

Оценка биометрических и морфоструктурных характеристик сосновых древостоев на основе высокодетальной аэрокосмической съемки

аспирант 3 года обучения

Никитина Алена Дмитриевна

научный руководитель

в.н.с., к.г.н. Князева Светлана Владимировна



ФГБУН «Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН»

Цель исследования

Определение и картографирование биометрических и морфоструктурных характеристик сосновых древостоев, необходимых для оценки ресурсного потенциала и экосистемных функций лесов, по данным оптической высокодетальной аэрокосмической съемки.



Задачи исследования

1. Выявить при помощи статистических методов и пространственного анализа взаимосвязи между характеристиками древостоев и их дешифровочными признаками на спутниковых снимках сверхвысокого пространственного разрешения, аэроснимках и цифровой модели местности, полученных с беспилотного летательного аппарата.
2. Разработать методику определения характеристик древостоев на основе полученных зависимостей, включающую обоснование оптимальных способов совместной обработки дистанционных данных разной детальности, оценку возможностей и ограничений алгоритмов, точности автоматизированного дешифрирования.
3. Составить серию карт биометрических и морфоструктурных характеристик древостоев, полученных дистанционными методами, используя методы картографо-математического моделирования.

Актуальность, новизна

Диссертационное исследование находится в перспективном тренде по разработке способов комплексирования результатов тематической обработки спутниковых данных сверхвысокого пространственного разрешения и выборочной аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и направлено на методическое обеспечение задач дистанционного определения характеристик древостоев в целях оценки наземной фитомассы древесных растений.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оперативного получения и обновления данных о характеристиках лесных фитоценозов на локальном уровне в условиях сокращения объемов наземных обследований лесов и устаревания лесоустроительной информации для большинства регионов страны. В настоящее время необходима автоматизация и совершенствование традиционных способов обработки аэрофотоснимков применительно к материалам съемок с БПЛА и разработка новых методов анализа изображений с использованием перспективных технологий и алгоритмов.

Изучение сосновых лесов актуально как для особо охраняемых природных территорий, так как сосна является одной из наиболее распространенных лесообразующих пород, так и для лесного хозяйства, где сосна является хозяйственно-ценной древесной породой. Выбор модельных территорий позволит достаточно полно охватить типологическое, ландшафтное и сукцессионное разнообразие сосняков хвойно-широколиственной зоны европейской части России .

Актуальность, новизна

1. Выявление новых аспектов взаимосвязи между параметрами сосновых древостоев, произрастающих в зоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России (Московская, Калининградская, Смоленская и Брянская области) и характеристиками изображения древесного полога на аэроснимках БПЛА и космических снимках сверхвысокого пространственного разрешения.
2. Методическое обоснование оптимальных алгоритмов обработки и классификации высокодетальных дистанционных данных (на основе анализа возможностей и ограничений алгоритмов в зависимости от определяемых параметров древостоев и необходимой точности).
3. Картографическое моделирование пространственной структуры сосновых фитоценозов по основным биометрическим и морфоструктурным параметрам древесного яруса (результаты могут быть использованы в качестве информационной основы для оценки экосистемных (продукционной, средообразующей) функций леса).

Объекты исследования



Калининградская область
НП «Куршская коса»
прибрежно-морской эоловый
ландшафт



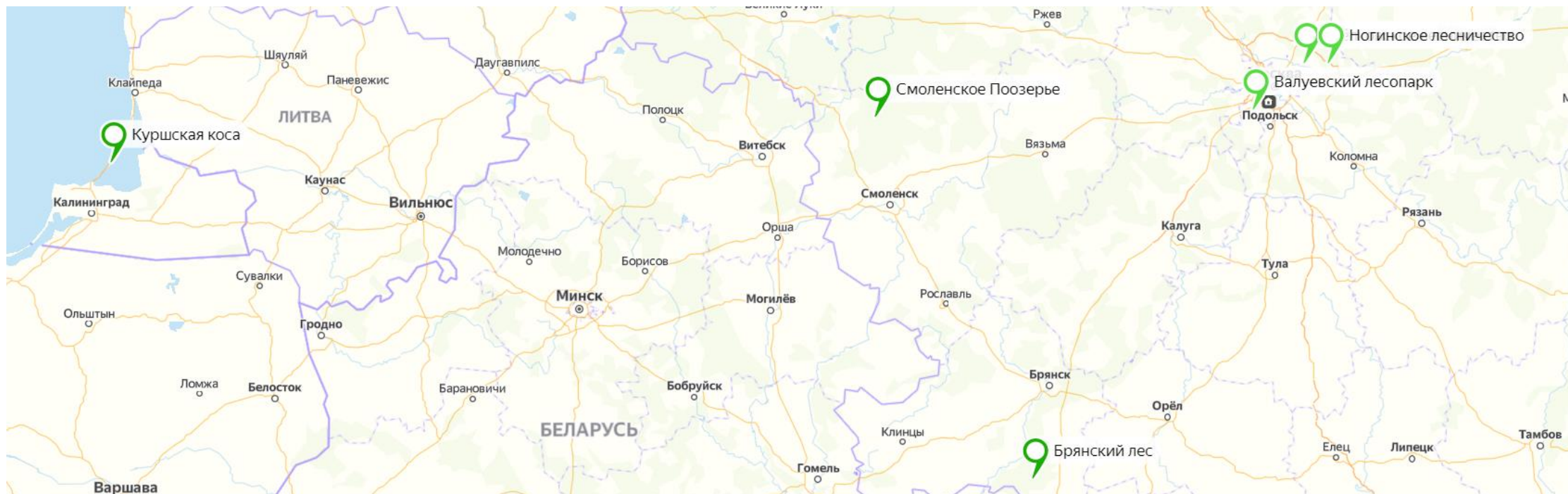
Брянская область
ГПБЗ «Брянский лес»
зандровый ландшафт

Сосняки разновозрастные:
-молодые (0-40 лет)
-средневозрастные (40-80 лет)
-старовозрастные (80+)



Смоленская область
НП «Смоленское Поозерье»
зандровый ландшафт

Московская область
Ногинское лесничество
Щелковское лесничество
Валуевский лесопарк



