



Технология автоматической подеревной таксации лесов и штабелей древесины дронами

Евгений Лопатин, ведущий научный сотрудник
Института природных ресурсов Финляндии
eugene.lopatin@luke.fi

Евгений Лопатин

- доктор сельскохозяйственных наук (Финляндия)
- кандидат сельскохозяйственных наук (Россия, специальность «Лесоустройство и лесная таксация»)
- 2012-2013 консультант ООН по созданию ГИЛ Вьетнама
- 2014 - ведущий научный сотрудник Института природных ресурсов Финляндии
- 20 лет оцифровываю леса
- 15 лет консультирую по инвестициям в леса
- 14 лет летаю на дронах
- Управляю собственными лесами в Финляндии: все бизнес-процессы оцифрованы
- Сажаю деревья, веду максимально интенсивное лесное хозяйство, продаю аккумулированный углерод, древесину, экосистемные услуги
- Разработал технологию автоматической подеревной таксации лесов дронами





Как меняются подходы к инвентаризации лесов?

Что оказывает влияние на методы инвентаризации лесов?

- **Глобальное изменение климата:** леса сейчас растут быстрее чем раньше, лесные пожары сильнее, распространение вредителей и болезней
- Тренд **низкоуглеродного развития экономики:** вторым продуктом лесного хозяйства становится аккумулированный углерод
- Готовность потребителей платить за **устойчивое лесное хозяйство:** FSC и PEFC уже сейчас вынуждены заниматься методами оценки устойчивости лесного хозяйства
- Зеленый пакт для Европы (**the European Green Deal**): нулевые выбросы парниковых газов к 2050, компенсация за сохранение старовозрастных лесов

Проблемы инвентаризации лесов, которые способна решить цифровизация

- Быстрое **устаревание данных:** цикла 10 лет уже не достаточно, современный цикл – 5 лет, для углерода 1 год
- **Ошибки** выборочных методов таксации: вместо пробных площадей физически измеряется каждое дерево, вместо выделов ячейки 16 x 16 м
- **Доступ к данным:** карта на стене и данные в лесу в мобильном телефоне
- Снижение **стоимости** получения данных
- Увеличение **скорости** получения данных
- Высокоточное планирование: **доходность** инвестиций в лес увеличивается с 2-10% до 8 – 15%
- Дополнение интеллекта человека искусственным интеллектом

Технология автоматической подеревной таксации лесов дронами

1. Провести съемку участка дроном



Дрон с высокоточным ГНСС приемником (GPS, Glonass, Galileo)



Дрон с высокоточным ГНСС приемником (GPS, Glonass, Galileo) и лазерным сканером

В условиях России (леса, без ухода за молодняками, без или с прореживаниями низкой интенсивностью):

- Лазерное сканирование + съемка камерами

либо

- Съемка камерами минимум с 4 углов (точные параметры (разрешение, углы, перекрытия) могут быть вычислены по модели влияния структуры насаждений на плотность фотограмметрического облака точек)

Точность потребительских дронов для таксации

Дроны из магазина



125 тыс. руб.



100 тыс. руб.



29 тыс. руб.



Доработанные дроны из магазина



150 тыс. руб.

