

DOI: 10.31509/2658-607x-202584-181

УДК 630*58/64

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОРОГОВОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ ПО ВЫСОКОДЕТАЛЬНЫМ ДАННЫМ СПУТНИКА «РЕСУРС-П1»

© 2025

С. В. Князева*, А. Д. Никитина, Е. И. Белова

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов им. А. С. Исаева
Российской академии наук*

Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

*E-mail: knsvetl@gmail.com

Поступила в редакцию: 08.10.2025

После рецензирования: 17.11.2025

Принята к печати: 28.11.2025

В статье приведены результаты исследования возможностей применения метода пороговой сегментации межкрупных участков изображения лесного полога на отечественных космических снимках сверхвысокого пространственного разрешения, полученных со спутника «Ресурс-П1» (Геотон-Л) для выявления взаимосвязи параметров сегментации с биометрическими характеристиками сосновых древостоев на примере лесов НП «Куршская коса». Предложенный метод основан на выделении затенённых сегментов межкрупного пространства в границах таксационных выделов с учётом заданного диапазона яркости и последующем объединении соседних пикселей по критерию спектральной близости при новом заданном пороге яркости. Для каждого заданного порога определяются площади и средние значения яркости теневых сегментов в границах выделов, стандартные отклонения и медианные значения. На основе этих значений для каждого выдела рассчитывается пороговая сомкнутость полога, учитывающая только затенённые межкрупные промежутки. Статистические характеристики средней яркости и пороговой сомкнутости полога служат в качестве переменных для регрессионного моделирования биометрических (высота, диаметр, возраст древостоев) характеристик сосновых лесов.

Регрессионный анализ проведен с использованием ансамблевого метода с построением деревьев решений Random Forest (RF). Коэффициент детерминации R^2 для характеристик сосновых лесов находится в диапазоне 0.29 – 0.37. Результаты валидационной модели по тестовой выборке практически тождественны моделированию по обучающей выборке, что свидетельствует о надежности модели RF. Регрессионное моделирова-

ние алгоритмом RF характеристик сосновых древостоев (на примере чистых сосновых насаждений в НП «Куршская коса»), где в качестве предикторов выступают переменные, полученные методом пороговой сегментации изображения лесного полога на панхроматических изображениях Геотон-Л, позволяет получать стабильные результаты со среднеквадратической ошибкой около 4 м для средней высоты, 6 см – для диаметра и 20 лет – для возраста. Метод пороговой сегментации изображения древесного полога целесообразно применять в целях предварительной оценки характеристик древостоев в случае недостаточной радиометрической коррекции спектральных данных для расчета стандартных текстурных характеристик.

Ключевые слова: биометрические характеристики сосновых лесов, космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения, пороговая сегментация изображения, текстурные признаки, регрессионное моделирование

В настоящее время использование текстурных показателей для оценки характеристик лесов является наиболее перспективным методом анализа спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения ($< 1\text{ м}$). Современные подходы к обработке высокодетальных спутниковых данных нами подробно рассмотрены в обзорной статье (Князева и др., 2021). Многие исследователи успешно используют различные комбинации текстурных признаков второго порядка, рассчитанных по спутниковым изображениям, для оценки наземной биомассы лесной растительности (Wang et al., 2012), биометрических характеристик насаждений (Gomez et al., 2012; Beguet et al., 2014), дефолиации растительности (Lottering et al., 2019), определения породного состава леса (Дмитриев и др., 2022; Sibiya et al., 2022). Однако применение набора текстур изобра-

жений требует оптимизации расчета текстурных признаков, поскольку текстурные комбинации в большинстве случаев могут быть избыточны и сложны в расчетах (Beguet et al., 2014; Lottering et al., 2020). Пороговая сегментация изображений крон деревьев и межкрупного пространства на снимках также может быть эффективным подходом к оценке зависимости яркостных переменных от характеристик древостоев. Метод создания маски теней при помощи простого порогового алгоритма сегментации с последующим применением морфологических фильтров показал хорошие результаты при выделении крон деревьев на изображении (Терехов и др., 2014). Для выявления выборочных рубок на спутниковых изображениях (снятых в надир) развиваются методы, использующие сравнение матриц смежности перепадов яркости нескольких изображений. Алгоритм поз-

воляет сузить зону поиска потенциально реальных рубок, определив параметры этих зон через пороговую величину изменения перепада яркости (Алексанина, Храмцова, 2024).

Проведенные нами эксперименты с применением метода пороговой сегментации изображения показали достаточно высокую степень корреляции ($0.78 < R < 0.94$) основных характеристик смешанных лесов национального парка (НП) «Лосиный остров» (относительной полноты, средних значений возраста, высоты и диаметра) с пороговыми параметрами изображения межкроновых участков лесного полога на снимке Ikonos-2, что позволяет сделать выводы о перспективности подобных исследований (Жирин и др., 2018). Поскольку в результате эксперимента установлено, что информативность затенённых межкроновых промежутков в сомкнутом древесном пологе при сегментации изображения выше (больше значимых комбинаций пороговых значений яркости и сомкнутости полога), чем для освещённых участков, признано целесообразным более детально оценить возможности сегментации только затененных участков межкронового пространства. Этот подход был применен для регрессионного моделирования биометрических характеристик

сосновых древостоев с применением метода пороговой сегментации изображения затененных межкроновых промежутков лесного полога на высокодетальных отечественных космических снимках с «Ресурс-П1» (Никитина и др., 2019). Однако реализация кусочно-линейной регрессии в пакете STATISTICA, использованная для построения модели в приведенной выше работе, имеет принципиальные ограничения, которые приводят к завышенным коэффициентам детерминации и лишают её прогностической ценности. Новый эксперимент с использованием метода пороговой сегментации изображения, полученного с российского спутника «Ресурс-П1» (Геотон-Л), дополняет проведенные ранее исследования и апробирует предложенный метод с валидацией результатов.

Исследований с использованием данных, полученных аппаратурой сверхвысокого пространственного разрешения Геотон-Л, не так уж много, можно отметить применение высокодетальных снимков для создания трехмерных моделей местности (Пешкун, 2016), формирования «бесшовных» мозаик для регионального уровня (Марков и др., 2020), поиска и прогноза месторождений различных полезных ископаемых (Миловский и др., 2021), изучения поверхностного

волнения и батиметрии (Юровская и др., 2019). В области лесоведения представлены работы по оценке динамики вспышек массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных лесах (Федотова, Заречнева, 2017; Князева и др., 2019), оценке ареалов типов растительных сообществ (Варламова и др., 2018), состояния лесозащитных полос (Кавеленова и др., 2018), зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью (Денисова и др., 2019), возможности определения рубок (Александрин, Ким, 2019; Алексанина, Храмцова, 2024), изучению оконной структуры в древесном пологе (Комаров и др., 2021). Снимки сверхвысокого пространственного разрешения со спутников «Ресурс-П» являются в настоящее время единственным российским доступным источником высокодетальных дистанционных данных, поэтому существует настоятельная необходимость в совершенствовании, как способов радиометрической коррекции данных, так и способов их тематической обработки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Космические снимки с отечественного спутника «Ресурс-П1», полученные аппаратом сверхвысокого пространственного разрешения Геотон-Л, были

предоставлены ЦЭПЛ РАН Научным центром оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ – подразделение АО «Российские космические системы») в рамках Постановления Правительства РФ от 10 июня 2005 г. N 370.