Геоботанические и лесотаксационные обследования

- Количество деревьев
- Проектное покрытие
- Диаметр
- Высота
- Возраст



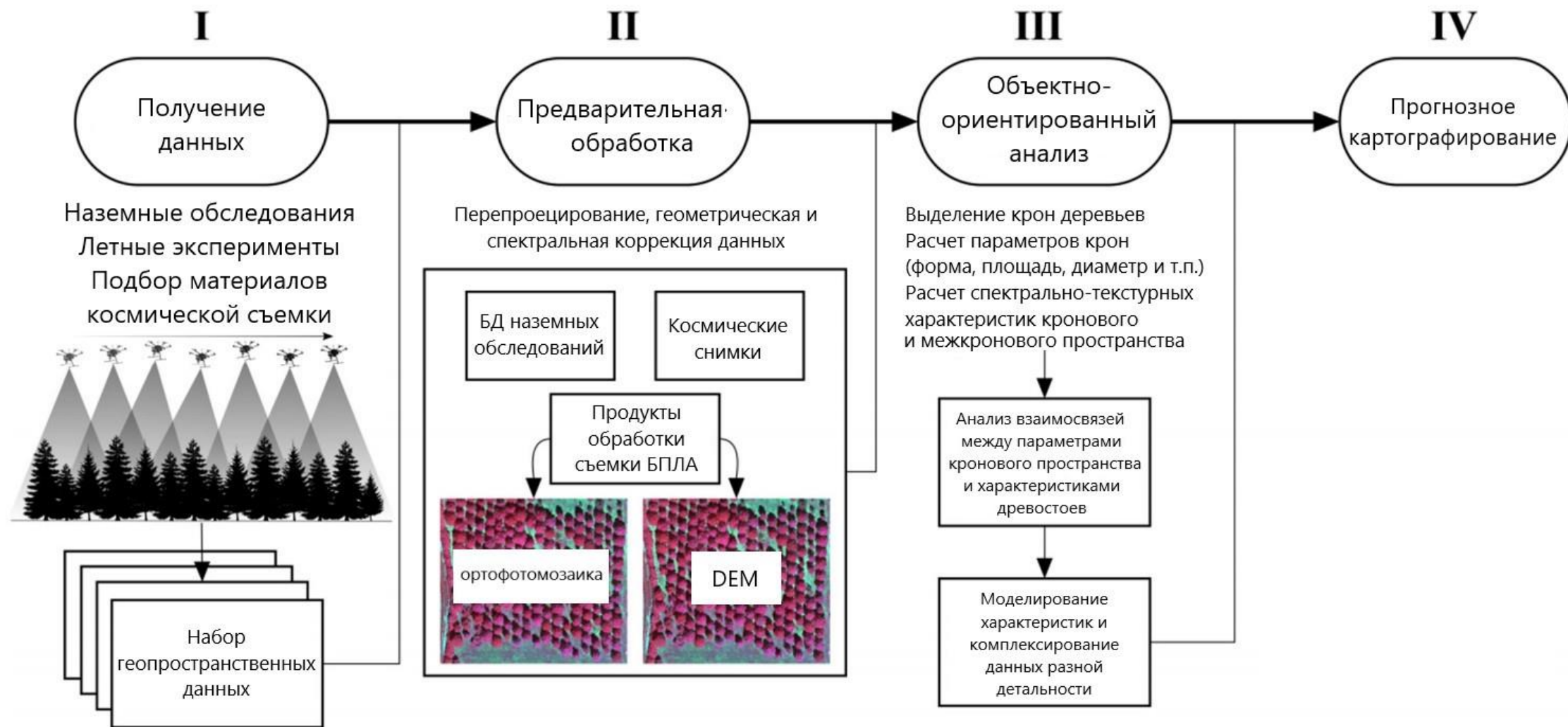

Сосняк
(80 лет)

Геоботанические и лесотаксационные обследования

- Количество деревьев
- Проектное покрытие
- Диаметр
- Высота
- Возраст
- Наземная разметка пробной площади волчатником и опорными точками



Основные этапы обработки данных

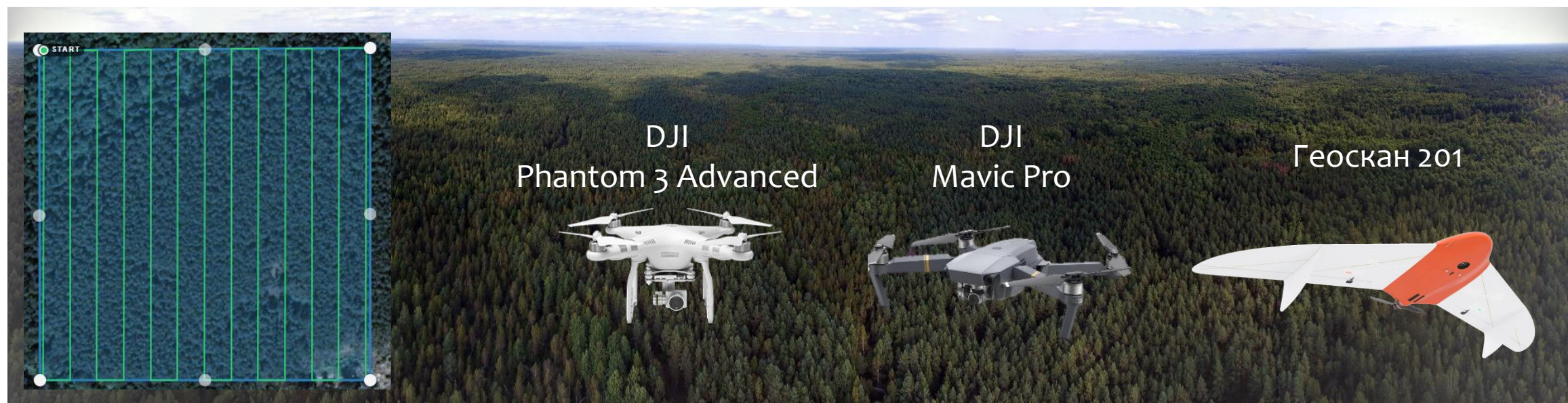


Съемка БПЛА



Параметры съемки DJI:
Площадь участка – 9 га
Высота полета – 180 м
Перекрытие – 90 %