Ошибки позиционирования (x, y): 0.2 – 3 м

Ошибки позиционирования (z): **3 – 6 м**

Инвентаризация культур, грибы, ягоды

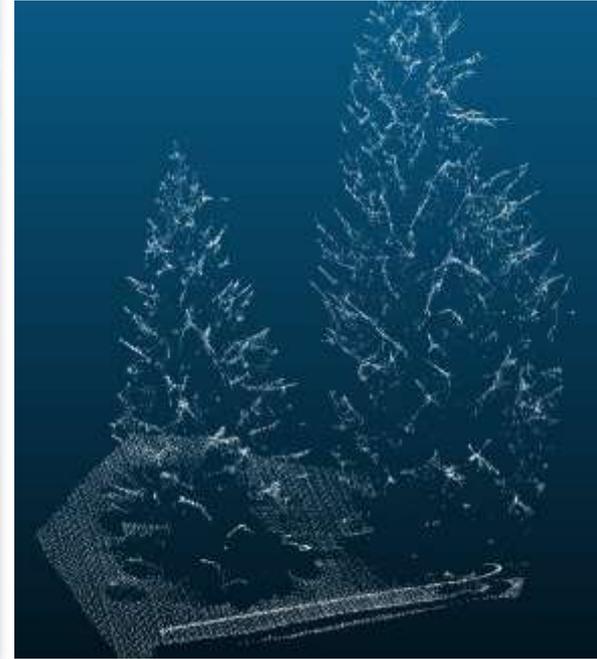
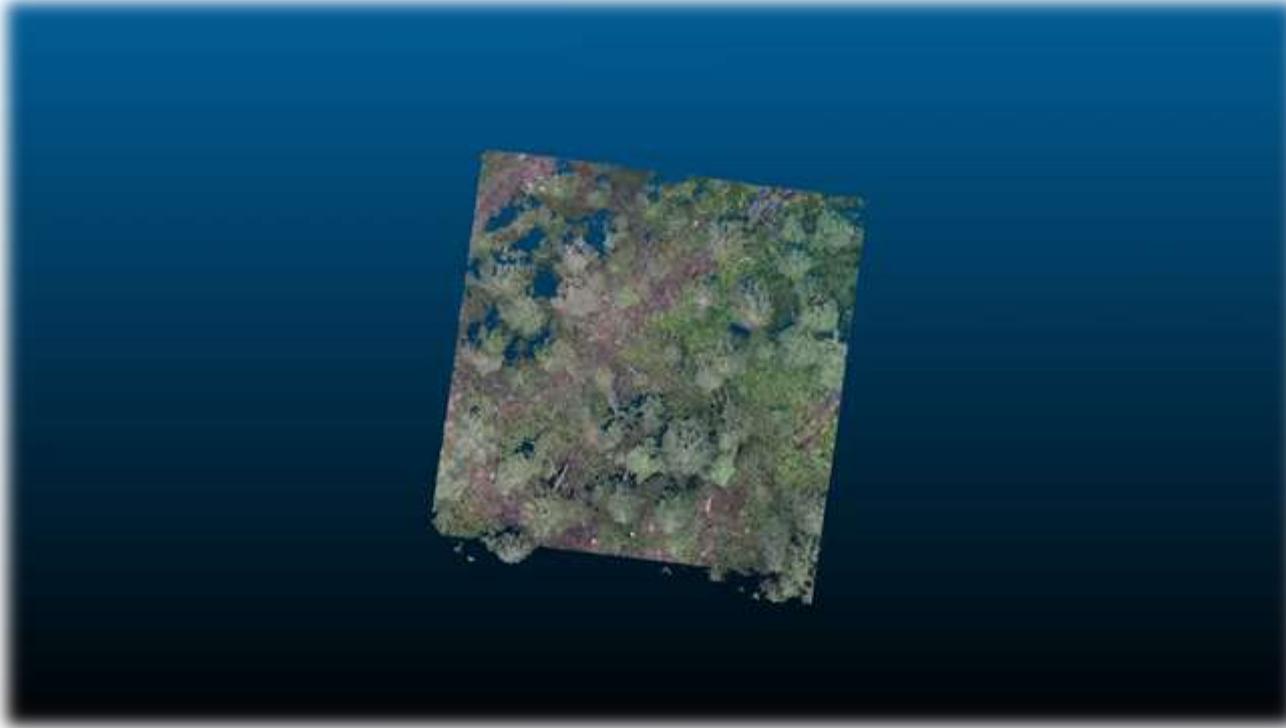
Ошибки позиционирования (x, y): 0.02

Ошибки позиционирования (z): **0.05 м**

Подеревная таксация, измерение объёмов штабелей

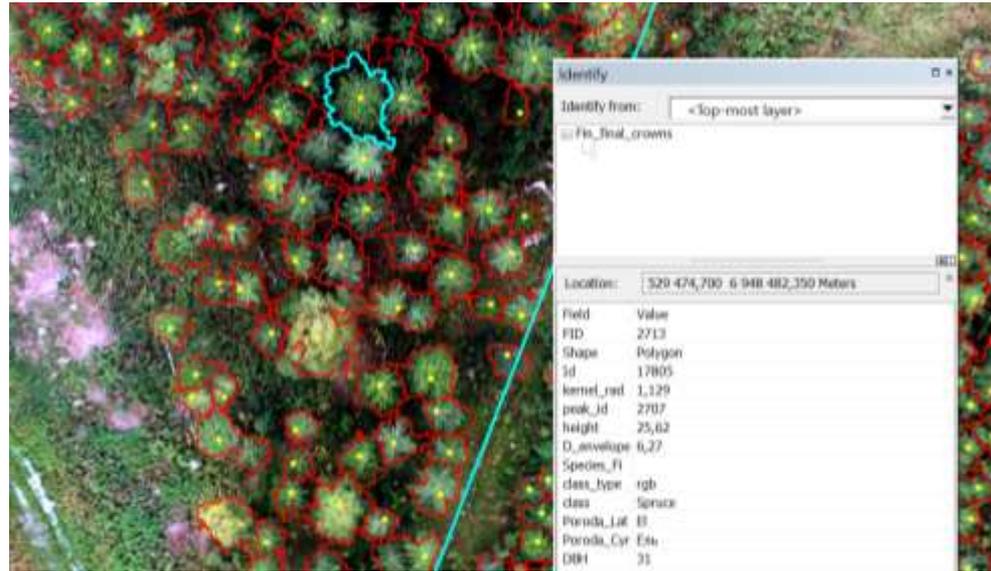
Технология автоматической подеревной таксации лесов дронами