Спутники серии «Ресурс-П» предназначены для проведения регионального и локального мониторинга состояния окружающей среды, инвентаризации и контроля использования природных ресурсов России. Первый спутник «Ресурс-П1» был запущен на солнечно-синхронную орбиту в июне 2013 г. и проработал более 8 лет до декабря 2021 г. Спутники «Ресурс-П2» и «Ресурс-П3» были выведены из эксплуатации раньше, не отработав полностью заложенный ресурс в 5 лет. В 2024 году были проведены успешные запуски спутников «Ресурс-П4» и «Ресурс-П5». С 19 марта 2025 года для потребителей доступна возможность заказа съемки со спутника «Ресурс-П» № 4 и № 5. На всех этих спутниках была установлена многозональная оптико-электронная высокодетальная аппаратура Геотон-Л со следующими характеристиками (https://ntsomz.ru/ka_resurs_p_4_5):

- полоса захвата (в надире) — 38 км;
- разрешение на местности:
- — не хуже 1 м (панхроматический режим);

- — 3-4 м (мультиспектральный режим);

- спектральные диапазоны съемки (мкм):

- — панхроматический PAN (0.60÷0.79);

- — синий B (0.48÷0.52);

- — зеленый G (0.54÷0.6);

- — красный R + крайний красный (0.62÷0.68; 0.66÷0.69; 0.7÷0.74);

- — ближний инфракрасный NIR (0.72÷0.8; 0.8÷0.9).

Материалы съемки соответствуют уровню обработки 1А с предварительной радиометрической и геометрической коррекцией и представлены в проекции UTM (WGS 84). Однако недостаточность радиометрической коррекции спектральных данных не позволяет провести дальнейшую радиометрическую калибровку по расчету стандартных коэффициентов отражения (reflectance) на основе нормализованных значений Digital Number (DN), регистрируемых сенсорами аппаратуры Геотон-Л. Поэтому выполнение стандартных расчетов текстурных характеристик первого и второго порядков (как, например, для данных сверхвысокого разрешения WorldView-3) в данном случае нецелесообразно. Для реализации метода пороговой сегментации

было решено использовать панхроматическое изображение.

Метод пороговой сегментации затенённых участков лесного полога в исследовании рассматривается как альтернативный по отношению к классическим статистическим расчётам текстур, поскольку он опирается на физические свойства объекта. Его основные принципы были изложены ранее в статье В. М. Жирина с соавторами (2018). Площадь насаждения таксационного выдела на снимке равна площади древесного полога и межкронового пространства, т.е. общее число пикселей выдела $N = N_C + N_L + N_D$, где N_C – число пикселей изображения древесного полога, N_L – число пикселей освещённых участков межкроновых промежутков, а N_D – затенённых. Пороговая сомкнутость полога (C) будет равна соотношению порогового числа пикселей изображения древесного полога (N_C) и общего числа пикселей насаждения (N): $C = N_C/N = [N - (N_L + N_D)]/N$ (Жирин и др., 2018). Если рассматривать только затененные межкроновые промежутки (N_D), тогда вместо пороговой сомкнутости полога (C) целесообразно использовать отношение числа пикселей затененных участков межкроновых промежутков (N_D) к общему числу пикселей выдела (N) $C_d = N_D/N = [N - (N_C + N_L)]/N$ (Никитина и др., 2019).

В процессе пороговой сегментации изображения выделяются затененные межкрупные сегменты, различающиеся друг от друга, как средней яркостью (D_i), так и числом пикселей (N_{Di}), но для которых соблюдается определенный заданный критерий однородности (диапазон яркости). Первоначальный этап включает выделение локальных минимумов затененных участков межкрупного пространства. На каждом последующем этапе происходит увеличение размера выделяемых сегментов в результате объединения соседних пикселей с учетом спектральной близости их значений при задан-

ном пороге яркости. Значимые величины пороговой яркости и сомкнутости полога определяются на основе матриц парной корреляции каждого из пороговых значений с биометрическими параметрами древостоев (Жирин и др., 2018).

Для нашего эксперимента выбрана сцена с пространственным разрешением около 1 м, полученная в панхроматическом диапазоне (0.58 – 0.8 мкм) съемочной аппаратурой Геотон-Л на спутнике «Ресурс-П1» 10 июля 2017 года для НП «Куршская коса», которая покрывает около 60 % территории парка, включая центральную и северную части (рис. 1).

