

2. Blackburn G. A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments // J. Exp. Botany, 2007, v. 58, №4. – P. 855–867.
3. Выгодская И. Н., Горшкова И. И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. Москва: Гидрометиздат, 1987. – 246 с.
4. Сидько А. Ф. Угловое распределение отражательных характеристик агроценозов по наземным дистанционным измерениям / А. Ф. Сидько, И. Ю. Ботвич, Т. И. Письман, А. П. Шевырнов // Журнал Сибирского федерального университета. Инженерия и технологии. 2014. №7. С. 665–673.
5. Franke J. Spatiometral dynamiks of stress factors in wheat analysed by multisensoral remote sensing and geostatistics: Ph. D. Diss: Universitaets and Landesbibliatnek Bonn. Nothematisch, Naturwissenschaftliche Facultaet. Bonn, Germany, 2007. 150 p.
6. Steddom K., Jones D., Rush C. A picture is worth a thousand words // Am. Phytopathol. Soc. Saint Pol. USA, 2005. 7 p.

УДК 528.88:630*5

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОРОГОВОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАНЫМ СВЕРХВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

А. Д. Никитина, С. В. Князева, Н. В. Королева, Е. А. Гаврилюк, С. П. Эйшлина

ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
г. Москва, Россия, nikitina.al.dm@gmail.com

В исследовании представлены результаты применения метода пороговой сегментации изображений сверхвысокого пространственного разрешения спутника Ресурс-П1 (Геотон-Л1) и дана оценка тесноты связей между биометрическими и морфоструктурными параметрами лесных фитоценозов сосны обыкновенной и ольхи черной национального парка «Куршская коса» и дешифровочными признаками на космических снимках на основе регрессионных моделей.

Ключевые слова: биометрические параметры лесной растительности; морфоструктура древесного полога; спутниковые данные сверхвысокого пространственного разрешения; пороговая сегментация изображений; Куршская коса.

Введение. В настоящее время существует множество алгоритмов обработки спутниковых данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) сверхвысокого пространственного разрешения [1]. Одним из них является метод пороговой сегментации, который, несмотря на простоту реализации, позволяет с достаточно высокой точностью выявлять взаимосвязи яркостных параметров изображений с характеристиками лесных фитоценозов [2, 3].

Основная часть. В данном исследовании метод пороговой сегментации применен для выявления и оценки тесноты связей между биометрическими и морфоструктурными параметрами лесных фитоценозов сосны обыкновенной и ольхи черной национального парка «Куршская коса» и дешифровочными

признаками на космических снимках. Основными лесообразующими породами на территории парка являются сосна, ель, береза, ольха черная. Более половины лесопокрытой площади занимают сосняки, представленные, в основном, сосной обыкновенной [4]. В качестве ДДЗ использованы разносезонные космические снимки с пространственным разрешением около 1 м, полученные отечественным спутником Ресурс-П1 (Геотон-Л1) на территорию парка в панхроматическом диапазоне 0,58 – 0,8 мкм (31.03.2017, 09.06.2018).

Биометрические параметры лесной растительности включают средний возраст, высоту, диаметр ствола. Наземные данные представлены таксационными описаниями, полученными из базы лесоустройства территории парка в 2016 г. Дополнительно к таксационным данным в качестве морфоструктурного параметра для каждого выдела был рассчитан интегральный показатель сложности морфоструктуры древесного полога (I_m) по формуле:

$$I_m = \left[\left(\frac{h_1}{h_{\max}} \times K_1 \right) + \dots + \left(\frac{h_n}{h_{\max}} \times K_n \right) \right] \times P, \quad (1)$$

где ($K_1, \dots, K_n$) - коэффициенты состава пород деревьев,

($h_1, \dots, h_n$) - средние высоты деревьев,

(P) - относительная полнота насаждения выдела.

I_m принимает значения от 1 до 10 и позволяет формализовать в одном параметре высоту деревьев разных пород, их участие в составе насаждения и степень сомкнутости древесного полога [5].

Для статистического анализа из БД лесоустройства отобраны таксационные выделы с участием в составе древостоя преобладающей породы более 6 единиц. Всего было выбрано 823 выдела с преобладанием сосны обыкновенной и 350 выделов с преобладанием черной ольхи. Площадь насаждения таксационного выдела на снимке равна площади древесного полога и межкрупного пространства, т.е. общее число пикселей выдела вычисляется по следующей формуле:

$$N = N_C + N_L + N_D, \quad (2)$$

где N_C - число пикселей изображения древесного полога,

N_L - число пикселей освещенных участков межкрупных промежутков,

N_D - число пикселей затененных участков.