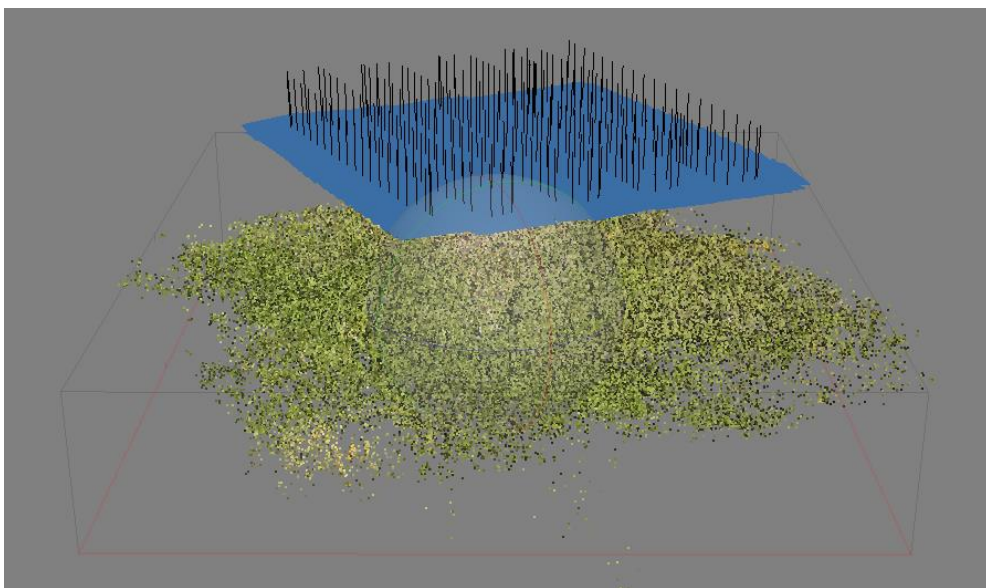
Аэрофотосъемка проводилась при скорости ветра не более 15 м/с при сплошной и переменной облачности в период с 9 до 16 часов



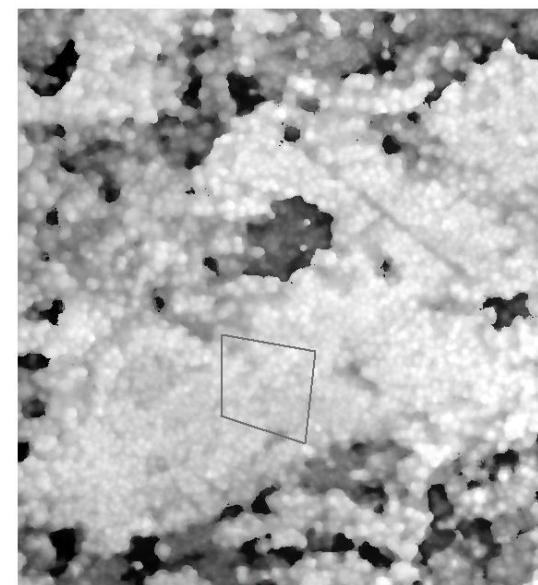
Съемка БПЛА



- Оценка качества изображений
- Выравнивание фотографий
- Построение плотного облака точек
- Создание ЦММ и ортофотоплана

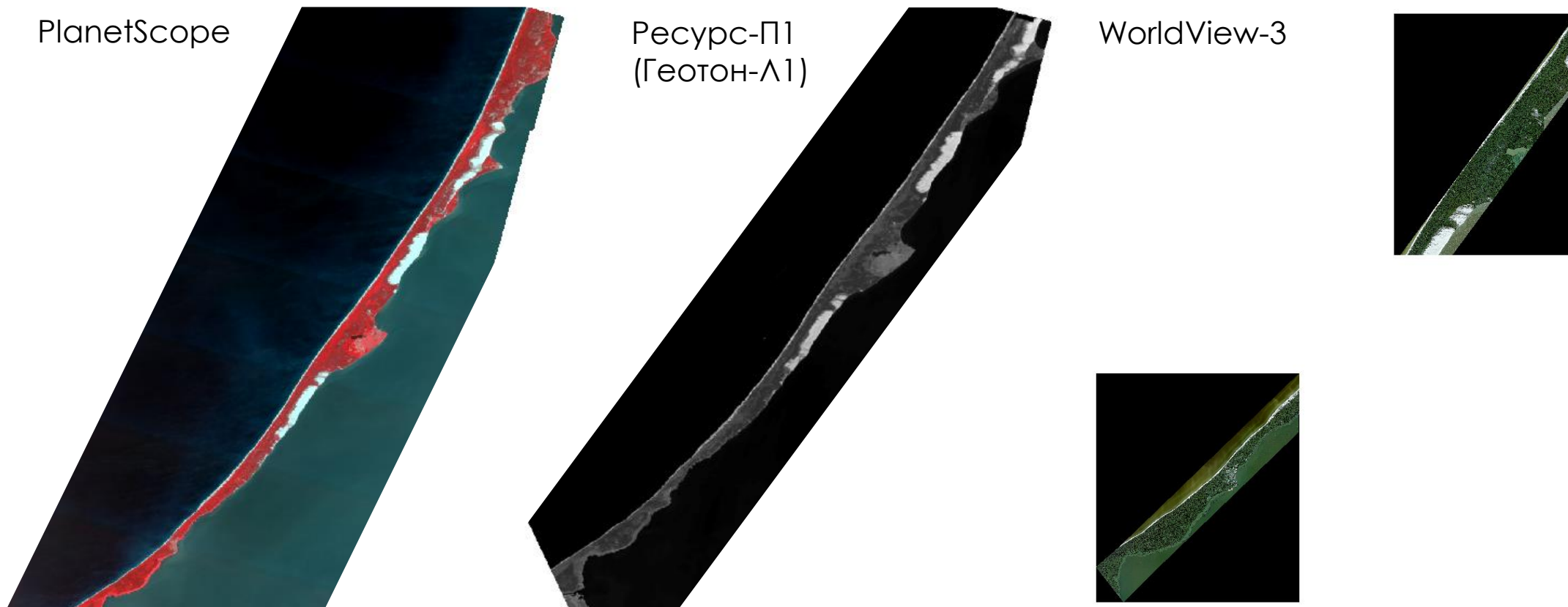


Пример облака точек в ПО Agisoft PhotoScan



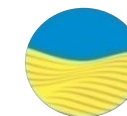
Куршская коса, сосняк, 105-110 лет, ортофотомозаика (а) и цифровая модель местности (б)