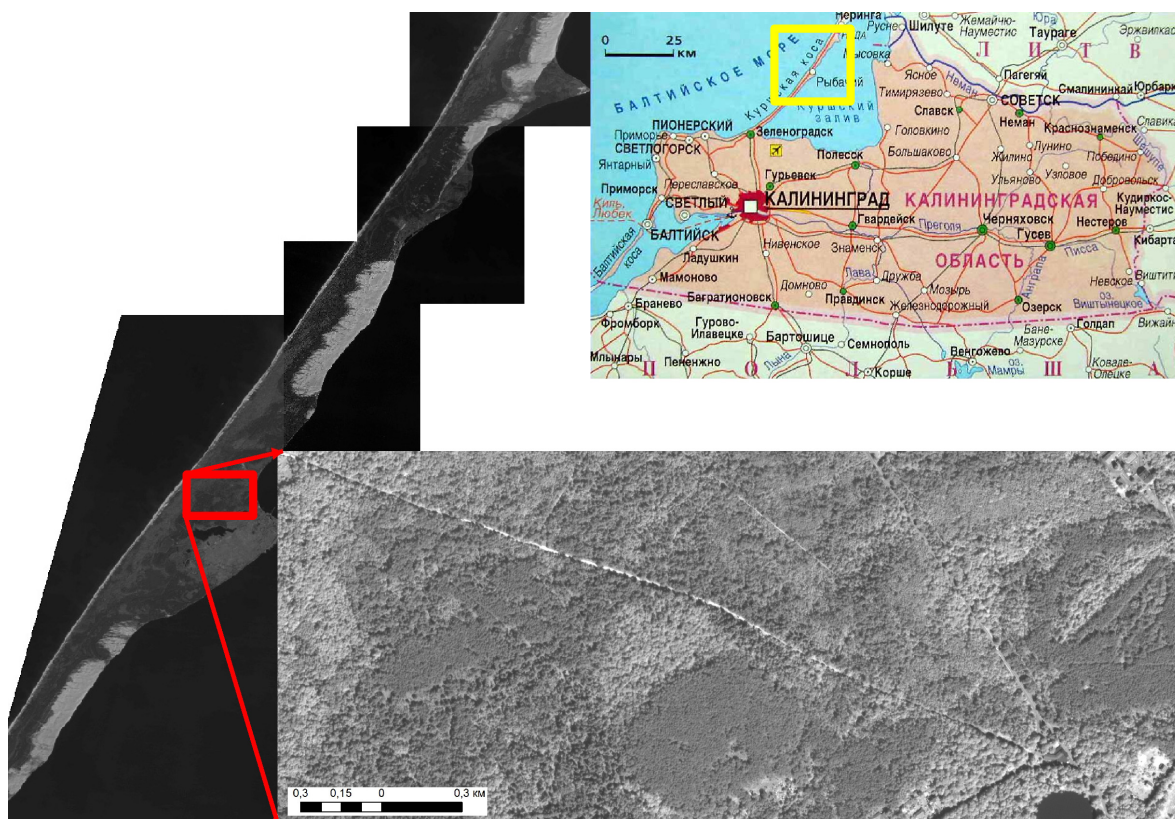


Рисунок 1. Панхроматическое изображение, полученное высокодетаальной аппаратурой Геотон-Л со спутника «Ресурс-П1» 10.07.2017 на территорию НП «Куршская коса» (Калининградская обл.) с увеличенным фрагментом. Рамкой желтого цвета выделено расположение сцены Геотон-Л на карте Калининградской области

На начальном этапе исследования проведена предварительная обработка изображения. Ввиду больших размеров растрового файла (около 10 Гб) и ограниченных технических ресурсов для обработки столь больших объемов информации исходное изображение разделено на 4 фрагмента с небольшим перекрытием. Каждый фрагмент трансформирован аффинными преобразованиями для более точного совмещения с векторными границами таксационных выделов. Средняя ошибка трансформирования не превышала 1 – 3 пикселя (около 3 м).

Основными лесообразующими породами на территории парка являются сосна, ель, береза, ольха черная. Более половины лесопокрытой площади занимают сосняки, среди которых преобладает сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), но встречаются также другие виды сосен (горная, Банкса, крымская, Муррея). Сосняки формируют как простые, так и сложные по породному составу древостои. Наиболее распространены средне-

возрастные и молодые насаждения, приуроченные к возвышенным формам рельефа. В молодых и средневозрастных сосняках доминирует ксерофитно-зеленомошный тип леса, а в старовозрастных к нему добавляется мелкотравно-зеленомошный.

Из базы таксационных данных лесоустройства 2016 г. отобраны выделы, соответствующие следующим критериям:

- категория земель – лесные культуры и естественные насаждения,
- доля преобладающей породы сосна обыкновенная – более 6 единиц,
- полнота не менее 0.6;
- средний диаметр стволов более 3 см;
- средняя высота более 5 метров.

Всего было отобрано 602 выдела с преобладанием сосны обыкновенной. Анализ распределения средних возрастов (рис. 2А) показал, что наиболее многочисленны средневозрастные насаждения, однако в выборке присутствуют все группы возраста – от молодняков 10 лет до древостоев 140 лет.

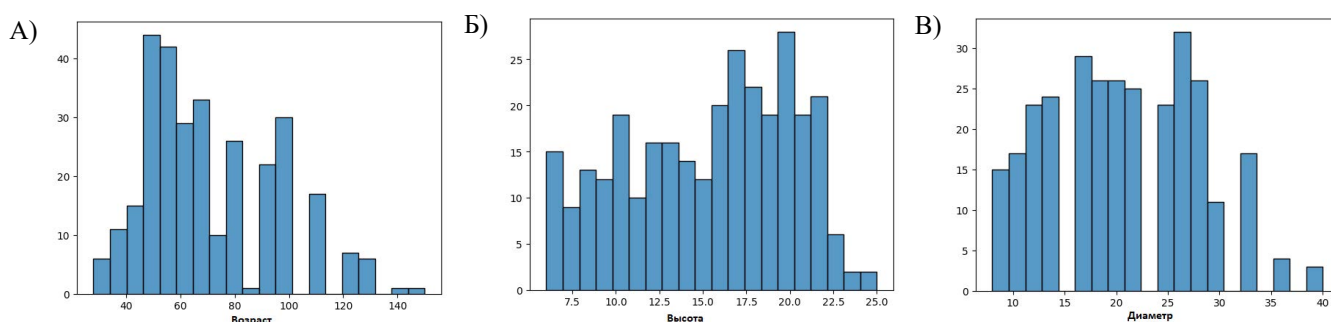


Рисунок 2. Гистограмма распределения биометрических параметров насаждений для выборки (602 выдела) из лесотаксационных данных (2016 г.) НП «Куршская коса»: А) средний возраст; Б) средняя высота; В) средний диаметр

Важным этапом сегментирования изображений является выбор начальных минимальных яркостных значений затененных участков (D_0). Определение локальных минимумов проведено на основе расчета статистических характеристик в границах выделов и визуального анализа снимка. По векторному слою лесоустройства из каждого фрагмента изображения Геотон-Л извлечены минимальные значения спектральной яркости, на основе которых определен минимальный порог для выделения самого темного участка выдела (D_0). Для сосны D_0 на изображении составило 101 DN, таким образом, начальный яркостной порог D_0 для выделения теневого участка выбран равным 100. В качестве максимального яркостного порога выбрано

значение 200 DN, которое заведомо избыточно и, по результатам визуальной идентификации, соответствует затененным участкам крон деревьев. Всего выбрано 10 пороговых яркостных значений ($D_0...D_{10}$) затененных межкроновых промежутков с постепенным расширением верхней границы диапазона на 10 единиц яркости: для D_0 диапазон составил 100-110; а для D_{10} – 100-200.

На основе пороговых значений яркости проведено сегментирование изображений и созданы маски для каждого диапазона яркости теневых межкроновых промежутков древесного полога. На рис. 3 приведены фрагменты сегментированного изображения с наложенным векторным слоем таксационных выделов.

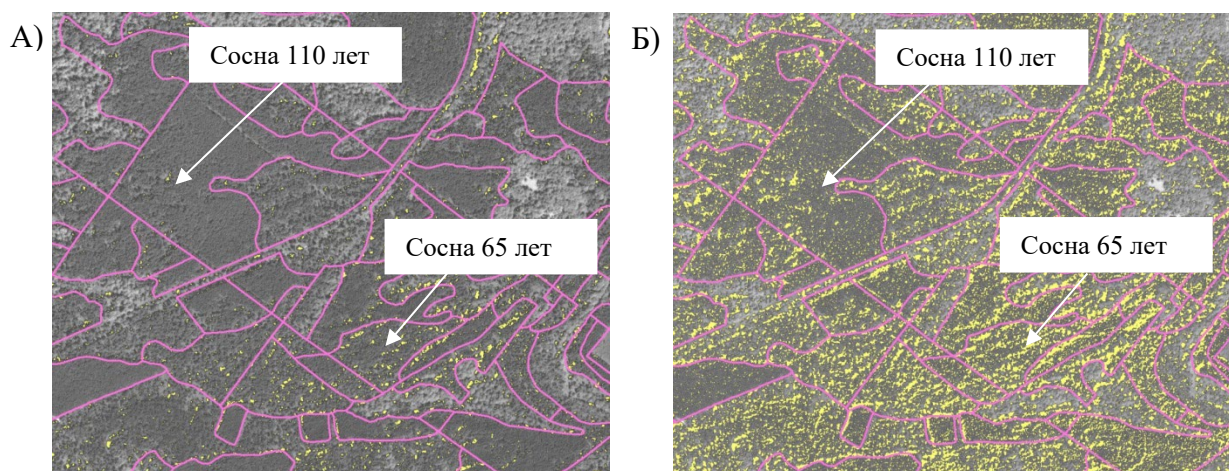


Рисунок 3. Фрагмент изображения Геотон-Л (10.07.2017г.) с наложенным векторным слоем таксационных выделов и маской теневых межкроновых промежутков, выделенных желтым цветом: А) диапазон D_4 – 100-140; Б) диапазон D_8 – 100-180