2. Получить 3D модели деревьев по данным съемки с дронов



Технология автоматической подеревной таксации лесов дронами

3. Определить высоту и границы кроны каждого дерева



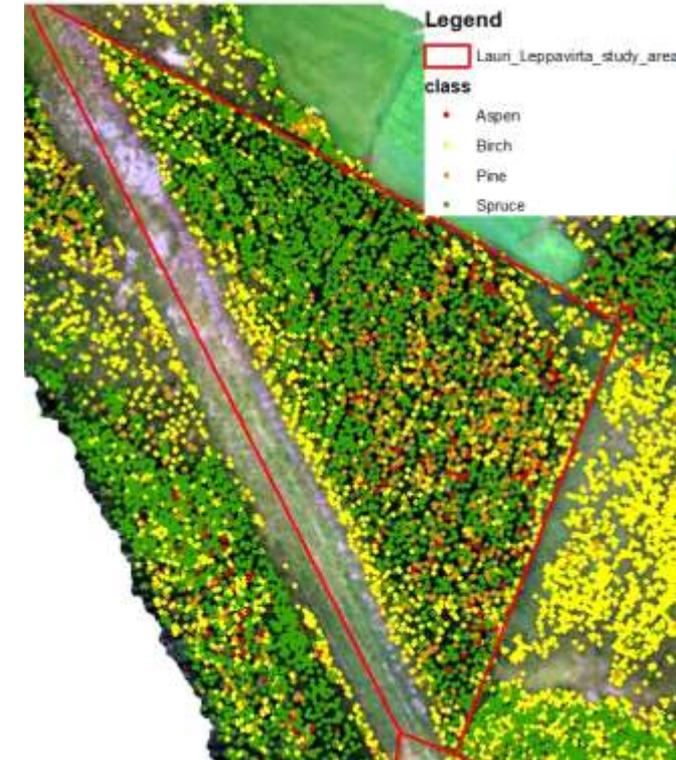
Для каждого дерева рассчитываются по 3D моделям:

- Высота дерева (точность 2-15 см) – разница между самой высокой 3D точкой дерева и отметкой земли
- Площадь кроны
- Диаметр кроны
- Минимальная высота дерева – 10 см
- Для целей таксации учитывают деревья выше 1.3 метра в Финляндии или выше 5 метров в России

Технология автоматической подеревной таксации

лесов дронами

4. Определить породу дерева



Для определения пород деревьев используются алгоритмы искусственного интеллекта (например нейронные сети, генетические алгоритмы и др.)

- Обучение алгоритмов производится на наземных пробных площадях с подеревной таксацией
- Точность классификации 90-97%
- Пробные площади заложены во всех регионах Северо-Запада России, Иркутской обл., Бурятии, Московской обл., Калужской обл., Финляндии, Швеции, Израиле, Филиппинах, Австралии, Канаде

Технология автоматической подеревной таксации лесов дронами

5. Вычислить диаметр дерева, объём ствола

Пример уравнения для определения диаметра на высоте груди для ели:

$$DBH=0+1,19784923939481*h+0,592593342521037*Dcr, R2=0.98, N=29$$

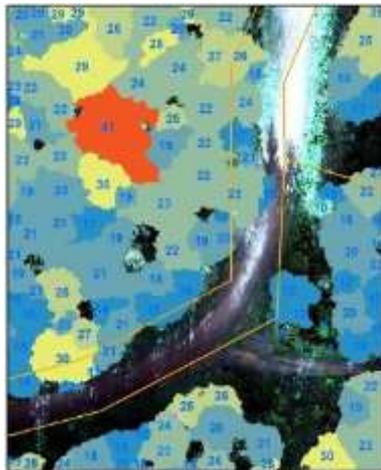
Пример модели для определения объёма ствола для ели:

$$v=0.022927 * (DBH \wedge 1.91505) * (0.99146 \wedge DBH) * (h \wedge 2.82541) * ((h - 1.3) \wedge (-1.53547))$$

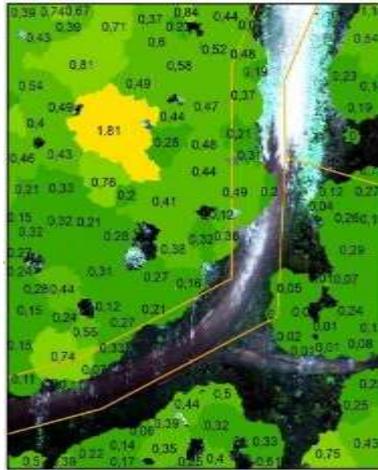
- Модели данных строятся по данным пробных площадей
- Радиус действия моделей 100-300 км от точки построения модели
- Ошибка определения диаметра: 2 см
- Ошибка определения объёма ствола: 3,4%



