



## Технология автоматической подеревной таксации лесов и штабелей древесины дронами

Евгений Лопатин, ведущий научный сотрудник  
Института природных ресурсов Финляндии  
[eugene.lopatin@luke.fi](mailto: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

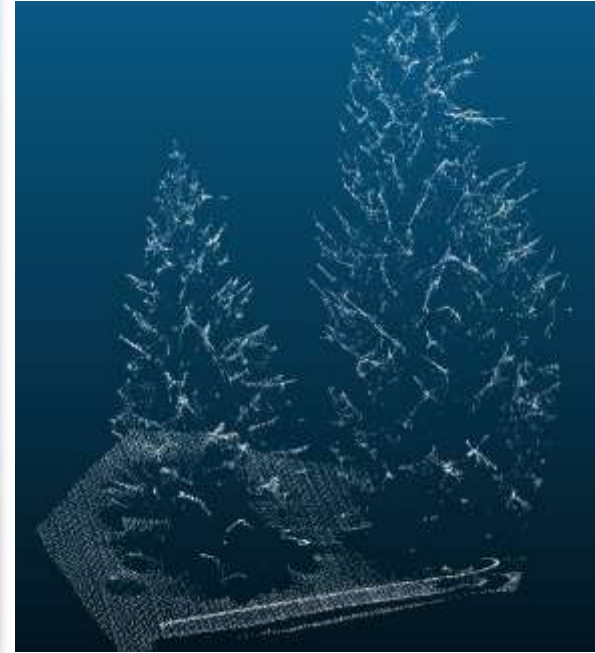
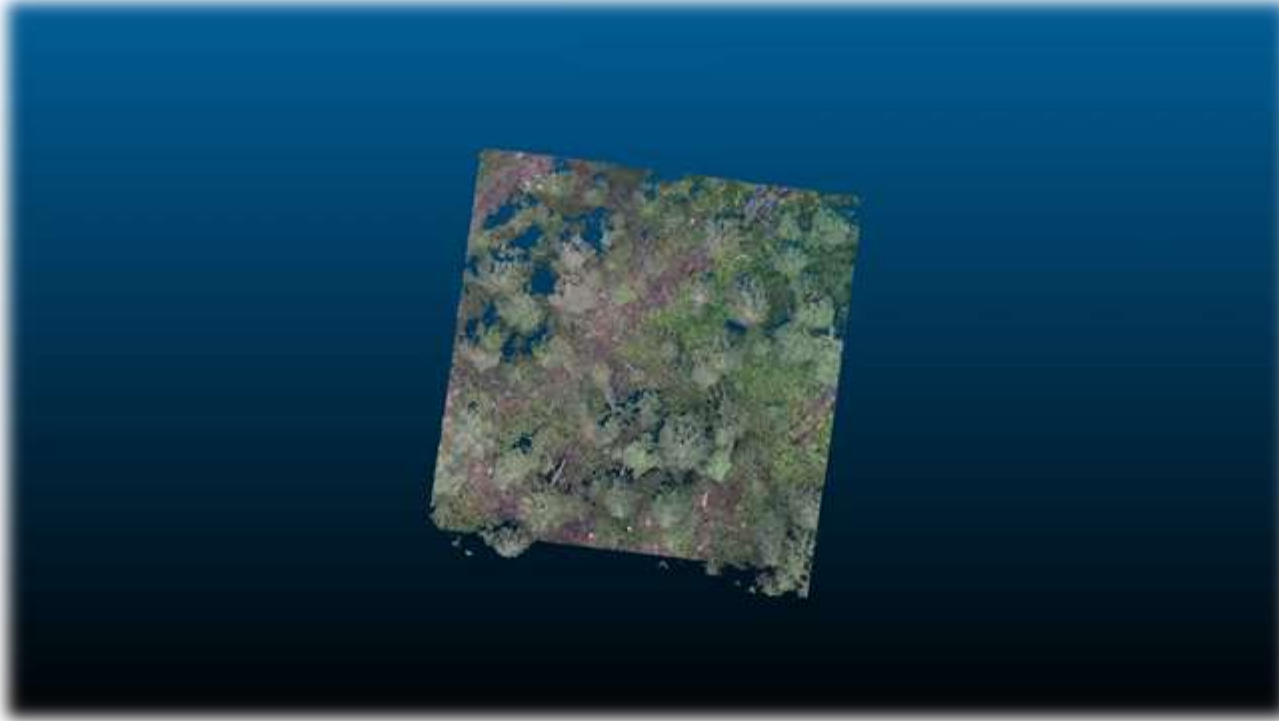
Ошибки позиционирования (x, y): 0.02