По полученным маскам были рассчитаны площади сегментов ($N_{D0}...N_{Dn}$) теневых участков в границах выделов, средние значения яркости этих сегментов ($D_0...D_n$), а также стандартные отклонения и медианы. Для каждого выдела на основе этих показателей вычислена пороговая сомкнутость полога, учитывающая только затененные межкрупные промежутки (Cd). Распределение значений D_n и Cd_n для диапазонов $D_4 - 100-140$ и $D_8 - 100-180$ приведено на рис. 4.

Статистические характеристики ($D_0...D_n$) и ($Cd_0...Cd_n$) использовались в качестве предикторов при регрессионном анализе между биометрическими характеристиками сосновых лесов (высота, диаметр, возраст) и особенностями изображения древесного полога на космических снимках Геотон-Л.

Для регрессионного анализа применялись два подхода: кусочно-линейная регрессия в пакете STATISTICA и ансамблевый метод Random Forest (RF), реали-

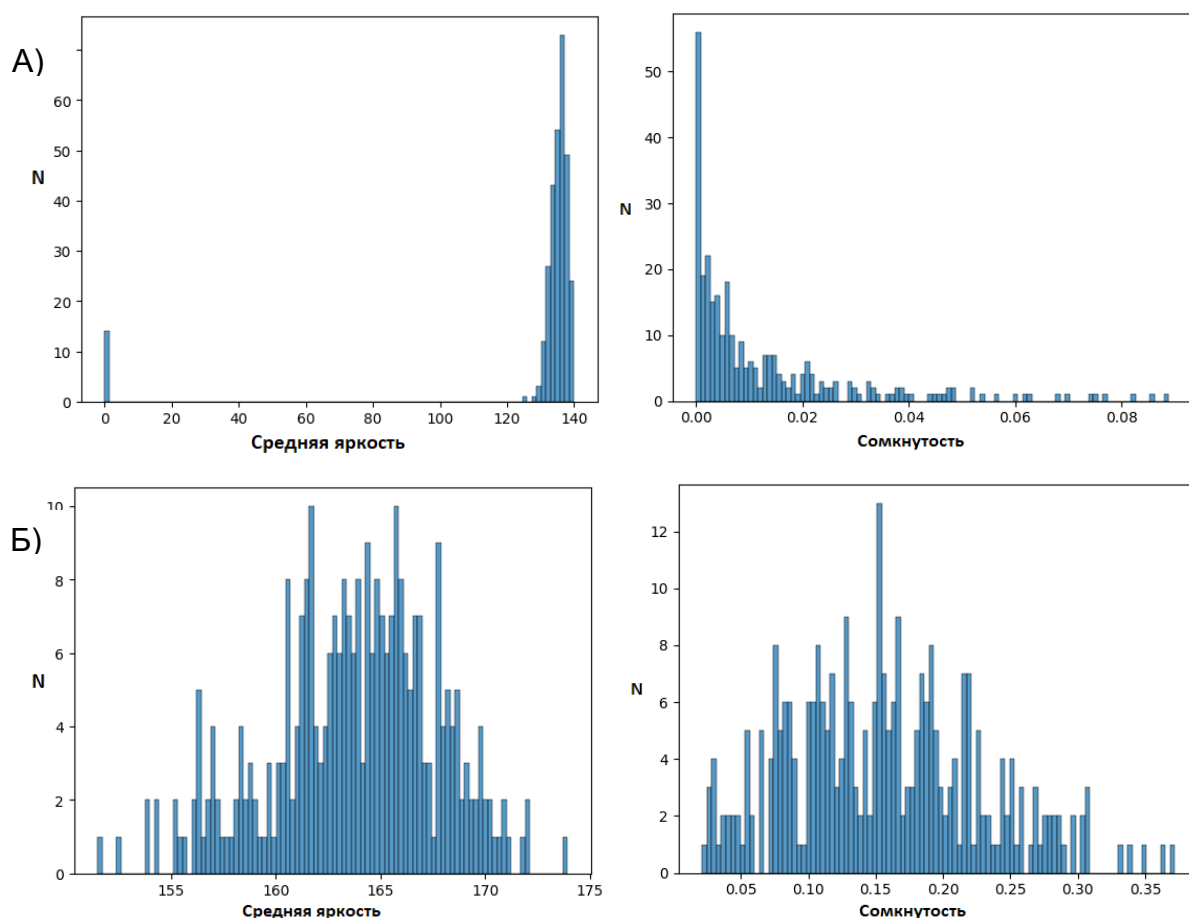


Рисунок 4. Распределение характеристик средней яркости полога D_n и пороговой сомкнутости полога Cd_n для яркостных диапазонов изображения Геотон-Л (10.07.2017г.): А) $D_4 - 100-140$; Б) $D_8 - 100-180$

зованный в библиотеке *scikit-learn* языка Python. Для оценки точности моделей использовали коэффициент детерминации R^2 и среднеквадратическую ошибку RMSE.

Для регрессионного анализа на основе кусочно-линейной функции значимые величины ($D_0...D_n$) и ($Cd_0...Cd_n$) определялись на основе матриц парной корреляции каждого из пороговых значений с биометрическими и морфоструктурными показателями. При значениях коэффициента корреляции Пирсона более 0.7 один из мультиколлинеарных факторов удалялся. Переменные с низким уровнем значимости ($p > 0.05$) также отсеивались. После прохождения всех итераций поиска мультиколлинеарных факторов был сформирован набор факторов, который и использовался в регрессионных моделях. Следует отметить, что кусочно-линейная регрессия в используемой реализации не формирует устойчивой модели зависимости $X \rightarrow Y$. Алгоритм строит несколько линейных функций и автоматически выбирает для каждой точки ту, которая ближе к фактическому значению Y , что приводит к завышенной оценке коэффициента детерминации R^2 . Поэтому этот метод в нашем исследовании рассматривался исключительно как вспомогательный инструмент. Основной анализ был выполнен с

использованием алгоритма Random Forest, который позволяет избежать проблемы мультиколлинеарности, провести кросс-валидацию и получить более надёжные оценки качества модели.