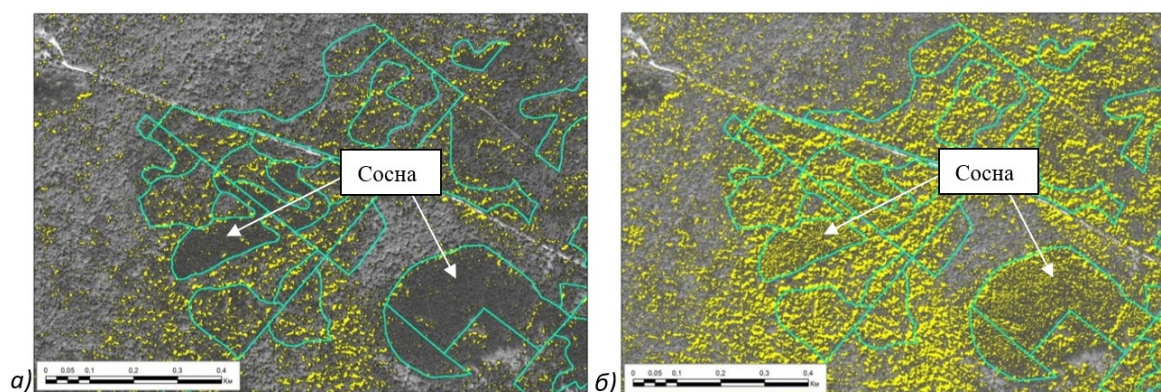
В процессе пороговой сегментации изображений выделены затененные участки выделов, различающихся друг от друга как средней яркостью, так и численностью пикселей, для которых соблюдается определенный заданный критерий однородности. Сначала выделяют локальные минимумы изображения межкрупного пространства. На каждом последующем этапе происходит увеличение размера выделяемых сегментов ($D_0 \dots D_n$) в результате объединения соседних пикселей при заданном пороге яркости. Начальный яркостной порог D_0 для выделения теневого участка на летнем изображении выбран равным 80, на весеннем - 40. В качестве максимального яркостного порога выбрано значение яркости, равное 210, которое заведомо избыточно и по результатам визуальной идентификации соответствует затененным участкам крон дере-

вьев. Для летнего изображения затененных межкроновых промежутков выбрано 13 пороговых яркостных значений, для весеннего изображения - 14. На основе пороговых значений яркости проведено сегментирование изображений и созданы маски для каждого диапазона яркости теневых межкроновых промежутков древесного полога сосновых и черноольховых лесов (см. рисунок). На следующем этапе на основе масок рассчитаны площади теневых участков (сегментов) в границах выделов ($N_{D0}...N_{Dn}$), а также средние значения яркости этих сегментов стандартные отклонения и медианные значения.

Статистические характеристики яркостных диапазонов, включающие средние яркости ($D_0...D_n$) и соотношения числа пикселей теневых межкроновых промежутков к общему числу пикселей выдела ($Cd_0...Cd_n$), использованы в качестве переменных для регрессионного анализа оценки тесноты связи между биометрическими и морфоструктурными характеристиками сосновых и черноольховых лесов и особенностями изображения древесного полога на космических снимках. Использование избыточного набора переменных величин позволяет избежать субъективного выбора показателей сегментации. Значимые величины переменных определяются на основе матриц парной корреляции каждого из пороговых значений с биометрическими характеристиками лесов.

Регрессионный анализ проведен в программном обеспечении STATISTICA с построением линейной и кусочно-линейной функций моделирования биометрических характеристик (табл.).

Линейная зависимость между возрастом, высотой, диаметром стволов и параметрами сегментации летнего и весеннего изображений не выражена (коэффициент детерминации R^2 менее 0.42).



Фрагмент изображения Ресурс-П1 с наложенным векторным слоем сосновых лесов и маской теневых межкроновых промежутков, выделенных желтым цветом:

а – диапазон D7 – 80-150; б – диапазон D11 – 80-190

Кусочно-линейная регрессионная модель значительно лучше описывает зависимости рассматриваемых параметров. В качестве метода оптимизации параметров выбран квазиньютоновский метод (Quasi-Newton), точка перегиба определялась автоматически.