Космические снимки сверхвысокого пространственного разрешения



Спутники	Разрешение	Даты
Ресурс-П1 (Геотон-Л1)	3 м (мультиспектр.), 1 м (панхром.)	31.03.2017, 09.06.2018
PlanetScope	3,6 м (мультиспектр.)	Снимки 2016-2018 гг.: весна, лето, осень
WorldView-3	0,7 м(панхром.) 2,8 (мультиспектр.)	Август 2018

Количество участков со съемкой БПЛА и наземной таксацией



<i>Подсекции по классификации Л.Б.Заугольной</i>	Сосняк зеленомошно-лишайниковый	Сосняк ксерофитно-зеленомошный	Сосняк мелкотравно-бореальный	Сосняк мелкотравно-зеленомошный	Сосняк кустарничково-зеленомошный	Сосново-еловый кустарничково-зеленомошный	Сосняк сложный с липой и дубом
Куршская коса	5	12	1	3			
Смоленское поозерье		4	1	3	6	1	
Брянский лес					3		3

<i>Бонитет</i>	I	II	III	IV	V
Куршская коса		1	16	4	4
Смоленское поозерье	5	2			
Брянский лес	4	2			

<i>Возрастная Группа (лет)</i>	10-40	40-80	80+
Куршская коса	6	6	12
Смоленское поозерье	8	4	3
Брянский лес		4	2

- *Объекты Московской области*
- *Съемка БПЛА на территориях с данными лесоустройства*

Параметры древостоев

Биометрические:

- Породный состав (если присутствуют другие породы)
- Средний возраст
- Средняя высота
- Средний диаметр ствола деревьев

Морфоструктурные:

- Сомкнутость полога
- Интегральный показатель – степень сложности морфоструктуры
- Густота (количество) деревьев на ед. площади
- Доля господствующих деревьев (по классу Крафта) на ед. площади

Дешифровочные признаки на изображении

Космические снимки (3 – 0,7 м)

- Доля площади (теневых) межкроновых промежутков (по отношению к площади выдела/сегмента),
- Среднее значение яркости изображения крон древостоев (в границах выдела/сегмента)
- Текстурные показатели (энергия, энтропия, медиана, разброс, дисперсия, коэффициенты асимметрии, эксцесса и вариации и др.)

Ортофотомозаики с БПЛА (15 – 5 см)

- Площадь, **диаметр** и форма горизонтальной проекции кроны дерева
- Отношение площади крон к межкроновым промежуткам на ед. площади
- Отношение периметр/площадь кроны
- Расстояние между деревьями (вершинами крон)

Методы обработки спутниковых изображений (3 – 0,7 м)

Доля площади (теневых) межкроновых промежутков (по отношению к площади выдела/сегмента)

Среднее значение яркости изображения кроны древостоев (в границах выдела/сегмента)

Текстурные показатели (энергия, энтропия, медиана, разброс, дисперсия, коэффициенты асимметрии, эксцесса и вариации и др.)

Методы обработки ортофотомозаик с БПЛА (15 – 5 см)

1. Обработка ЦММ (облако точек высот)
2. Обработка ортофотомозаик

Визуальное дешифрирование

Автоматическое выделение контуров кроны методами сегментации:

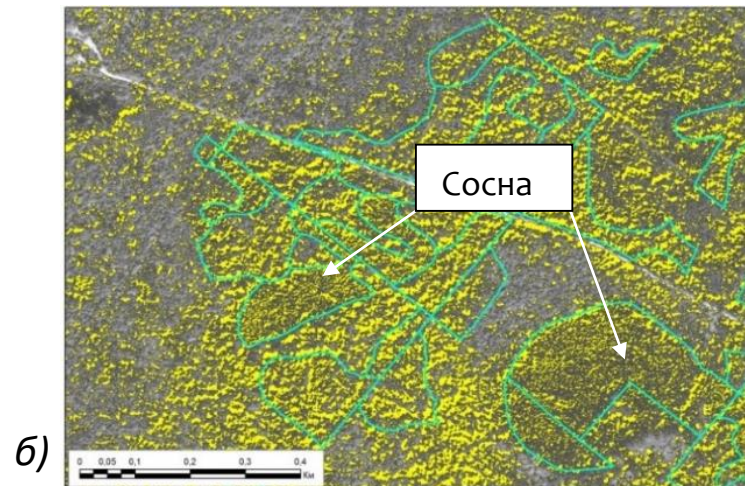
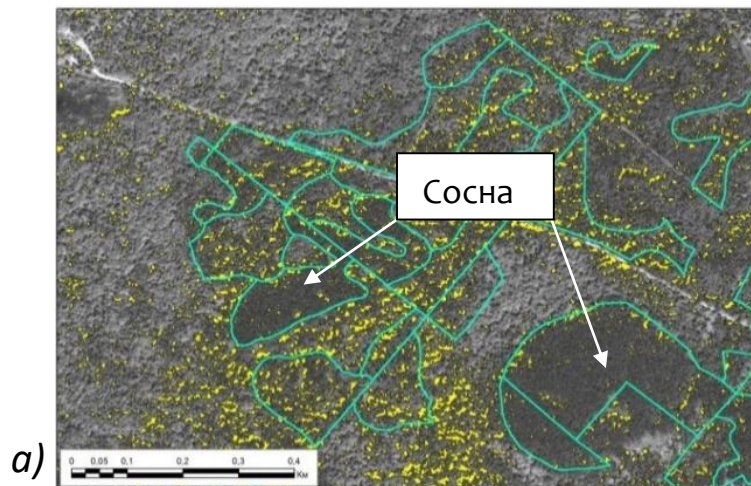
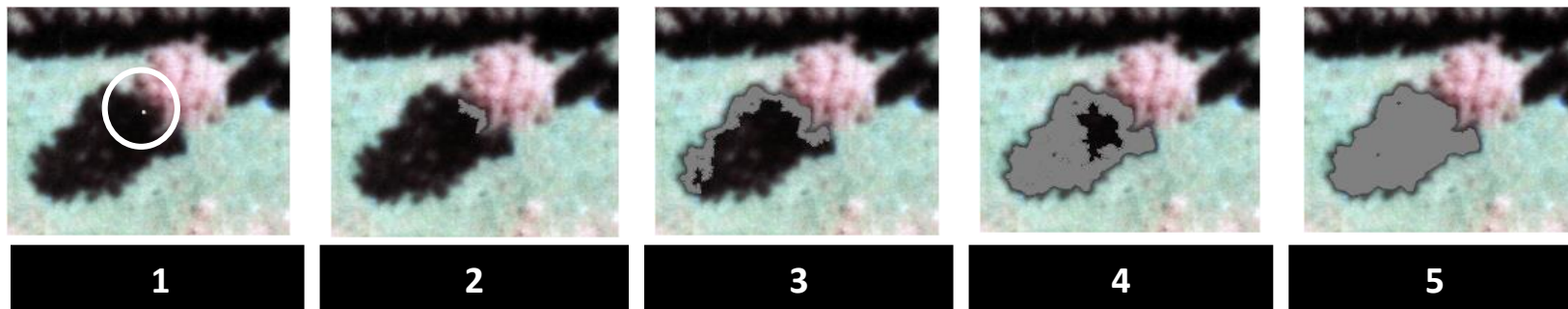
- Full Lambda Schedule (FLS)
- методом водораздела (Watershed)
- минимального сдвига (Minshift)