При использовании метода RF для каждой целевой переменной строилась отдельная регрессионная модель. Исходные данные случайным образом делились на обучающую (70%) и валидационную (30%) выборки. Построение моделей включало следующие этапы:

- подбор оптимальных гиперпараметров (количество деревьев и глубина ветвей) путём последовательного перебора с оценкой R^2 и RMSE. Из множества пар параметров (количество деревьев и ветвей) выбиралась пара с наилучшими показателями точности;

- построение модели и её проверка с использованием кросс-валидации на обучающей выборке;

- вычисление важности признаков (пермутационной и на основе критерия Джини);

- ранжирование признаков по значимости и пошаговое добавление их в модель до момента стабилизации точности (пока оценка качества модели не переставала улучшаться);

- тестирование окончательной модели на валидационной выборке.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При использовании кусочно-линейной регрессии статистически значимыми оказывались в основном переменные D_n из нижних и средних пороговых диапазонов (100-110, 100-120, ..., 100-160), а переменные C_{dn} - из крайних диапазонов (100-110, 100-190, 100-200). Результаты использования кусочно-линейной регрессии представлены в таблице 1.

Коэффициент детерминации для параметров сосновых лесов варьирует в пределах от 0.75 до 0.98, что характеризует достаточно высокую тесноту связи пороговых значений и параметров древостоев. При сопоставлении с результатами аналогичных расчётов по изображению Геотон-Л от 09.06.2018 (Никитина и др., 2019) значения R^2 и RMSE также оказа-

лись близкими. Так, для значения «средний диаметр» коэффициент регрессии составлял 0.79, а RMSE – 3.86 см, для среднего возраста – 0.77 и 13.83 лет, соответственно. Таким образом, применение метода пороговой сегментации позволяет получать стабильные результаты даже при выборке на четверть меньше исходной (602 выдела вместо 823), главным условием остается пропорциональное представительство биометрических параметров в обучающей выборке. Также, полученные результаты подтверждают, что сами показатели пороговой сегментации являются воспроизводимыми и отражают особенности древостоев. Однако важно подчеркнуть, что их нельзя валидировать через кусочно-линейную регрессию, поскольку используемая реализация

Таблица 1. Результаты применения кусочно-линейной регрессии для оценки взаимосвязи биометрических параметров сосновых лесов и характеристик изображения Геотон-Л (10.07.2017 г.)

Характеристики	Переменные	R^2	RMSE
Высота, м	D_1 (1), D_2 (2), D_3 (3), D_4 (4), D_5 (5), D_6 (6), Cd_1 (7), Cd_9 (8)	0.98	5.25
Диаметр, см	D_1 (1), D_2 (2), D_3 (3), D_4 (4), D_5 (5), D_6 (6), Cd_1 (7), Cd_3 (8)	0.75	3.66
Возраст, лет	D_1 (1), D_2 (2), D_3 (3), D_4 (4), D_5 (5), D_6 (6), D_8 (7), Cd_1 (8), Cd_{10} (9)	0.78	11.84

кусочно-линейной регрессии фактически выбирает для каждой точки ту линейную функцию, которая ближе к наблюдаемому значению Y , что приводит к завышенной оценке качества аппроксимации.

Для корректной оценки характеристик сосновых древостоев в настоящей работе основное внимание уделено моделям, построенным с использованием ансамблевого метода Random Forest. Наибольшую значимость среди переменных средней яркости и сомкнутости полога в алгоритме Random Forest показали максимальные пороговые диапазоны (170-200 DN) (табл. 2).

Коэффициенты детерминации R^2 для всех трёх характеристик сосновых лесов находятся в диапазоне 0.29 – 0.37,

а среднеквадратические ошибки составляют 4.2 м для высоты, 5.8 – 6.1 см для диаметра и 20 – 22 лет для возраста. Несмотря на умеренные значения R^2 , результаты на тестовой выборке практически идентичны обучающим, что свидетельствует о стабильности и надёжности моделей RF. Сравнение с результатами моделирования по текстурным характеристикам первого порядка, рассчитанным по мультиспектральным данным WorldView-3 (Князева и др., 2021), показало, что точность моделей RF на данных Геотон-Л сопоставима, но немного ниже, хотя выборка, используемая для обучения и проверки модели значительно больше, чем для данных WorldView-3 (табл. 3).

Таблица 2. Результаты применения метода Random Forest (RF) для оценки взаимосвязи биометрических параметров сосновых лесов и характеристик изображения Геотон-Л (10.07.2017 г.)

Характеристики	Переменные	R^2	RMSE	R^2 тест	RMSE тест
Высота, м	D ₁₀ (1), D ₉ (2), Cd ₈ (3), Cd ₇ (4), Cd ₁₀ (5)	0.30	4.2	0.30	4.2
Диаметр, см	D ₁₀ (1), D ₉ (2), Cd ₈ (3), Cd ₁₀ (4), Cd ₇ (5)	0.37	5.8	0.31	6.1
Возраст, лет	D ₁₀ (1), Cd ₁₀ (2), D ₉ (3), Cd ₈ (4), Cd ₉ (5)	0.29	20.4	0.27	22.5

Таблица 3. Сводная статистика оценок характеристик лесов для регрессионных моделей методом RF по данным Ресурс-П1 (Геотон-Л) и WorldView-3

Характеристики	Ресурс-П1 (602 выдела)				WorldView-3*(253 выдела)			
	R ²	RMSE	R ² тест	RMSE тест	R ²	RMSE	R ² тест	RMSE тест
Высота, м	0.30	4.2	0.30	4.2	0.53	2.9	0.40	3.3
Диаметр, см	0.37	5.8	0.31	6.1	0.54	4.6	0.41	5.0
Возраст, лет	0.29	20.4	0.27	22.5	0.47	18.5	0.32	19.7

*Князева С. В., Никитина А. Д., Гаврилюк Е. А., Тихонова Е. В., Королева Н. В. Оценка биометрических параметров сосновых древостоев по спутниковым данным WorldView-3 и материалам беспилотной аэро съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 93–107

Коэффициенты детерминации примерно в 1.5 раза меньше, но и для данных WorldView-3 они небольшие и находятся в диапазоне 0.47 – 0.53. Возможно, на довольно умеренные значения коэффициентов детерминации влияет неоднородность таксационных выделов. Средняя площадь выдела составляет 2 га, а среднеквадратическое отклонение чуть больше – 2.3 га (при этом минимальное значение площади выдела 0.2 га, а максимальное – около 20 га). Такой значительный разброс увеличивает неоднородность спектральных характеристик изображения древесного полога выделов на снимке. Свой вклад вносят и особенности условий объединения насаждений в один таксационный выдел, которые зависят, главным образом, от стволового запаса

древесины, что не всегда находит отражение в строении верхнего полога древостоя. Наиболее высокие коэффициенты R² отмечены в обоих случаях для значений «средний диаметр». При этом, в случае с WorldView-3, хотя моделирование происходило на основе переменных, полученных из мультиспектральных данных, наибольшую информативность показал панхроматический канал. Из работы испанских ученых (Gomez et al., 2012), можно отметить, что в результате использования мультиспектральных данных со спутника QuickBird-2 для моделирования ряда биометрических характеристик средиземноморских сосновых лесов на основе текстурных метрик GLCM (метод CART – Classification and Regression Tree Analysis) лучшие результаты также

были получены при оценке среднеквадратического диаметра деревьев: $R^2 = 0.8$ и $RMSE = 0.13$ м.