Порода



Диаметр на высоте груди, см

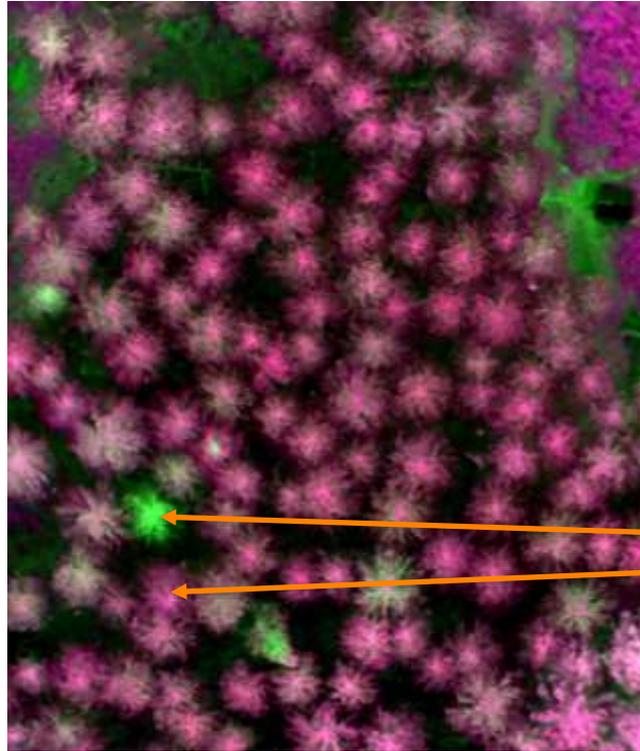


Объём ствола, м3

Дополнительно могут быть определены дронами



- Сортиментная структура (количество стволов и объёмы по сортиментам): **виртуальная распиловка** по сортиментной программе предприятия
- Класс возраста дерева
- Состояние: сухостой, живое
- Доля пиловочника: по уровню нижних толстых веток
- Повреждение короедом, грибами
- Потребность в прореживании (расстояние до ближайших деревьев)
- Качество и состояние лесных культур
- Качество ухода за молодняками
- Качество прореживания
- Вероятность возгорания при определенных метеорологических условиях



Красные – повреждены короедом до усыхания
Желтые – начало повреждения короедом
Зеленые - здоровые

Апробация технологии подеревной таксации делянок до рубки и после рубки в 2019 г. в 3 компаниях Ленинградской области

Обработка данных в **forestscanner.net**

Веб-платформа для эффективного взаимодействия участников процесса заготовки древесины

- **Цифровизация** заготовки древесины и управления лесными ресурсами
- **Эффект присутствия:** актуальная точная цифровая копия лесного участка
- **Секьюритизация** лесообеспечения: все деревья точно измерены до рубки
- **Единое информационное поле** для планирования работ
- **Инструменты взаимодействия** для постановки и обсуждения задач
- **Возможности трансляций** во время совещаний
- **Сравнение плана с фактом** для поиска лучших решений
- **Сокращение затрат** на заготовку древесины за счет оптимизации планов
- **Оценка состояния ресурса** и рекомендации по ведению интенсивного лесного хозяйства



Пример полученных результатов по 1 из 6 участков

Материалы отвода делянки

С
Ю



Номер участка	Площадь участка
1	14,4

Площадь участка	Площадь, занятая строениями	
14,4	14,4	
Номер участка	Площадь участка (по документам), га	Длина участка, м
строения		
Номер дома	Площадь участка, га	Длина участка, м
1	14,4	215
2	14,4	215
3	14,4	215
4	14,4	215
5	14,4	215
6	14,4	215
7	14,4	215
8	14,4	215
9	14,4	215
10	14,4	215
11	14,4	215
12	14,4	215
13	14,4	215
14	14,4	215
15	14,4	215
16	14,4	215
17	14,4	215
18	14,4	215
19	14,4	215
20	14,4	215
21	14,4	215
22	14,4	215
23	14,4	215
24	14,4	215
25	14,4	215
26	14,4	215
27	14,4	215
28	14,4	215
29	14,4	215
30	14,4	215
31	14,4	215
32	14,4	215
33	14,4	215
34	14,4	215
35	14,4	215
36	14,4	215
37	14,4	215
38	14,4	215
39	14,4	215
40	14,4	215
41	14,4	215
42	14,4	215
43	14,4	215
44	14,4	215
45	14,4	215
46	14,4	215
47	14,4	215
48	14,4	215
49	14,4	215
50	14,4	215
51	14,4	215
52	14,4	215
53	14,4	215
54	14,4	215
55	14,4	215
56	14,4	215
57	14,4	215
58	14,4	215
59	14,4	215
60	14,4	215
61	14,4	215
62	14,4	215
63	14,4	215
64	14,4	215
65	14,4	215
66	14,4	215
67	14,4	215
68	14,4	215
69	14,4	215
70	14,4	215
71	14,4	215
72	14,4	215
73	14,4	215
74	14,4	215
75	14,4	215
76	14,4	215
77	14,4	215
78	14,4	215
79	14,4	215
80	14,4	215
81	14,4	215
82	14,4	215
83	14,4	215
84	14,4	215
85	14,4	215
86	14,4	215
87	14,4	215
88	14,4	215
89	14,4	215
90	14,4	215
91	14,4	215
92	14,4	215
93	14,4	215
94	14,4	215
95	14,4	215
96	14,4	215
97	14,4	215
98	14,4	215
99	14,4	215
100	14,4	215

- 20 га
- снято за 1 полет
- 20 минут на съемку
- Площадь по материалам отвода: 14,4 га
- Фактически вырублено: 13,9 га

Этапы работ:

1. Съемка летом
2. Рубка харвестером
3. Закладка контрольных пробных площадей
4. Съемка зимой

Условные обозначения:  - деланка;