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

Подеревная таксация, измерение объёмов штабелей

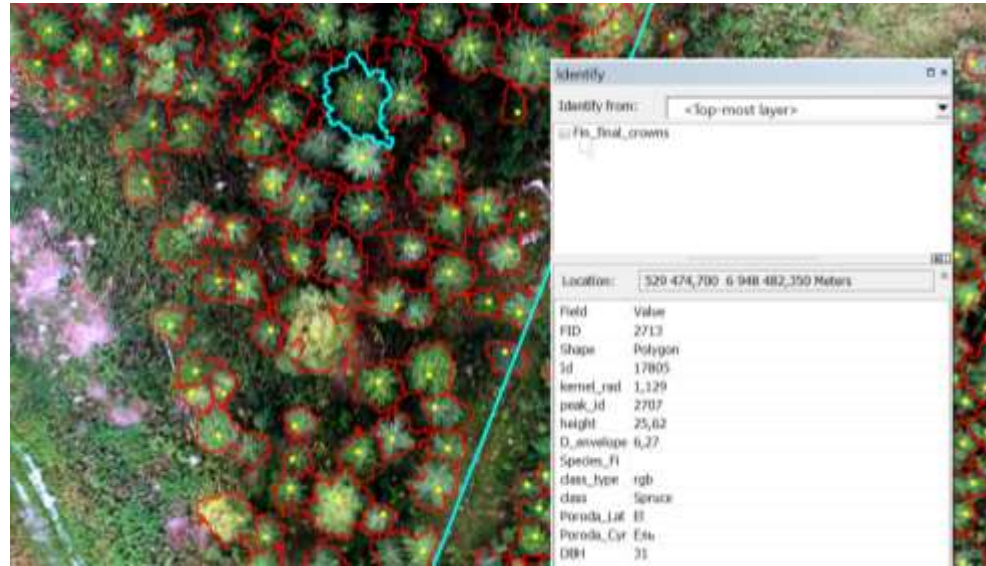
# Технология автоматической подеревной таксации лесов дронами

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



# Технология автоматической подеревной таксации лесов дронами

## 3. Определить высоту и границы кроны каждого дерева



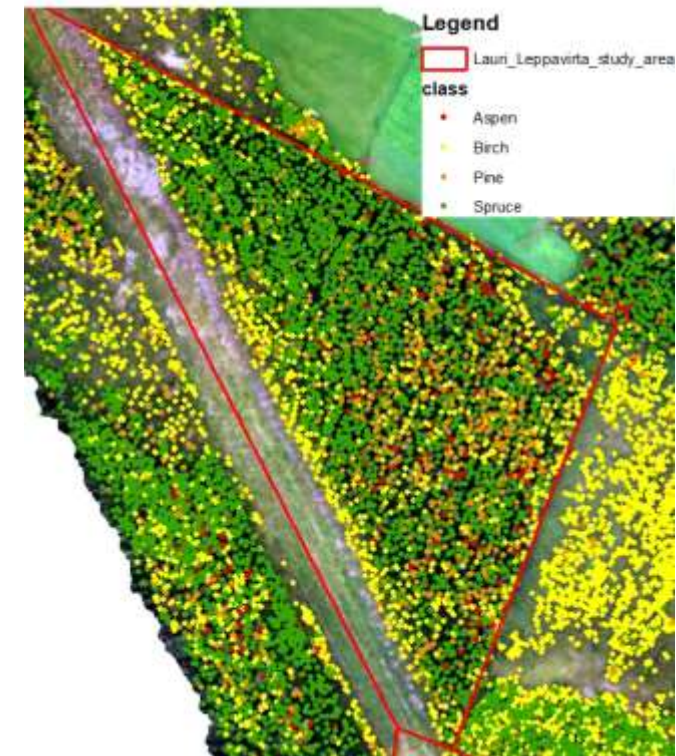
Для каждого дерева рассчитываются по 3D моделям:

- 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:

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

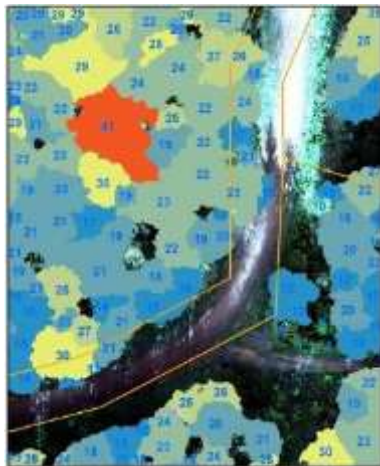
Пример модели для определения объёма ствола для ели:

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

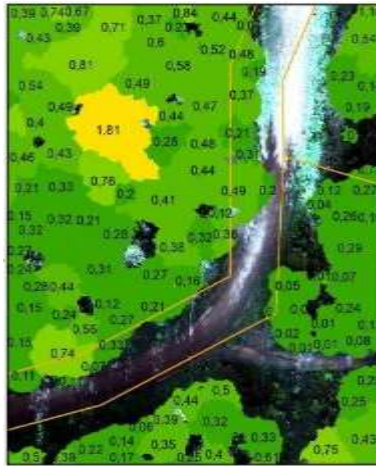
- Модели данных строятся по данным пробных площадей
- Радиус действия моделей 100-300 км от точки построения модели
- Ошибка определения диаметра: 2 см
- Ошибка определения объёма ствола: 3,4%