Достаточно интересно сравнить полученные нами оценки с результатами французских исследователей, которые проводили эксперимент для насаждений приморской сосны (*Pinus pinaster* Ait.) в лесном массиве на юго-западном побережье Франции (Beguet et al., 2014). В их работе анализировался потенциал текстурных характеристик, извлечённых из спутниковых снимков сверхвысокого пространственного разрешения QuickBird и Pléiades, с использованием признаков второго порядка GLCM. Особое внимание уделялось автоматической настройке параметров, что является одной из ключевых проблем анализа текстуры. Для оптимизации тестировались различные комбинации панхроматических и мультиспектральных признаков с применением многомерной линейной регрессии. Итогом стало предложение алгоритма PRiF (автоматизированный выбор и параметризация признаков GLCM), основанного на глобальной оптимизации методом случайной выборки. В условиях однородных сосновых культур авторы получили очень низкие ошибки моделирования (LOO $RMSE$ 0.5 м для высоты и 1 см для диаметра), но при переходе к более

сложным разновозрастным насаждениям точность существенно снижалась: $RMSE$ составила 3.1 м и 6.6 см, соответственно. Эти результаты сопоставимы с нашими моделями для разновозрастных сосняков на Куршской косе (табл. 3). При этом R^2 достаточно высокий и варьирует от 0.99 для первого участка до 0.81 для второго.

Несмотря на более низкие значения R^2 в наших моделях, величины ошибок $RMSE$ оказались близкими к тем, что получены с использованием текстурных признаков первого и второго порядков. Это указывает на то, что метод пороговой сегментации, будучи значительно проще по реализации, обеспечивает сопоставимый уровень точности при оценке средних характеристик сосновых лесов.

ВЫВОДЫ

Регрессионное моделирование с использованием алгоритма Random Forest показало, что переменные, рассчитанные методом пороговой сегментации затённых межкроновых промежутков сомкнутого лесного полога по высокодетальным панхроматическим изображениям, полученным со спутника «Ресурс-П1», обеспечивают воспроизводимые оценки характеристик сосновых древостоев (на примере НП «Куршская коса») со среднеквадратической ошибкой по

рядка 4 м для средней высоты, 6 см для диаметра и 20 лет для возраста. Несмотря на умеренные значения коэффициента детерминации, совпадение результатов на обучающей и валидационной выборках подтверждает надёжность моделей.

Метод пороговой сегментации может применяться для предварительной оценки характеристик древостоев, особенно в условиях, когда недостаточная радиометрическая коррекция данных ограничивает возможность расчёта стандартных текстурных признаков. Использование мультиспектральных и разносезонных изображений способно повысить точность прогнозирования, однако сопряжено с усложнением модели. Вероятно, также может повысить точность моделирования применение в качестве обучающей выборки более однородных сегментов изображения древесного полога, чем таксационные выделы. В целом, полученные результаты подтверждают применимость пороговой сегментации для высокодетальных изображений как инструмента экспресс-оценки сосновых лесов на уровне выделения возрастных групп и их основных биометрических характеристик.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет средств государственного задания по теме «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (Регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексанин А. И., Ким В.* Обнаружение рубок по теням // VI Международная научная конференция «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли», Сибирский федеральный университет, Институт космических и информационных технологий. 2019. С. 66–68.
- Алексанина М. Г., Храмцова А. В.* Обнаружение мелкомасштабной изменчивости лесного полога на спутниковых панхроматических изображениях на основе матрицы смежности перепадов яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 47–59.
- Варламова А. А., Денисова А. Ю., Сергеев В. В.* Информационная технология обработки данных ДЗЗ для оценки ареалов растений // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 5. С. 864–876.

- Денисова А. Ю., Егорова А. А., Сергеев В. В., Кавеленова Л. М. Выработка требований к мультиспектральным данным дистанционного зондирования Земли в задаче экспертизы зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 5. С. 846–856.
- Дмитриев Е. В., Кондранин Т. В., Зотов С. А. Сегментация природных и антропогенных объектов по панхроматическим спутниковым изображениям с использованием статистических текстурных признаков // Автометрия. 2022. Т. 58. № 2. С. 69–84.
- Жирин В. М., Князева С. В., Эйдлинка С. П. Оценка биометрических параметров насаждений по изображениям междокровного пространства на космических снимках сверхвысокого разрешения // Лесоведение. 2018. № 3. С. 163–177.
- Кавеленова Л. М., Корчилов Е. С., Прохорова Н. В., Терентьева Д. А., Федосеев В. А. К возможностям обнаружения и оценки состояния лесополос на основе комплексного использования данных ДЗЗ и наземного обследования // IV международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018), Самара: Новая техника, 2018. С. 882–891.
- Князева С. В., Королева Н. В., Эйдлинка С. П., Сочилова Е. Н. Оценка состояния растительности в очаге массового размножения сибирского шелкопряда по спутниковым данным // Лесоведение. 2019. № 5. С. 385–398.
- Князева С. В., Никитина А. Д., Белова Е. И., Плотникова А. С., Подольская Е. С., Ковганко К. А. Методические подходы к оценке характеристик лесов по данным спутниковой съемки сверхвысокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне // Лесоведение. 2021. № 6. С. 1–28.
- Князева С. В., Никитина А. Д., Гаврилюк Е. А., Тихонова Е. В., Королева Н. В. Оценка биометрических параметров сосновых древостоев по спутниковым данным WorldView-3 и материалам беспилотной аэро съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 93–107.
- Комаров А. В., Ершов Д. В., Тихонова Е. В. Информативность спектральных и морфометрических признаков оконной структуры полога древостоя на основе спутниковых данных // Лесоведение. 2021. № 3. С. 227–239.

- Марков А. Н., Васильев А. И., Крылов А. В., Евлашкин М. А., Пестряков А. А., Михеев А. А., Алексеевский А. С. Особенности обработки данных сенсора «Геотон-Л1» космического аппарата Ресурс-П при формировании бесшовных сплошных покрытий регионов РФ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. № 1. С. 72–83.
- Миловский Г. А., Ишмухаметова В. Т., Апарин А. Д. Применение космической съемки высокого разрешения при поисках прибрежных россыпей и месторождений углеводородов в северных морях России // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 74–82.
- Научный центр оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы» (НЦ ОМЗ). URL: https://ntsomz.ru/ka_resurs_p_4_5/ (дата обращения 07.10.2025)
- Никитина А. Д., Князева С. В., Королева Н. В., Гаврилюк Е. А., Эйлина С. П. Применение метода пороговой сегментации изображений для определения параметров древесной растительности по спутниковым данным сверхвысокого пространственного разрешения // Международная научно-практическая конференция «Геоматика: образование, теория и практика», посвященная 50-летию кафедры геодезии и космоаэрокартографии и 85-летию факультета географии и геоинформатики БГУ. Сб. статей. РБ, Минск, 2019. С. 114–118.
- Пешкун А. А. Создание трехмерных моделей местности с использованием материалов съемки космического аппарата типа «Ресурс-П» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2016. Т. 3. Выпуск 1. С. 28–33.
- Терехов А. Г., Макаренко Н. Г., Пак И. Т. Автоматический алгоритм классификации снимков QuickBird в задаче оценки полноты леса // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 3. С. 580–583.
- Федотова Е. В., Заречнева А. И. Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Горного Алтая // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 6. С. 747–757.
- Юровская М. В., Кудрявцев В. Н., Станичный С. В. Восстановление кинематических характеристик поверхностей

ного волнения и батиметрии по многоканальным оптическим снимкам комплекса «Геотон-Л1» на спутнике «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 218–226.