Ортофотоплан с границами делянки

Точность распознавания пород деревьев

	Порода по данным дронов							
Порода да земле	Ольха	Осина	Береза	Сосна	Ель	Всего	Правильно	Точность,
Ольха	2		1	1	1	5	2	40,00%
Осина		84	3	1	8	96	84	87,50%
Береза	2	4	79	1	7	93	79	84,95%
Сосна	1	2	4	344	3	354	344	97,18%
Ель	1	11	5	1	88	106	88	83,02%
Общий итог	6	101	92	348	107	654	597	91,28%

- На снимках и по полевым данным достоверно распознано 654 деревьев
- Для обучения алгоритма распознавания пород и определения диаметров использовались только надежно определённые деревья
- Точность распознавания варьирует по породам от 40% до 97% и на нее влияет маленькая выборка по ольхе
- Ошибка определения пород компьютером по данным дронов 9%
- Точность может быть увеличена за счет увеличения обучающей выборки либо добавления мультиспектральной камеры

Точность определения диаметра по породам

Порода	Средняя ошибка, см	Количество деревьев
Ольха	0,40	5
Осина	-0,19	16
Береза	0,70	10
Сосна	-3,20	5
Ель	-2,23	22
Всего	-1,02	58

- Увеличение выборки по ольхе и сосне приведет к увеличению точности
- Данные дрона занижают диаметр на высоте груди на 1 см
- Точность определения высоты дроном гораздо выше точности наземных измерений высоты деревьев, так как используется высокоточный геодезический приемник (сантиметровая точность определения высоты)

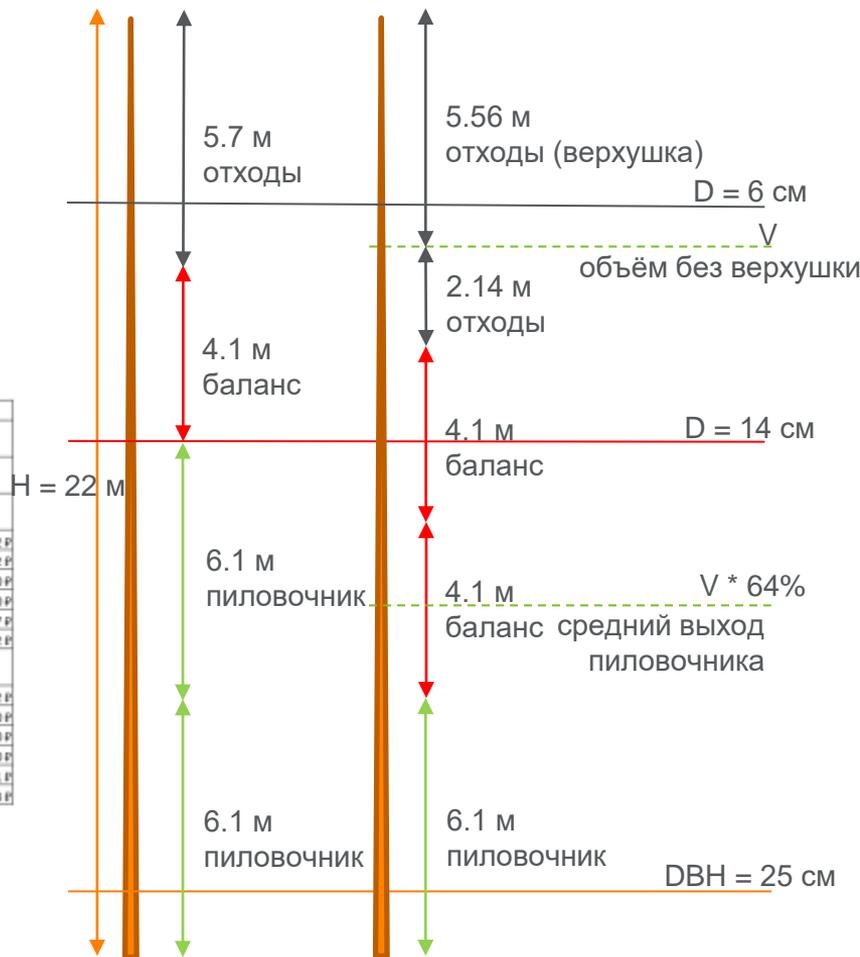
Виртуальный распил стволов по сортиментной программе

Использованная сортиментная программа (предоставлена предприятием),
цены 2018 г. по одному из предприятий Вологодской области

Порода	Длина сортимента с припуском, м	Минимальный диаметр отреза, см	Максимальный диаметр отреза, см	Фактическая длина сортимента, м	Цена сортимента, р./м3	Название сортимента
Ель	5,2	12		5,1	2800	Ель пиловочник 5 м
Ель	4,1	12		4	2500	Ель пиловочник 4 м
Ель	4,1	4	46	4	2000	Ель баланс
Сосна	4,1	12		4	2600	Сосна пиловочник 4 м
Сосна	4	4		4	2300	Сосна баланс
Берёза	4,14	18		4	1600	ФРБ 4м 1 рез
Берёза	4	4		4	1600	Баланс берёза
Берёза	6,1	6		6	300	Баланс берёза
Осина	6,1	25		6	0	Осина пиловочник
Осина	6,1	5		6	0	Осина дрова