Порода



Диаметр на высоте  
груди, см

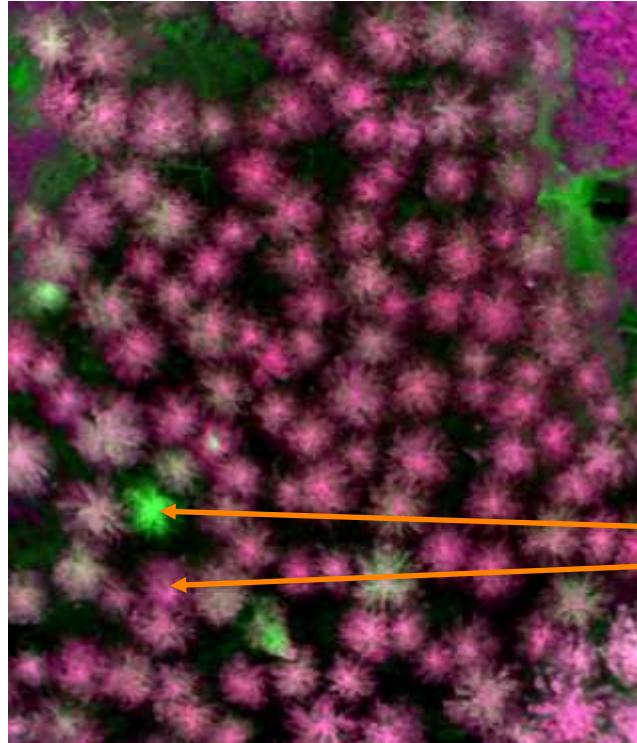


Объём ствола, м3

# 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



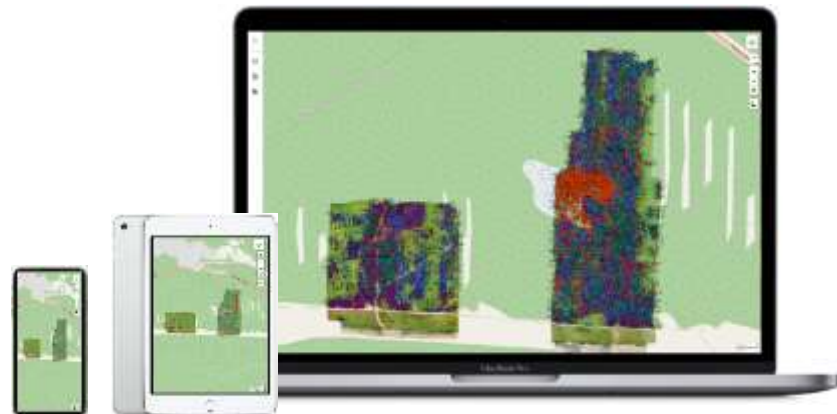
Красные – повреждены короедом до усыхания  
Желтые – начало повреждения короедом  
Зеленые - здоровые

# 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

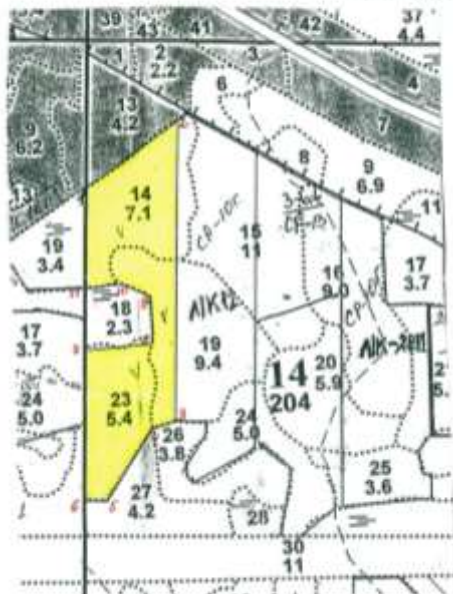
- **Цифровизация** заготовки древесины и управления лесными ресурсами
- **Эффект присутствия:** актуальная точная цифровая копия лесного участка
- **Секьюритизация** лесообеспечения: все деревья точно измерены до рубки
- **Единое информационное поле** для планирования работ
- **Инструменты взаимодействия** 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

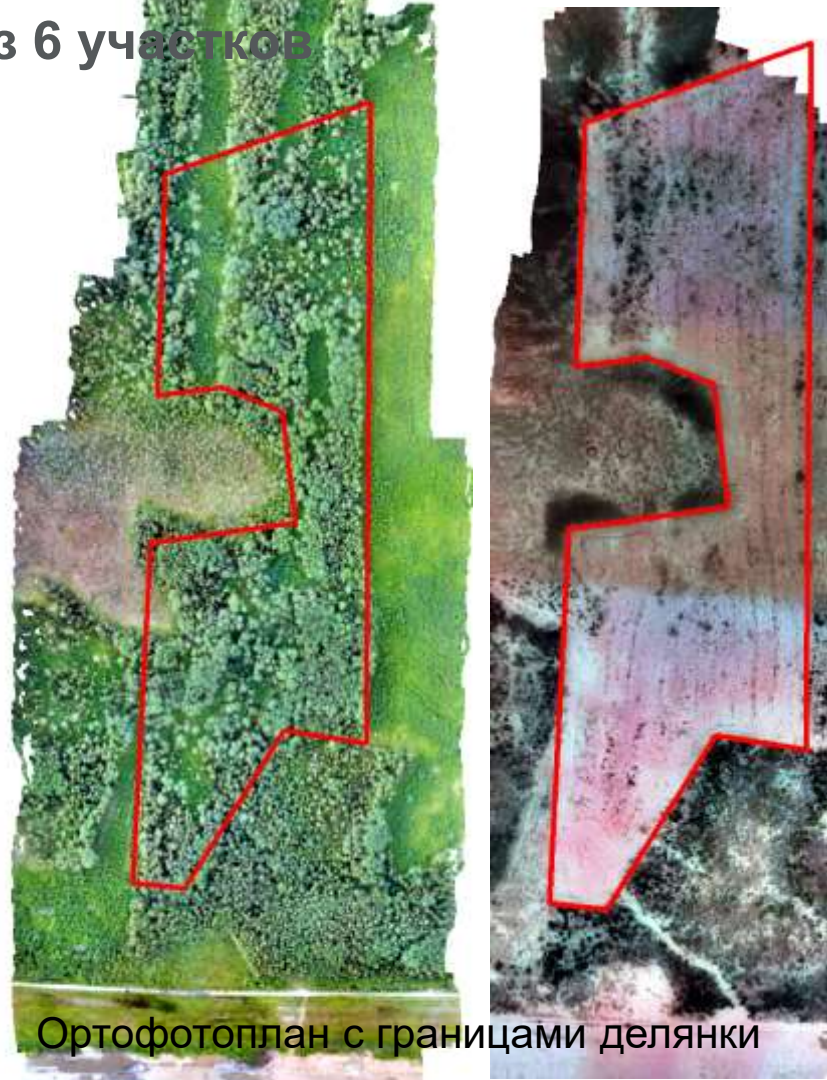
Площадь участка	Площадь, занятая строениями	
14,4	14,4	
Номер участка	Площадь рубки (длина линий, м)	Длина линий, м
строения		
Номер участка	Площадь рубки (длина линий, м)	Длина линий, м
1	13,9	215
2	14,7	152
3	14,9	89
4	14,2	100
5	14,8	71
6	14,4	140
7	14,1	111
8	14,7	111
9	14,2	89
10-11	14,1	81
11-12	14,1	111

