30,3	10,0%	12,8%
Мостовской район	38,8	20,3%	16,4%
Краснодарский край всего	89,6	7,7%	37,8%
Республика Адыгея, Майкопский район	47,9	16,8%	20,2%
Урупский район	30,1	17,5%	12,7%
Зеленчукский район	23,2	17,0%	9,8%
Карачаевский район	46,1	25,7%	19,5%
Республика Карачаево-Черкессия всего	99,4	20,4%	42,0%
Всего	236,9	12,2%	100,0%

Заключение

Данные Landsat позволяют классифицировать темнохвойные леса и определить особенности их распространения на больших территориях. Классификация темнохвойных лесов методом нейронных сетей позволяет получить успешно валидируемые карты лесного покрова при относительно небольшом количестве полевых данных. Точность выделения темнохвойных (преимущественно пихтовых) лесов в пределах всей российской части Северо-Западного Кавказа составила 95,9% (каппа 0,81). Общая площадь темнохвойных лесов на Северо-Западном Кавказе – 236,9 тыс. га или 12,2% от всех лесов региона.

Рассматриваемая методика основана на доступных инструментах и данных и может быть воспроизведена в других регионах. Полученные результаты могут быть использованы для выделения и характеристики компонентов фитоценоза на следующем, более детальном иерархическом уровне – групп типов леса. Пространственно-топографический анализ распределения лесов с доминированием пихты и ели, вероятно, позволит выявить закономерности распространения и использовать данные Landsat, например, для моделирования местообитаний.

Литература

1. Бебия С.М. Пихтовые леса Кавказа, их использование и охрана // Автореф. дис. докт. биол. наук. М., 1999. 64 с.
2. Бебия С.М. Пихтовые леса Кавказа. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2002. 237 с.
3. Герасимов М.В. Кавказская пихта // М.-Л.: Гослестехиздат, 1948. 176 с.
4. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Губаев А.В., Лежнин С.А., Полевицкова Ю.А., Демешева Е.Н. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat // Вестник Поволжского гос. тех. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 1. С. 18–32.
5. Мальшиева Н.В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М., 2012. 154 с.
6. Орлов А.Я. Темнохвойные леса Северного Кавказа. М., 1951. 256 с.
7. Рысин Л.П., Манько Ю.И., Бебия С.М. Пихтовые леса России. М., 2012. 230 с.
8. Тематик Про. Модуль тематической интерпретации данных дистанционного зондирования. Руководство пользователя. М., 2011. 225 с.
9. Темботова Ф.А., Пицегусов Р.Х., Тлунова Ю.М. Леса северного макросклона Центрального Кавказа (эльбрусский и терский варианты поясности) // Разнообразие и динамика лесных экосистем России. В 2-х кн. Кн. 1. М., 2012. С. 227–251.
10. Banskota A., Kayastha N., Falkowski M., Wulder M.A., Froese R.E., White J.C. Forest monitoring using Landsat time-series data: A review // Canadian Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 40. No. 5. P. 362–384.
11. Fassnacht K.S., Cohen W.B., Spies T.A. Key issues in making and using satellite-based maps in ecology: A primer // Forest Ecology and Management. 2006. Т. 222. No. 1. P. 167–181.
12. Joshi C., De Leeuw J., Skidmore A.K., Van Duren I.C., Van Oosten H. Remotely sensed estimation of forest canopy density: A comparison of the performance of four methods // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2006. No. 8(2). P. 84–95.
13. McRoberts R.E., Cohen W.B., Næsset E., Stehman S.V., Tomppo E.O. Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products // Scandinavian Journal of Forest Research. 2010. Vol. 25:4. P. 340–367.
14. Rogan J., Franklin J., Stow D., Miller J., Woodcock C., Roberts D. Mapping land-cover modifications over large areas: A comparison of machine learning algorithms // Remote Sensing of Environment. 2008. No. 112(5). P. 2272–2283.
15. Solomeshch A., Mirkin B., Ishbirdin A., Golub V., Saitov M., Zhuravliova S., Rodwell J. Red Data Book of Plant Communities in the former USSR. Templar Print & Design Ltd, Birmingham: 1997. 69 p.
16. Stefanidou A., Dragozi E., Tompoulidou M., Gitas I.Z. Forest/Non Forest mapping using Landsat Thematic Mapper Imagery and Artificial Neural Networks (ANNs) // Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2015. No. 1(25). P. 22–33.
17. Townsend P.A., Walsh S.J. Remote sensing of forested wetlands: application of multitemporal and multispectral satellite imagery to determine plant community composition and structure in southeastern USA // Plant Ecology. 2001. Vol. 157. No. 2. P. 129–149.