Результаты виртуального распила стволов по сортиментной программе

Порода	Объемы по сортиментам, м3								Количество сортиментов, шт.								Стоимость, руб.
	Пиловочник		Фанера		Баланс		Дрова		Пиловочник		Фанера		Баланс		Дрова		
	Ель, 5 м	Сосна, 4 м	Береза	Береза	Ель	Сосна	Осина	Осина	Ель, 5 м	Сосна, 4 м	Береза	Береза	Сосна	Ель	Осина	Осина	
Квартал 13, участок 2																	
Берёза	0	0	23	30	0	0	0	0	0	0	85	150	0	0	0	0	67 672 Р
Ель	204	0	0	0	0	28	0	0	712	0	0	0	0	261	0	0	641 582 Р
Ольха	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0 Р
Осина	0	0	0	0	0	0	51	548	0	0	0	0	0	0	163	667	0 Р
Сосна	0	60	0	0	24	0	0	0	354	0	0	276	0	0	0	0	211 727 Р
Всего	204	60	23	30	24	28	51	548	712	354	85	150	276	261	163	667	920 982 Р
Квартал 14, участок 1																	
Берёза	0	0	332	406	0	0	0	0	0	1329	2119	0	0	0	0	0	969 732 Р
Ель	338	0	0	0	0	62	0	0	1245	0	0	0	0	600	0	0	1 100 660 Р
Осина	0	0	0	0	0	0	373	1 865	0	0	0	0	0	1 273	2 584	0	0 Р
Сосна	0	212	0	0	77	0	0	0	0	1 243	0	0	895	0	0	0	727 630 Р
Всего	338	212	332	406	77	62	373	1 865	1 245	1 329	2 119	895	600	1 273	2 584	0	2 798 021 Р
Итого:	542	272	354	435	101	90	424	2 413	1 957	1 597	1 414	2 269	1 175	861	1 436	3 251	3 719 003 Р



Сравнение данных дронов и автоматической подеревной таксации с фактом заготовки делянок харвестером

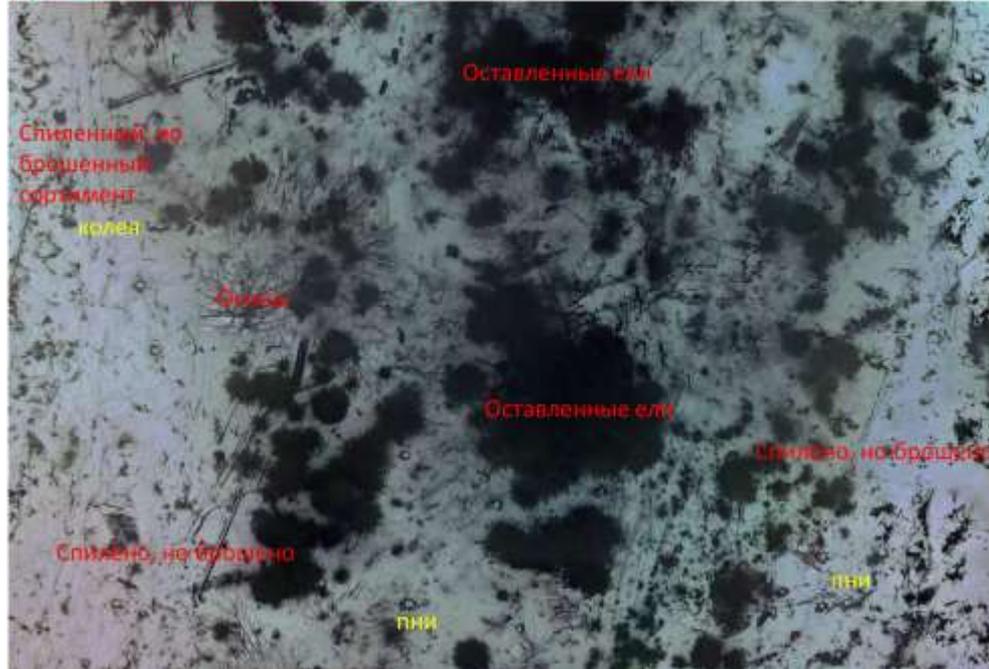
Порода	Кол-во стволов, дрон	Кол-во стволов, харвестер	Разница, %	Ср. высота, м	Ср. диаметр, см	Объем ликвидной древесины, м3, дрон	Объем ликвидной древесины, м3, харвестер	Разница, %	Средний объем хлыста, м3
Квартал 13, участок 2									
Берёза	160			19	26	53			0,33
Ель	653			17	26	231			0,35
Ольха	30			11	14	0			0,00
Осина	783			18	38	599			0,77
Сосна	279			20	25	84			0,30
Всего	1905	2352	-19,01%	18	31	967	849	13,93%	0,51
Квартал 14 участок 1									
Берёза	1895			20	27	737			0,39
Ель	1179			17	24	400			0,34
Осина	4071			17	32	2 238			0,55
Сосна	1186			16	23	289			0,24
Всего	8331	8394	-0,75%	17	29	3 664	3 602	1,72%	0,44
Итого:	10236	10746	-4,75%			4 631	4 451	4,05%	0,45