- 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)

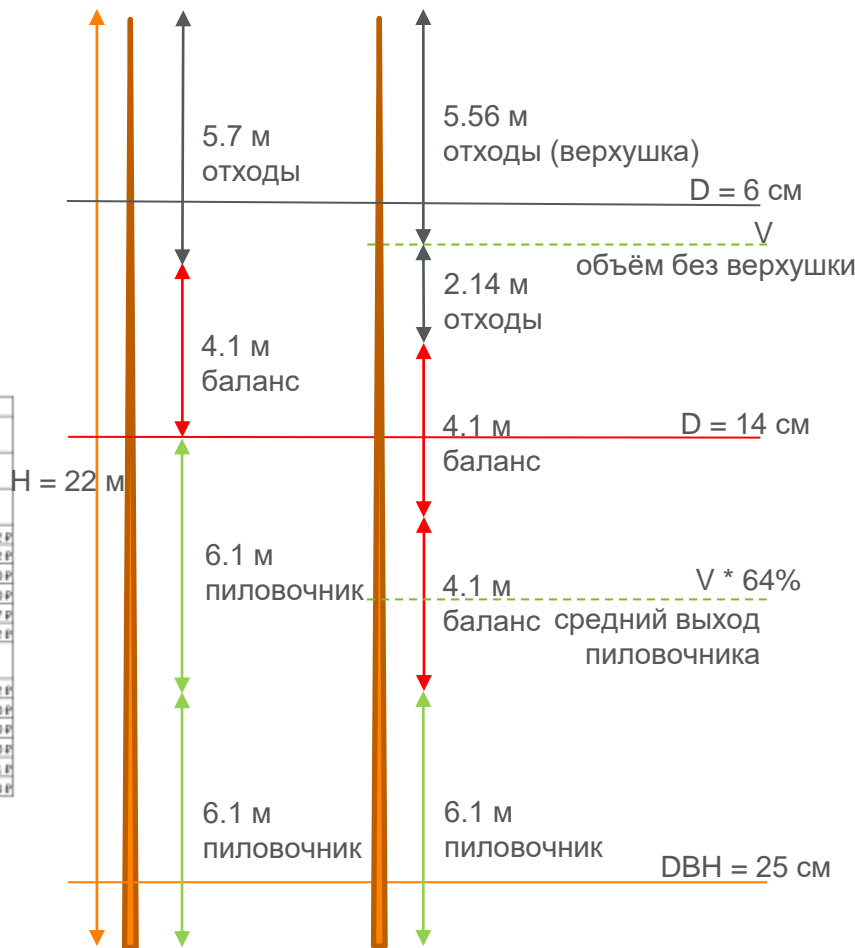
# Виртуальный распил стволов по сортиментной программе