Mapping of the North-West Caucasus dark-coniferous forests with neural network approach

A.F. Komarova^{1,2}, N.V. Kuksina^{2,3}, A.G. Zudkin¹

¹Greenpeace Russia, Moscow 125040, Russia

E-mail: anna.komarova@greenpeace.org

²M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119234, Russia

³Transparent World, Moscow 119021, Russia

The article discusses mapping of fir- and spruce-dominated forests through the North-West Caucasus (Adygeya Republic and the southern districts of Krasnodarsky Krai and Karachaevo-Cherkessiya Republic). The project was aimed to mapping the coniferous-dominated forests and assessing the accuracy of the result; it was based on hierarchical approach, Landsat TM images, neural network method and field data. The neural network method is described in detail in the Methods section. The result was validated using the regular 2x2-kilometers network, standard error matrix and kappa. Accuracy comparing to regular network was estimated at 95.9% (kappa 0.81). Dark-coniferous forests occupy 236.9 KHa (about 12% of total region's forests). The biggest areas of coniferous forests are concentrated in Krasnodar Region due to its vast territory, while Adygeya and Karachaevo-Cherkessiya are leading in terms of relative area of coniferous forests. The presented methodology is based on available data and software and can be reproduced in other regions. The results are useful for mapping and characterization of forest type groups or for analysis of topographic factors of coniferous forests distribution.

Keywords: *Abies nordmanniana*, *Picea orientalis*, North-West Caucasus, remote sensing, satellite images, hierarchical approach, Landsat, neural networks

Accepted: 17.07.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-157-166

References

1. Bebiya S.M., *Pikhtovye lesa Kavkaza, ikh ispol'zovanie i okhrana: Avtoref. diss. dokt. biol. nauk* (Caucasian fir forests, the management and conservation: syn. doct. biol. sci. thesis), Moscow, 1999, 64 p.
2. Bebiya S.M., *Pikhtovye lesa Kavkaza* (Caucasian fir forests, the management and conservation), Moscow: Izd-vo Mosk. gos. un-ta lesa, 2002, 237 p.
3. Gerasimov M.V., *Kavkazskaya pikhta* (Caucasian fir), Moscow-Leningrad: Goslestekhizdat, 1948.
4. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N. Chetyre desyatiletiiya issledovaniy lesov po snimkam Landsat (Four decades of forest research with the use of Landsat images), *Vestnik Povolzhskogo gos. tekhn. un-ta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*, 2014, No. 1, pp. 18–32.
5. Malysheva N.V., *Avtomatizirovannoe deshifrirovaniye aerokosmicheskikh izobrazhenii lesnykh nasazhdenii* (Automated decoding of aerospace images of forests), Moscow, 2012, 154 p.
6. Orlov A.Ya., *Temnokhvoinnye lesa Severnogo Kavkaza* (Coniferous forests of North Caucasus), Moscow, 1951, 256 p.
7. Rysin L.P., Man'ko Yu.I., Bebiya S.M., *Pikhtovye lesa Rossii* (Fir forests of Russia), Moscow, 2012, 230 p.
8. *Tematik Pro. Modul' tematicheskoi interpretatsii dannykh distantsionnogo zondirovaniya. Rukovodstvo pol'zovatelya* (Thematic mapping extension for remote sensed data. User guide), Moscow, 2011, 225 p.
9. Tembotova F.A., Pshegusov R.Kh., Tlupova Yu.M., *Les severnogo makrosklona Tsentral'nogo Kavkaza (el'bruskii i terskii varianty poyasnosti)* (The forests of North Macroslope of Central Caucasus (Elbrus's and Terek's altitudinal zonal variants), In: *Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii*, Moscow, 2012, pp. 227–251.
10. Banskota A., Kayastha N., Falkowski M., Wulder M.A., Froese R.E., White J.C., Forest monitoring using Landsat time-series data: A review, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 40, No. 5, pp. 362–384.
11. Fassnacht K.S., Cohen W.B., Spies T.A. Key issues in making and using satellite-based maps in ecology: A primer, *Forest Ecology and Management*, 2006, Vol. 222, No. 1, pp. 167–181.
12. Joshi C., De Leeuw J., Skidmore A.K., Van Duren I.C., Van Oosten H., Remotely sensed estimation of forest canopy density: A comparison of the performance of four methods, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, No. 8(2), pp. 84–95.
13. McRoberts R.E., Cohen W.B., Næsset E., Stehman S.V., Tomppo E.O., Using remotely sensed data to construct and assess forest attribute maps and related spatial products, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2010, Vol. 25:4, pp. 340–367.
14. Rogan J., Franklin J., Stow D., Miller J., Woodcock C., Roberts D., Mapping land-cover modifications over large areas: A comparison of machine learning algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2008, No. 112(5), pp. 2272–2283.
15. Solomeshch A., Mirkin B., Ishbirdin A., Golub V., Saitov M., Zhuravliova S., Rodwell J., *Red Data Book of Plant Communities in the former USSR*, Birmingham, 1997, 69 p.
16. Stefanidou A., Dragozi E., Tompoulidou M., Gitas I.Z., Forest/Non Forest mapping using Landsat Thematic Mapper Imagery and Artificial Neural Networks (ANNs), *Vestnik of Volga State Univ. of Tech.. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*, 2015, No. 1 (25), pp. 22–33.
17. Townsend P.A., Walsh S.J. Remote sensing of forested wetlands: application of multitemporal and multispectral satellite imagery to determine plant community composition and structure in southeastern USA, *Plant Ecology*, 2001, Vol. 157, No. 2, pp. 129–149.