Результаты кусочно-линейной регрессионной модели

Дата съемки	Переменные	Количество переменных	Параметры			
			Диаметр (R ²) / RMSE см	Высота (R ²) / RMSE м	Возраст (R ²) / RMSE лет	Морфо- структура (R ²) / RMSE баллы
Сосна обыкновенная						
31.03.2017	Cd-spr-1 (1), D-spr-1 (2), Cd-spr-9(3), D-spr-9 (4), Cd-spr-13 (5)	5	0,79 / 3,84	0,80 / 2,63	0,75 / 14,25	0,77 / 0,92
09.06.2018	D-sum-2 (1), Cd-sum-3 (2), D-sum-4 (3), D-sum-12 (4), Cd-sum-13 (5)	5	0,79 / 3,86	0,80 / 2,65	0,77 / 13,83	0,76 / 0,98
Ольха черная						
31.03.2017	Cd-spr-1 (1), D-spr-1 (2), D-spr-9 (3), C-spr-d ₁₃ (4)	4	0,48 / 4,10	0,60 / 2,27	0,54 / 12,33	0,70 / 0,53
09.06.2018	D-sum-0 (1), D-sum-1 (2), D-sum-2 (3), D-sum-3 (4), D-sum-12 (5), Cd-sum-13 (6)	6	0,53 / 3,91	0,63 / 2,17	0,63 / 11,06	0,69 / 0,54

Значимые переменные кусочно-линейной регрессии в большинстве своем относятся к нижним и верхним пороговым значениям (40/80-90, 40/80-110, 40/80-200, 40/80-210), но есть и пороги, приближенные к срединным значениям (40/80-120, 40/80-170). Коэффициент детерминации для моделей возраста, высоты и диаметров стволов сосновых древостоев по снимкам марта и июня варьирует в пределах от 0,75 до 0,8, что характеризуют достаточно высокую тесноту связи пороговых значений сегментации и биометрических характеристик. Для черноольховых лесов величины коэффициентов детерминации ниже как для июньского ($R^2=0,53-0,69$), так и для мартовского изображений ($R^2=0,48-0,70$). Среднеквадратичные ошибки (RMSE) моделей при определении высоты деревьев находятся в диапазоне от 2.2 до 2.6 м, а при определении диаметра стволов – в диапазоне от 3.8 до 4.1 см. Наиболее высокие значения RMSE отмечены при моделировании возраста древостоя: около 14 лет для сосняков, и около 12 лет для черноольшаников. В целом, наиболее высокие значения коэффициентов детерминации соответствуют морфоструктурным параметрам древостоев ($R^2=0,76-0,77$ для сосняка, $R^2=0,69-0,70$ для черноольшаника), при минимальных

значениях среднеквадратической ошибки ($RMSE = 0,98-0,92$ балла для сосняка, $RMSE = 0,53-0,54$ балла для черноольшаника).

Заключение. Таким образом, наибольшие значения коэффициента детерминации соответствуют параметрам сосновых лесов. Для черноольховых лесов относительно высокий коэффициент детерминации характерен для показателя сложности морфоструктуры полога. Наиболее информативными переменными для регрессионных моделей являются минимальные и максимальные пороговые значения. В целом, более высокая теснота связи между биометрическими характеристиками древостоев (особенно лиственных) и параметрами сегментации отмечена для летнего изображения.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 17-05-01129 «Оценка биометрических и морфоструктурных параметров лесных фитоценозов на основе детальной аэрокосмической съемки»

Библиографические ссылки

1. Ehlers M., Gähler M., Janowsky R. Automated analysis of ultra high-resolution remote sensing data for biotope type mapping: new possibilities and challenges. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2003. Т. 57. №. 5–6. С. 315–326.
2. Mora B., Wulder M., White J. Identifying leading species using tree crown metrics derived from very high spatial resolution imagery in a boreal forest environment. Can. J. Remote Sensing, 2010. Vol. 36. No. 4. P. 332–344
3. Жирин В.М., Князева С.В., Эйлина С.П. Оценка биометрических параметров насаждений по изображениям межкрупного пространства на космических снимках сверхвысокого разрешения. Лесоведение. 2018. № 3. С. 163–177
4. Чебакова И. В. Национальные парки России. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы. 1996. 198 с.
5. Жирин В. М., Князева С. В., Эйлина С. П. Оценка влияния морфологии древесного полога и рельефа на спектральные характеристики лесов по данным Landsat. Исследование Земли из космоса. 2016. №. 5. С. 10–20.

УДК 528.88

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЕГЕТАЦИОННЫХ СЕЗОНОВ ПО ДАННЫМ РЯДОВ СПУТНИКОВЫХ СЪЕМОК С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ – ПРИМЕНЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

И. С. Рыкин¹⁾, Е. А. Паниди²⁾

¹⁾ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, ivan.rykin94@gmail.com, st059068@student.spbu.ru

²⁾ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, panidi@ya.ru, e.panidi@spbu.ru

Освещены экспериментальные исследования, связанные с аналитической обработкой многолетних рядов данных спутниковой съемки MODIS, имеющих временное разрешение в один день, с использованием платформы облачных вычислений Google Earth Engine. На примере территории республики Коми (Россия), выполнены построение рядов