Методы обработки изображений – космические снимки

Пороговая сегментация – Ресурс-П1 (Геотон Л-1)

Доля площади темных межкروновых промежутков (по отношению к площади выдела)

Среднее значение яркости изображения кроны древостоев (в границах выдела)



Фрагмент изображения Ресурс-П1 с наложенным векторным слоем сосновых лесов и маской темных межкروновых промежутков, выделенных желтым цветом:
а) яркостной диапазон D_7 – 80-150;
б) яркостной диапазон D_{11} – 80-190

Методы обработки изображений - космические снимки

Пороговая сегментация – Ресурс-П1 (Геотон Л-1)

Доля площади темных межкрупных промежутков (по отношению к площади выдела)

Среднее значение яркости изображения крон древостоев (в границах выдела)

Дата съемки	Переменные	Количество переменных	Параметры			
			Диаметр (R ²) / RMSE, см	Высота (R ²) / RMSE, м	Возраст (R ²) / RMSE, лет	Показатель сложности морфоструктуры (R ²) / RMSE, баллы
Сосна обыкновенная						
31.03.2017	Cd ₁ (1), D ₁ (2), Cd ₉ (3), D ₉ (4), Cd ₁₃ (5)	5	0,79 / 3,84	0,80 / 2,63	0,75 / 14,25	0,77 / 0,92
09.06.2018	D ₂ (1), Cd ₃ (2), D ₄ (3), D ₁₂ (4), Cd ₁₃ (5)	5	0,79 / 3,86	0,80 / 2,65	0,77 / 13,83	0,76 / 0,98

Методы обработки изображений – ортофотомозаики БПЛА

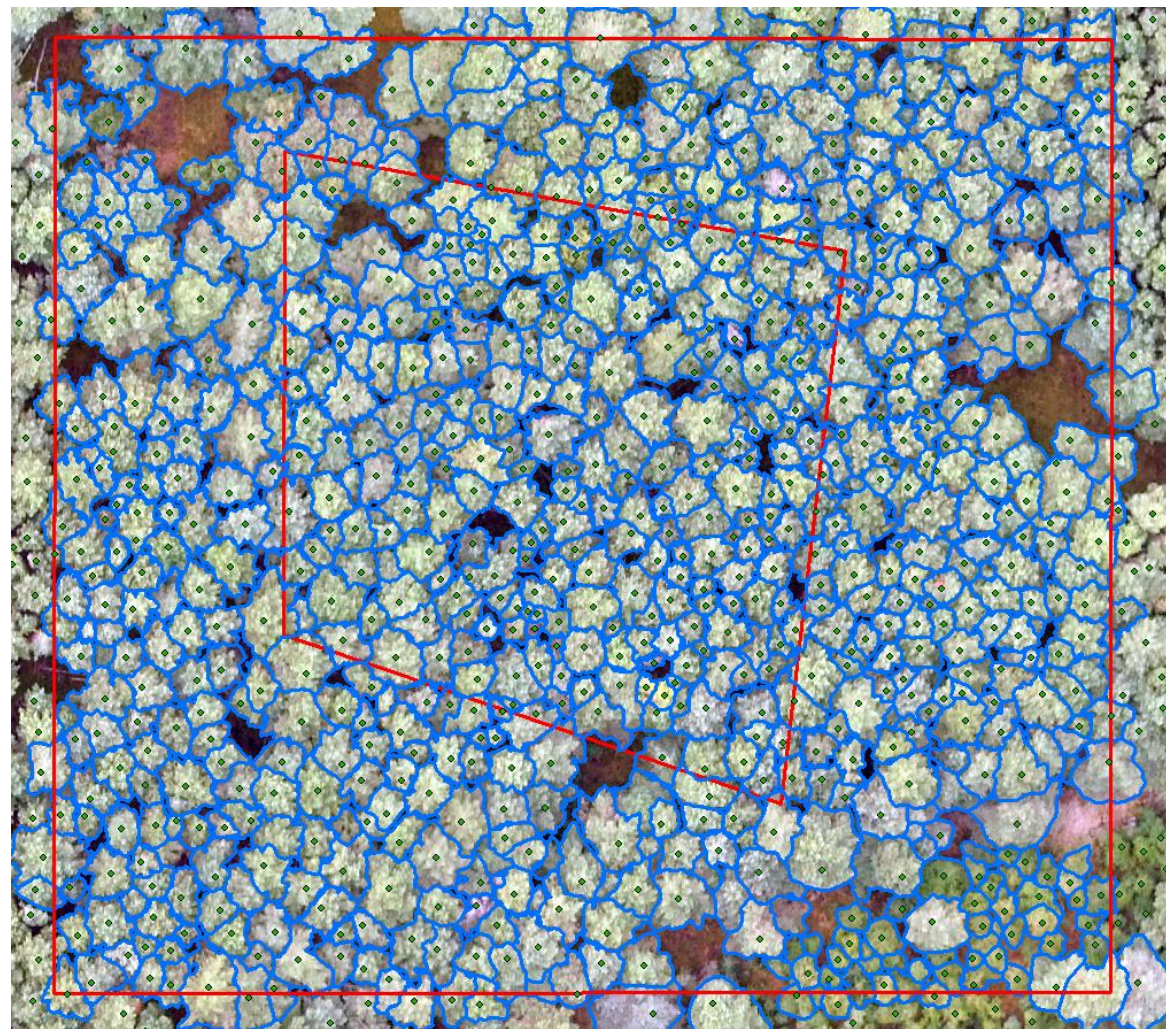
1. Обработка ЦММ (облако точек высот)
2. Обработка ортофотомозаик