Beguet B., Guyon D., Boukir S., Chehata N. Automated retrieval of forest structure variables based on multi-scale texture analysis of VHR satellite imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2014. Vol. 96. P. 164–178.

Gomez C., Wulder M., Montes F., Delgado J. Modeling Forest Structural Parameters in the Mediterranean Pines of Central Spain using QuickBird-2 Imagery and Classification and Regression Tree Analysis (CART) // Remote Sensing. 2012. Vol. 4. P. 135–159. DOI: 10.3390/rs4010135

Lottering R., Mutanga O., Peerbhay K., Ismail R. Detecting and mapping *Gonipteris scutellatus* induced vegetation defoliation using WorldView-2 pan-sharpened image texture combinations and an artificial neural network // Journal of Applied Remote Sensing. 2019. Vol. 13(1). DOI: 10.1117/1.JRS.13.014513

Sibiya B., Lottering R., Odindi J. Utility of texture combinations computed from

fused WorldView-2 imagery in discriminating commercial forest species // Geocarto international. 2022. Vol. 37. Issue 23. P. 6915–6931. DOI: 10.1080/10106049.2021.1952316

Wang W., Yao X., Yao X., Tian Y., Liu X., Ni J., Cao W., Zhu Y. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat // Field Crops Research. 2012. Vol. 129. P. 90–98. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.01.014

REFERENCES

Aleksanin A. I., Kim V., Obnaruzhenie rubok po tenyam (Detection of logging sites) *VI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Regional'nye problemy distanционного zondirovaniya Zemli»* (6th International Scientific Conference «Regional Problems of Remote Sensing of the Earth»), Sibirskij federal'nyj universitet, Institut kosmicheskikh i informacionnyh tekhnologij, 2019, pp. 66–68.

Aleksanina M. G., Khramtsova A. V., Obnaruzhenie melkomasshtabnoj izmenchivosti lesnogo pologa na sputnikovyh panhromaticeskikh izobrazheniyah na osnove matricy smezhnosti perepadov yarkosti (Detection of small-scale forest canopy variability in satellite panchromatic images based on brightness

- difference adjacency matrix), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No 4, pp. 47–59.
- Beguet B., Guyon D., Boukir S., Chehata N., Automated retrieval of forest structure variables based on multi-scale texture analysis of VHR satellite imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, Vol. 96. pp. 164–178.
- Denisova A. Yu., Egorova A. A., Sergeev V. V., Kavelenova L. M., Vyrabotka trebovanij k mul'tispektral'nyh dannym distancionnogo zondirovaniya Zemli v zadache ekspertizy zarastaniya pakhotnyh zemel' drevesno-kustarnikovej rastitel'nost'yu (Development of requirements for multispectral Earth remote sensing data in the task of assessing the overgrowth of arable lands with trees and shrubs), *Komp'yuternaya optika*, 2019, Vol. 43, No 5, pp. 846–856.
- Dmitriev E. V., Kondranin T. V., Zotov S. A., Segmentaciya prirodnyh i antropogennyh ob"ektov po panhromaticeskim sputnikovym izobrazheniyam s ispol'zovaniem statisticheskikh teksturnykh priznakov (Segmentation of natural and anthropogenic objects from panchromatic satellite images using statistical texture features), *Avtometriya*, 2022, Vol. 58, No 2, pp. 69–84.
- Fedotova E. V., Zarechneva A. I., Prostranstvenno-vremennaya dinamika vspyshki massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada v temnohvojnyh drevostoyah Gornogo Altaya (Spatial-temporal dynamics of siberian silkmouth outbreak in dark needle coniferous forest in Altay Mountains), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2017, Vol. 10, No 6, pp. 747–757.
- Gomez C., Wulder M., Montes F., Delgado J., Modeling Forest Structural Parameters in the Mediterranean Pines of Central Spain using QuickBird-2 Imagery and Classification and Regression Tree Analysis (CART), *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, pp. 135–159, DOI: 10.3390/rs4010135
- Kavelenova L. M., Korchikov E. S., Prohorova N. V., Terent'eva D. A., Fedoseev V. A., K vozmozhnostyam obnaruzheniya i ocenki sostoyaniya lesopolos na osnove kompleksnogo ispol'zovaniya dannyh DZZ i nazemnogo obsledovaniya (On the possibilities of detecting and assessing the condition of forest belts based on the integrated use of remote sensing data and ground-based surveys), *IV mezhdunarodnaya konfe-*

renciya i molodezhnaya shkola «Informacionnye tekhnologii i nanotekhnologii» (ITNT-2018) (4th International Conference and Youth School «Information Technology and Nanotechnology»), Samara: Novaya tekhnika, 2018, pp. 882–891.

Knyazeva S. V., Koroleva N. V., Ejdlina S. P., Sochilova E. N., Ocenka sostoyaniya rastitel'nosti v ochage massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada po sputnikovym dannym (Health of vegetation in area of mass outbreaks of siberian moth: a satellite-based estimate), *Lesovedenie*, 2019, No 5, pp. 385–398.

Knyazeva S. V., Nikitina A. D., Belova E. I., Plotnikova A. S., Podol'skaya E. S., Kovganko K. A., Metodicheskie podhody k ocenke harakteristik lesov po dannym sputnikovoj s"emki sverhvyssokogo prostranstvennogo razresheniya v opticheskom diapazone (Methods and approaches to the estimation of forest characteristics using the optical satellite data of very high spatial resolution), *Lesovedenie*, 2021, No 6, pp. 1–28.

Knyazeva S. V., Nikitina A. D., Gavriluk E. A., Tihonova E. V., Koroleva N. V., Ocenka biometricheskikh parametrov sosnovykh drevostoev po sputnikovym dannym

WorldView-3 i materialam bespilotnoj aeros"emki (Biometric parameter determination of pine stands based on WorldView-3 imagery and UAV survey), *Sovremennye problemy distanционного zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No 6, pp. 93–107.

Komarov A. V., Ershov D. V., Tihonova E. V., Informativnost' spektral'nykh i morfometricheskikh priznakov okonnoj struktury pologa drevostoya na osnove sputnikovyx dannykh (Informativeness of spectral and morphometric characteristics of the canopy gap structure based on the remote sensing), *Lesovedenie*, 2021, No 3, pp. 227–239.