- В среднем дрон занижает количество стволов на 4,75%, чем больше площадь участка тем точнее количество стволов выше (на участке 14 га ошибка 0,75%)
- Объём ликвидной древесины по данным дрона выше чем по данным харвестера, так как часть стволов осталась на делянке или была брошена в процессе заготовки (см. следующий слайд)
- Ошибка определения числа стволов и объёма ликвидной древесины меньше 5%, что показывает высокий уровень достоверности получаемых данных



Причины расхождений данных дронов с данными харвестера

Участок 1, кв. 14: оставленные деревья и брошенная древесина



Участок 2, кв. 13: оставленные деревья и брошенная древесина



Как увеличить экономическую эффективность заготовки применяя данные дронов?

 Границы участка с долей пиловочника более 20%

 Фактические границы делянок

Доля пиловочника

%

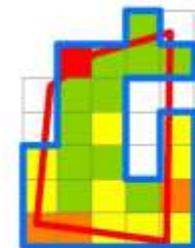
 0,000000 - 20,000000

 20,000001 - 40,000000

 40,000001 - 60,000000

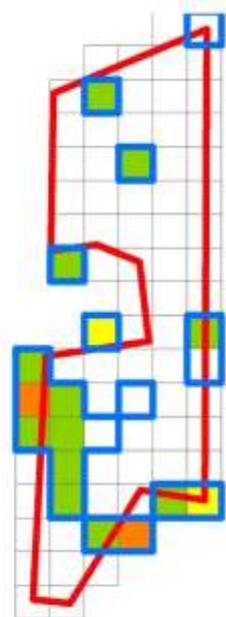
 60,000001 - 80,000000

 80,000001 - 100,000000



Размер ячейки 50 на 50 метров

Рекомендуемый: 14x14м



80% пиловочника дало 40% площади делянки

Умное планирование делянки – границы делянки оптимизируются под выход целевых сортиментов, например доля пиловочника

- Сокращается площадь делянки = снижаются затраты на заготовку, ответственность, риски
- Заготовка концентрируется на высоко-маржинальных участках
- Сокращается количество спиленной, но брошенной древесины



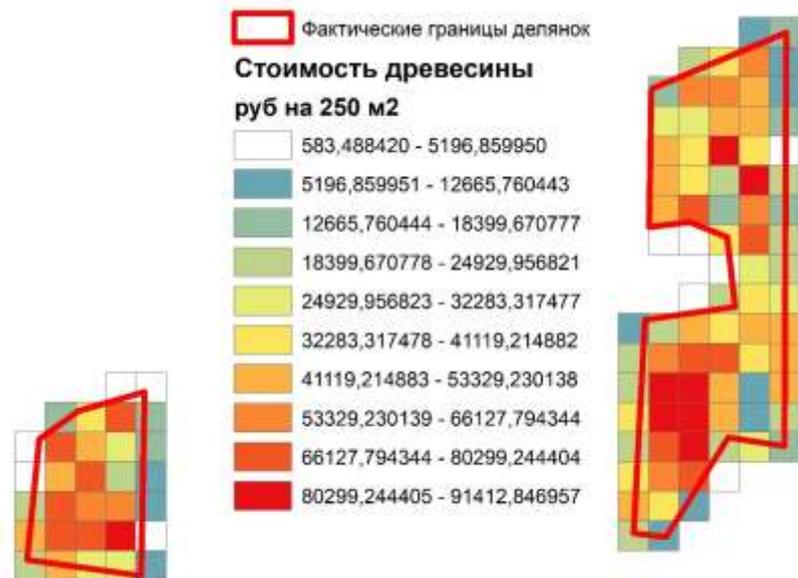
Е. Лопатин, Д. Добрынин, Д. Баранов, Е. Тарасенко, И. Новоселов. 2020. Высокоточное лесное хозяйство и цифровое управление лесами: финские технологии и возможности их трансфера в Россию. Устойчивое лесопользование №1

<https://wwf.ru/upload/iblock/580/04.pdf>

- Предварительный анализ состояния участка до отвода делянки позволяет наметить границы делянки по одному или целому ряду критериев
- Делянки более сложной формы могут быть отведены при помощи высокоточного GNSS оборудования, затраты на отвод увеличиваются на 20%, а эффективность на 80%

Как увеличить экономическую эффективность заготовки применяя данные дронов?

Технология позволяет планировать деланки с необходимой рентабельностью заготовки древесины



Реальный расчёт стоимости древесины – Затраты на заготовку – Затраты на трелевку = экономический эффект заготовки

Зависит от:

- Сортиментной структуры
- Стоимости сортиментов
- Затраты на заготовку
- Затрат на трелевку
- Затрат на транспортировку

Как заработать, зная подеревную структуру делянки?

 Фактические границы делянок

Экономический результат заготовки древесины руб.