Создание эталонов выделения вершин и горизонтальных проекций крон на основе визуального дешифрирования.

Автоматическое выделение контуров крон методами сегментации:

- Full Lambda Schedule (FLS)
- методом водораздела (Watershed)
- минимального сдвига (Minshift)

*Визуальное дешифрирование.
Куршская коса,
сосняк старовозрастной*



Число выявленных деревьев при наземной таксации и визуальном дешифрировании

Процент выявленных деревьев на ортофотомозаике варьировал от 43% до 74,3%.

На площадках, где произрастают сосны разных возрастов (50-70 лет и 170-190 лет) выявленных деревьев значительно меньше.

Меньшая распознаваемость наблюдалась на площадках, где произрастают и другие виды деревьев, например, ель и береза.

Максимальные значения отмечены на площадках с наиболее выровненным возрастным составом и наименьшим числом других видов деревьев

№ площадки	Число деревьев (визуальное дешифрирование), шт	Число деревьев (наземные обследования), шт	Процент выявленных деревьев, %	Возраст
1	261	433	60,3	Средневозрастной (от 50 до 70 лет) с единичными старыми соснами (более 100 лет)
2	95	137	69,3	Молодой (до 25 лет)
3	170	229	74,3	Средневозрастной (от 50 до 70 лет)
4	146	206	70,9	Средневозрастной (от 70 до 75 лет)
5	168	316	53	Средневозрастной (от 45 до 75 лет)
6	86	149	57,7	Старовозрастной (от 100 до 190 лет)
7	125	291	43,0	Средневозрастной (от 50 до 80 лет) с единичными старыми соснами (более 110 лет)

Сравнение сомкнутости крон при визуальном дешифрировании и наземных обследованиях

Наибольшая сомкнутость крон при визуальном дешифрировании, рассчитанная как соотношение площади крон к общей площади участка, достигала 81,4%.

При сравнении данных о сомкнутости, полученных с БПЛА, и сомкнутости, определенной в ходе наземных обследований, две площадки имеют сопоставимые значения (50% и 50% при наземном обследовании и 50% и 52% с данных БПЛА соответственно).

На остальных пробных площадях относительная разница в показателях сомкнутости из разных источников составляет от 18% до 41%. В молодых сосняках с высокой густотой древостоя ошибка показателя сомкнутости достигает 21%.

Номер площадки	Сомкнутость крон при НТ, %	Сомкнутость крон при ВД, %
1	40	81
2	95	74
3	50	69
4	35	60
5	40	58
6	50	50
7	50	52

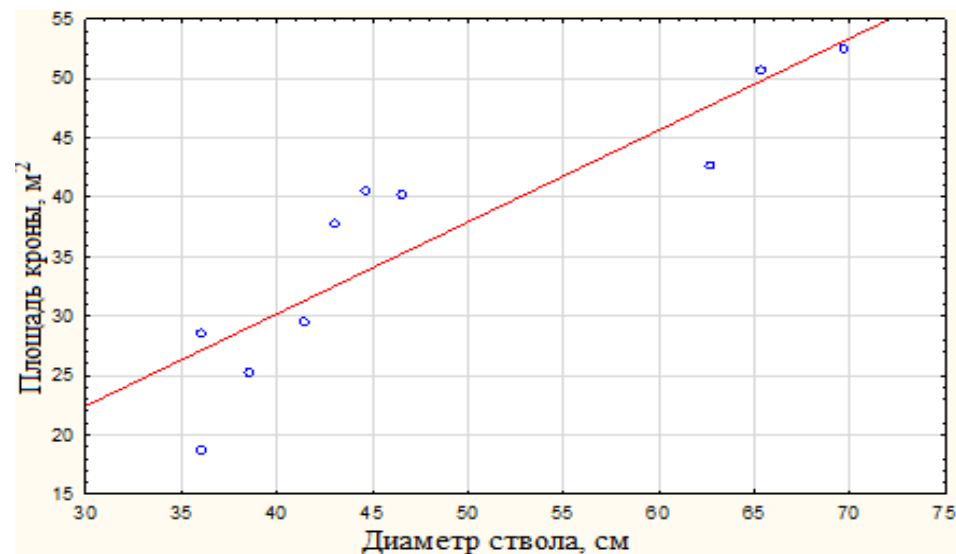
Сравнение данных о сомкнутости крон при наземной таксации (НТ) и визуальном дешифрировании (ВД)