Lottering R., Mutanga O., Peerbhay K., Ismail R., Detecting and mapping *Gonipterus scutellatus* induced vegetation defoliation using WorldView-2 pan-sharpened image texture combinations and an artificial neural network, *Journal of Applied Remote Sensing*, 2019, Vol. 13(1), DOI: 10.1117/1.JRS.13.014513

Markov A. N., Vasil'ev A. I., Krylov A. V., Evlashkin M. A., Pestryakov A. A., Miheev A. A., Alekseevskij A. S., Osobennosti obrabotki dannykh sensora «Geoton-L1» ksmicheskogo apparata Resurs-P pri formirovanii besshovnykh sploshnykh pokrytij regionov RF

- (Features of data processing from the Geoton-L1 sensor of the Resurs-P spacecraft when forming seamless continuous coverage of the Russian Federation regions), *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*, 2020, Vol. 7, No 1, pp. 72–83.
- Milovsky G. A., Ishmukhametova V. T., Aparin A. D., *Primenenie kosmicheskoy s"emki vysokogo razresheniya pri poiskah pribrezhnyh rossypej i mestorozhdenij uglevodorodov v severnyh moryah Rossii* (Using high resolution space survey in searching for coastal springs and deposits of hydrocarbons in the northern seas of Russia), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, No 6, pp. 74–82.
- Nauchnyj centr operativnogo monitoringa Zemli AO «Rossijskie kosmicheskie sistemy» (Scientific Center for Operational Monitoring of the Earth of JSC Russian Space Systems, NC OMZ), URL: https://ntsomz.ru/ka_resurs_p_4_5/ (October 07, 2025)
- Nikitina A. D., Knyazeva S. V., Koroleva N. V., Gavrilyuk E. A., Ejdlina S. P., *Primenenie metoda porogovoj segmentacii izobrazhenij dlya opredeleniya parametrov drevesnoj rastitel'nosti po sputnikovym dannym sverhвысокoго prostranstvennogo razresheniya* (Application of image thresholding method to determine tree vegetation parameters from ultra-high spatial resolution satellite data), *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya «Geomatika: obrazovanie, teoriya i praktika», posvyashchennaya 50-letiyu kafedry geodezii i kosmoaerokartografii i 85-letiyu fakul'teta geografii i geoinformatiki BGU* (International Scientific and Practical Conference «Geomatics: Education, Theory, and Practice»), Sb. statej. RB, Minsk, 2019. pp. 114–118.
- Peshkun A. A., *Sozdanie trekhmernyh modelej mestnosti s ispol'zovaniem materialov s"emki kosmicheskogo apparata tipa «Resurs-P»* (Creating of 3D surface models using «Resurs-P» spacecraft images), *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informacionnye sistemy*, 2016, Vol. 3, No 1, pp. 28–33.
- Sibiya B., Lottering R., Odindi J., *Utility of texture combinations computed from fused WorldView-2 imagery in discriminating commercial forest species*, *Geocarto international*, 2022, Vol. 37, No 23, pp. 6915–6931, DOI: 10.1080/10106049.2021.195231623
- Terekhov A. G., Makarenko N. G., Pak I. T., *Avtomaticheskij algoritm klassifikacii*

snimkov QuickBird v zadache ocenki polnoty lesa (Automatic classification algorithm of quick bird images in the problem of evaluating of forest completeness), *Komp'yuternaya optika*, 2014, Vol. 38, No 3, pp. 580–583.

Varlamova A. A., Denisova A. Yu., Sergeev V. V., Informacionnaya tekhnologiya obrabotki dannyh DZZ dlya ocenki arealov rastenij (Information technology for processing remote sensing data for assessing plant ranges), *Komp'yuternaya optika*, 2018, Vol. 42, No 5, pp. 864–876.

Wang W., Yao X., Yao X., Tian Y., Liu X., Ni J., Cao W., Zhu Y., Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat, *Field Crops Research*, 2012, Vol. 129, pp. 90–98, DOI: 10.1016/j.fcr.2012.01.014

Yurovskaya M. V., Kudryavtsev V. N., Stanichny S. V., Vosstanovlenie kine-

mатических характеристик поверхностного волнения и батиметрии по многоканальным оптическим снимкам комплекса «Geoton-L1» на спутнике «Resurs-P» (Reconstruction of surface wave kinematic characteristics and bathymetry from Geoton-L1 multi-channel optical images from Resurs-P satellite), *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No 2, pp. 218–226.

Zhirin V. M., Knyazeva S. V., Ejdlina S. P., Ocenka biometricheskikh parametrov nasazhdenij po izobrazheniyam mezhkronovogo prostranstva na kosmicheskikh snimkah sverkhvysokogo razresheniya (Estimation of linkages between biometric indexes of forests and pattern of canopy spaces on super-high resolution satellite images), *Lesovedenie*, 2018, No 3, pp. 163–177.

APPLICATION OF THE THRESHOLD SEGMENTATION METHOD FOR ASSESSING FOREST CHARACTERISTICS BASED ON HIGH-DETAILED RESURS-P1 SATELLITE DATA

S. V. Knyazeva*, A. D. Nikitina, E. I. Belova

*Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia*

*E-mail: knsvetl@gmail.com

Received: 08.10.2025

Revised: 17.11.2025

Accepted: 28.11.2025

This article presents the results of a study examining the potential of threshold segmentation of intercrown areas of forest canopy images using domestic ultra-high-resolution satellite images obtained from the Resurs-P1 (Geoton-L) satellite to identify the relationship between segmentation parameters and biometric characteristics of pine stands, using the forests of the Curonian Spit National Park as an example. The proposed method is based on identifying shaded segments of the intercrown space within forest stand boundaries, taking into account a specified brightness range, and then merging adjacent pixels based on spectral proximity at a new specified brightness threshold. For each specified threshold, the areas and average brightness values of shadow segments within the stand boundaries, standard deviations, and median values are determined. Based on these values, a threshold canopy closure is calculated for each stand, taking into account only shaded intercrown spaces. Statistical characteristics of average brightness and canopy closure threshold serve as variables for regression modeling of biometric characteristics (height, diameter, and stand age) of pine forests.

The regression analysis was conducted using an ensemble method with Random Forest (RF) decision tree construction. The R^2 coefficient of determination for pine forest characteristics ranges from 0.29 to 0.37. The results of the validation model for the test set are virtually identical to those for the training set, demonstrating the robustness of the RF model. Regression modeling of pine stand characteristics using the RF algorithm (using pure pine stands in the Curonian Spit National Park as an example), using predictors derived from threshold segmentation of forest canopy images on Geoton-L panchromatic images, yields stable results with a root-mean-square error of approximately 4 m for average height, 6 cm for diameter, and 20 years for age. Threshold segmentation of tree canopy images is useful for preliminary

assessment of stand characteristics in cases where radiometric correction of spectral data is insufficient for calculating standard textural characteristics.

Keywords: *pine forests biometric characteristics, ultra-high spatial resolution satellite images, threshold image segmentation, texture features, regression modeling*

Рецензент: к. с.-х. н., с. н. с. Шинкаренко С. С.