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		Фанерак		Баланс		Дрова		Пиловочник		Фанерак		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, м <sup>3</sup> , дрон	Объем ликвидной древесины, м <sup>3</sup> , харвестер	Разница, %	Средний объем хлыста, м <sup>3</sup>
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

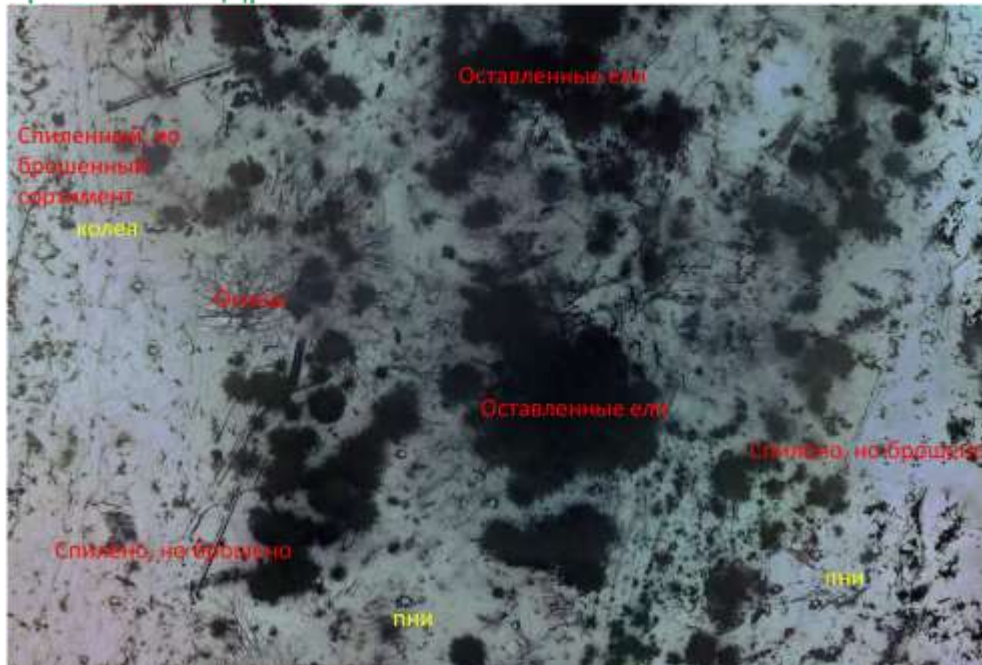
- В среднем дрон занижает количество стволов на 4,75%, чем больше площадь участка тем точнее количество стволов выше (на участке 14 га ошибка 0,75%)
- Объём ликвидной древесины по данным дрона выше чем по данным харвестера, так как часть стволов осталась на делянке или была брошена в процессе заготовки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