Взаимосвязь между диаметром ствола и площадью кроны отдельных деревьев

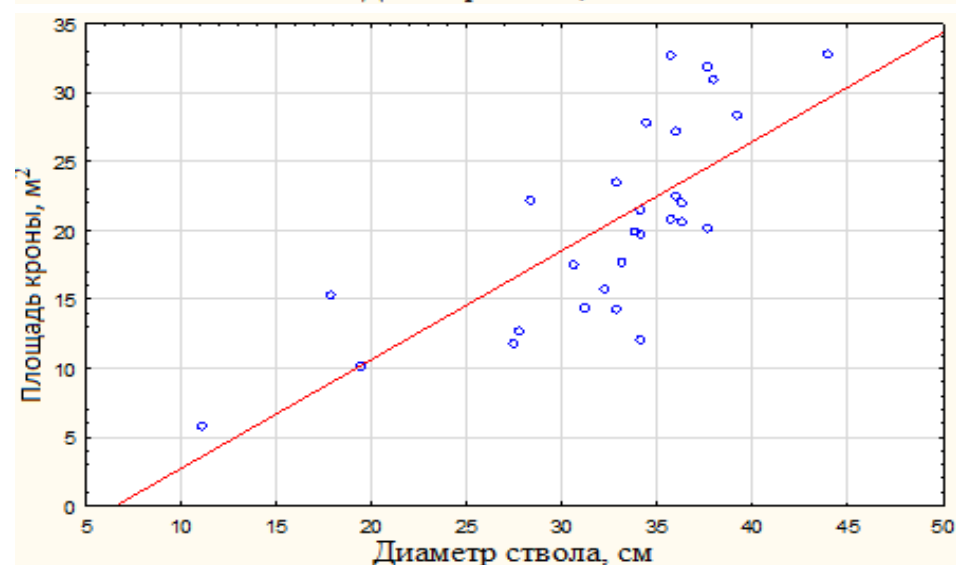
Отдельные деревья были отмечены GPS-навигатором при наземных обследованиях и в последующем определены на ортофотомозаиках для установления взаимосвязи между диаметром ствола и площадью кроны

Наиболее тесная взаимосвязь данных параметров отмечена в старовозрастном сосняке с наименьшей густотой деревьев.

Коэффициент корреляции на всех площадках варьировал от 0,53 до 0,96.



Старовозрастный
сосняк
(от 100 до 190 лет),
 $r = 0,96$



Средневозрастный
сосняк
(от 50 до 70 лет),
 $r = 0,76$

Оценка возможности получения биометрических показателей ключевых участков по карте глубин

1. Количество деревьев

Поиск локальных максимумов, комбинируемый с методом водораздела, со скользящим окном 3x3.



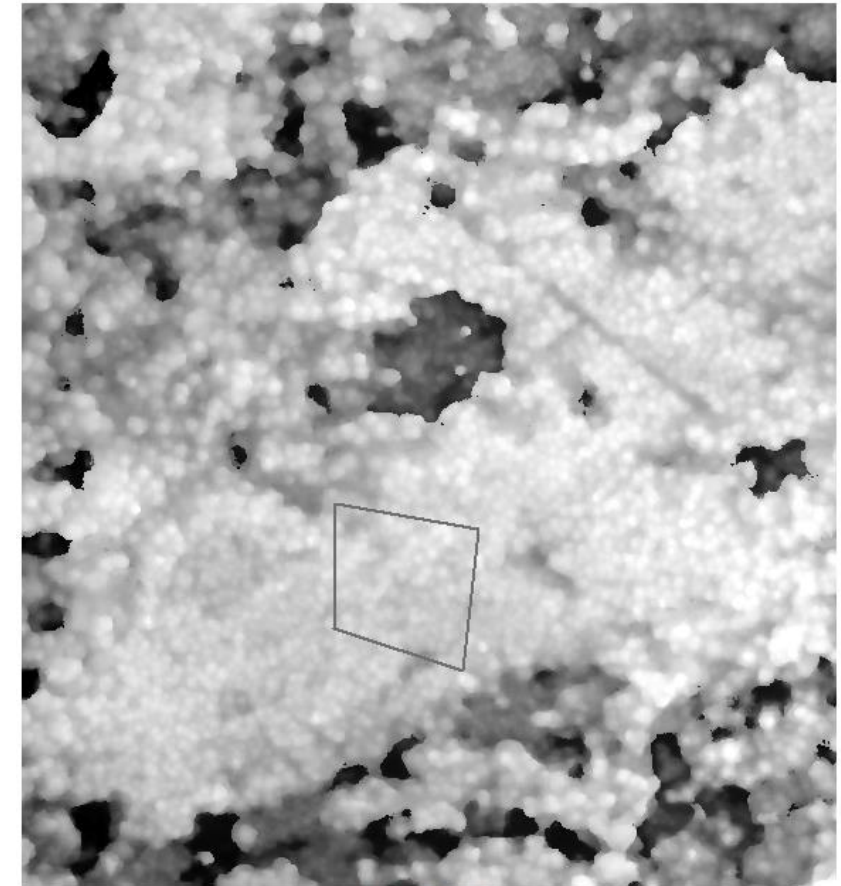
Общее количество площадок (n) = 21.

Происходило сравнение с наземными обследованиями.

Выявлена значительная ошибка прогнозирования (средняя абсолютная ошибка MAPE = 50,6%) со значением среднеквадратической ошибки RMSE = 15,8 (шт./100м²).

При делении на группы возраста (молодые древостои (n=5), средневозрастные (n=8), старовозрастные (n=8)) наблюдается сокращение средней абсолютной ошибки MAPE с 65% для молодых древостоев к 52% для средневозрастных и 39% для старовозрастных.

Использование DEM для определения количества деревьев показывает высокий процент ошибок и **НЕВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ.**



1:2 500

Куршская коса, сосняк, 105-110 лет

Оценка возможности получения биометрических показателей ключевых участков по карте глубин