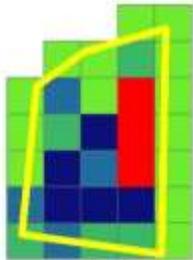
 Убыток -6140 - 0

 Доход 1 - 15567

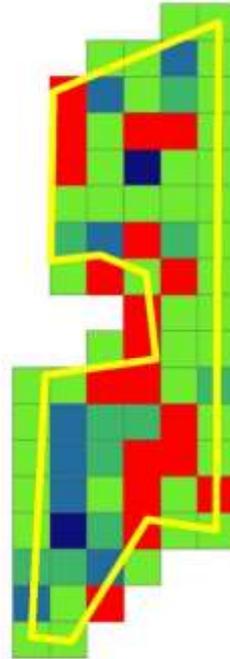
 Доход 15568 - 26420

 Доход 26421 - 37274

 Доход 37275 - 48127



Красные части делянки убыточны и могли бы быть исключены на этапе отвода



• Предположения в оценке

- Оценка стоимости древесины сделана в ценах 2018 г. по одному из предприятий Вологодской области
- Стоимость заготовки 600 руб./м³

- Анализ факторов влияющих на экономический результат заготовки древесины позволяет скорректировать границы делянок до рубки и получить наибольший эффект от умного планирования заготовки древесины
- Сравнение запланированной заготовки с фактом полученной древесины по сортаментам и фактическими затратами позволяет уточнить планирование следующих делянок
- На примере этой делянки сработал закон Паретто 20% деревьев дает 80% прибыли

Инвентаризация складов древесины дронами

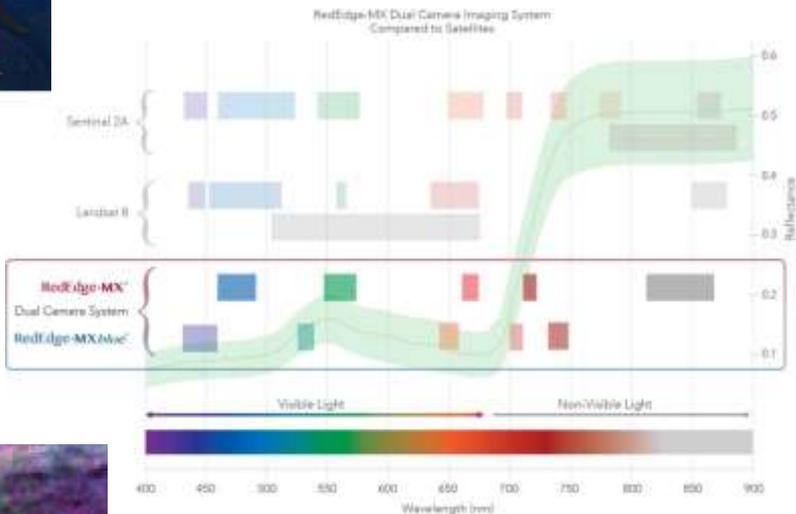
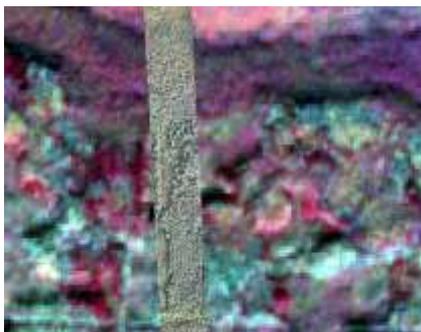
Дата и время съемки, результаты

Дата съемки: 21.12.2019
Время начала: 09:21
Время окончания: 09:32
Разрешение: 2 см на пиксель



Ошибка определения складочного объёма 1,41%

Комбинация данных дронов с данными космоса



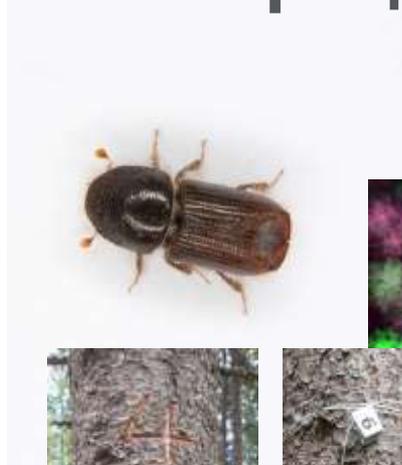
Оценка фактического состояния лесных ресурсов на больших территориях за счет объединения данных с дронов с космической съемкой, планирование делянок



Раннее обнаружение короеда и соснового пилильщика

Экспериментальный участок в Пукахарью

- Короед *Ips tyrographus*
- Искусственно зараженные деревья
- Феромоны



Оценка качества лесовосстановления

Пространственное разрешение 5 мм на 1 пиксел

1 этап: высота 120 метров
для карты препятствий

2 этап: «умный» полет дрона на высоте 5 метров и между деревьями



Саженец ели, 1 год, 14 см

Дополнительная информация и сотрудничество

Евгений Лопатин

е-mail: eugene.lopatin@luke.fi

Тел. +358 29 532 3002

Скайп: lopatin_finland