2. Высота

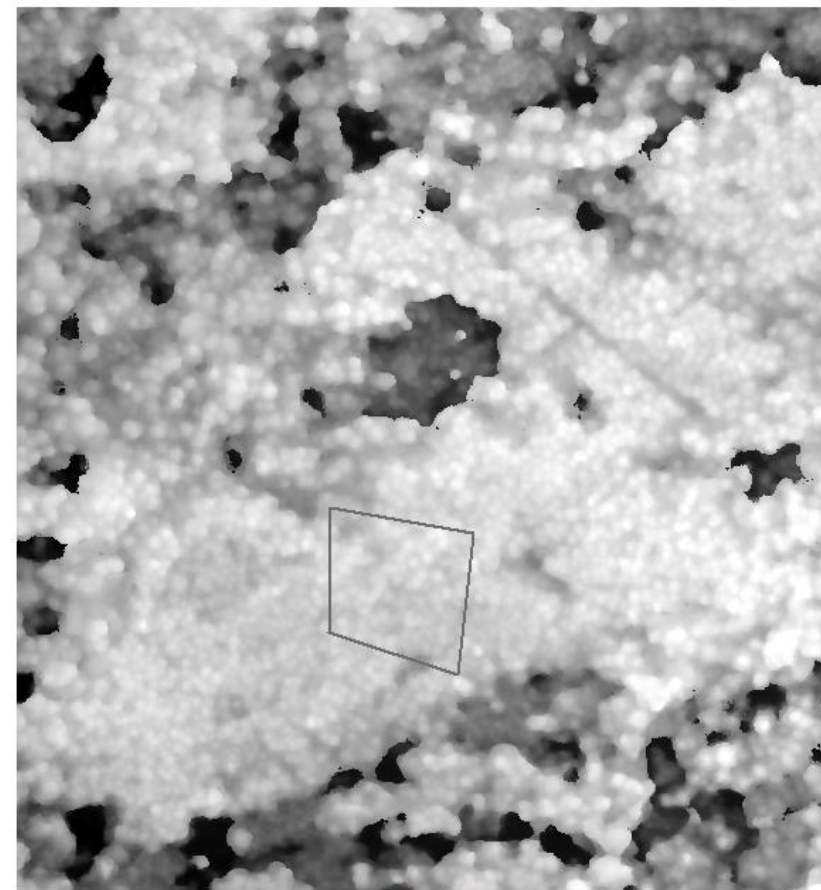


Общее количество площадок (n) = 14.

Площадки заложены на территории НП Куршская коса в 2017 г.

- Поиск глобального минимума (уровень земной поверхности)
- Вычитание из матрицы DEM глобального минимума
- Получение карты высот с абсолютными значениями высоты от уровня земной поверхности.
- Удаление участков с высотой менее 5 м для отсеивания открытых пространств в пределах участка.
- Вычисление среднего, характеризующего среднюю высоту древостоя.

Высокая точность прогноза. Средняя абсолютная ошибка MAPE составила 14,8% при среднеквадратической ошибке RMSE = 1,7 м. Полученные результаты говорят о возможности использования DEM для определения средних высот древостоев.



1:2 500

Куршская коса, сосняк, 105-110 лет

Регрессионный анализ : выявление и оценка взаимосвязей

Биометрические параметры древостоев

- средний диаметр
- средний возраст
- средняя высота древостоя
- количество деревьев, пересчитанное на 100 м² (густота древостоя).

Дешифровочные признаки, полученные с ортофотомозаик и карт глубин

- высота древостоя, вычисленная по карте высот (Height_drone)
- относительная площадь крон участка (сомкнутость древесного полога, сомкнутость), рассчитанная на основе визуального определения (relAC)
- количество деревьев на 100 м² (stdQT), рассчитанное на основе визуального определения
- средняя площадь кроны участка, рассчитанная на основе визуального определения (avAC)
- среднее расстояние между вершинами деревьев (Dist_average)

Линейный регрессионный анализ



n=21	Уравнение регрессии	R ²	RMSE
Средний диаметр (см)	$0,7154 + 0,735 * \text{Height_drone} + 1,4137 * \text{Area_cr_average}$	0,88	3,4
Средний возраст (кол-во лет)	$-27,2 + 3,55 * \text{Height_drone} + 14 * \text{Dist_average}$	0,65	21,5
Средняя высота (м)	$-10,7881 + 16,1508 * \text{RelAC} + 4,3048 * \text{Dist_average}$	0,88	2,2
Количество деревьев / 100 м²	$4,673 + \text{stdQT} * 0,8979$	0,69	6

Параметры точности определения характеристик древостоев по данным с БПЛА

Методы	
Сегментация и выделение локального максимума LM на модели древесного полога (карте глубин)	Сегментация (автоматическая и визуальная) изображения древесного полога на ортофотоплане
Средняя высота, м	
R ² = 0,86, СКО =11% (Zarco-Tejada et al., 2014); R ² = 0,94, (Birdal et al., 2017) RMSE=1 м (Mikita et al., 2016) R ² = 0,82 (Lisein et a., 2013)	R ² =0.45–0.97 (Phu La et al., 2015); RMSE = ±1 m (Saarinen et al., 2014); RMSE=1.27 m (Tanhuanpaa et al., 2014) R ² = 0,97 (Puliti et al.,2015)
Средний диаметр ствола, см	
RMSE =0.9-1.8 см (Mikita et al., 2016)	RMSE =7 см (Tanhuanpaa et al., 2014) R ² = 0.81 - 0.87 (Rahman M, Rashed T , 2015)
Густота (число) деревьев на ед. площади (га)	
60 (сомкнутые древостои) - 87% (редколесье) (Медведев и др., 2020) 86% (Mohan et al., 2017)	R ² = 0,57 (Puliti et al.,2015) 69% (Rahman M, Rashed T , 2015) 88.8% (Tanhuanpaa et al., 2014)

Планы на 2020-2021 год

- 1.1. Подготовка статьи в научный журнал, представляющий обзор современных методов обработки высокодетальных спутниковых данных и снимков с БПЛА для определения характеристик лесов.
- 1.2. Планирование экспедиционных полевых работ с целью определения характеристик сосновых древостоев наземными методами на пробных площадях для верификации взаимосвязей.
- 1.3. Объектно-ориентированная обработка ортофотопланов и карт глубин, полученных БПЛА, включающая сегментацию изображений и выделение крон деревьев (визуальное и автоматизированное) для всех объектов. Сравнение результатов работы алгоритмов и выбор наиболее оптимальных параметров автоматической сегментации.
- 1.4. Оценка взаимосвязей методами регрессионного анализа между биометрическими и морфоструктурными параметрами сосновых древостоев, определенных методами полевых наземных обследований на пробных площадях, и характеристиками крон деревьев, выделенных на ортофотопланах и цифровой модели высот полога (ЦМП), полученных при аэросъемке с БПЛА.
- 1.6. Объектно-ориентированная обработка и классификация спутниковых данных WorldView-2 и 3. Автоматизированная сегментация изображений для выделения кронового и межкронового пространства и расчет спектральных и текстурных характеристик.
- 1.7. Оценка взаимосвязей между параметрами сосновых древостоев, определенных методами наземных обследований при лесоустройстве и на пробных площадях, и спектрально-текстурными характеристиками космических снимков.

Спасибо за внимание