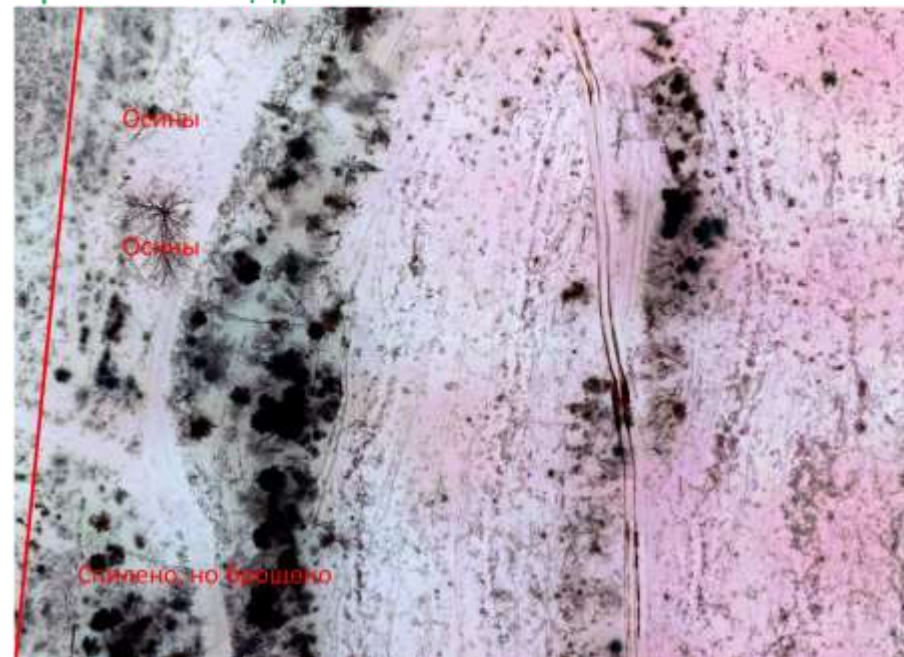


# Причины расхождений данных дронов с данными харвестера

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**

**%**

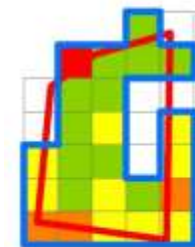
 0,000000 - 20,000000

 20,000001 - 40,000000

 40,000001 - 60,000000

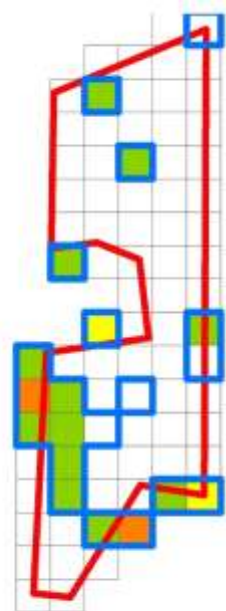
 60,000001 - 80,000000

 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



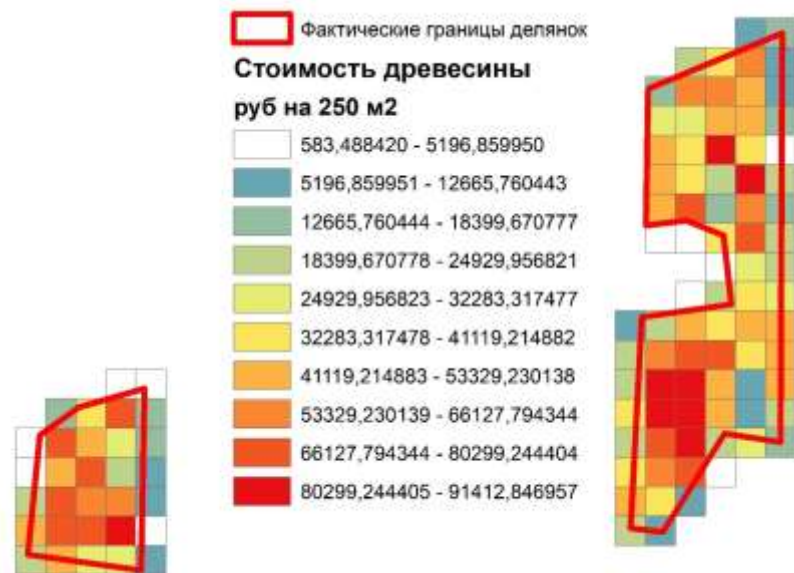
Е. Лопатин, Д. Добрынин, Д. Баранов, Е. Тарасенко, И. Новоселов. 2020. Высокоточное лесное хозяйство и цифровое управление лесами: финские технологии и возможности их трансфера в Россию. Устойчивое лесопользование №1

<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.**

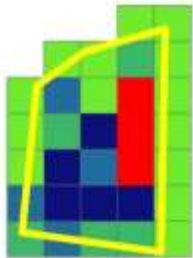
 Убыток -6140 - 0

 Доход 1 - 15567

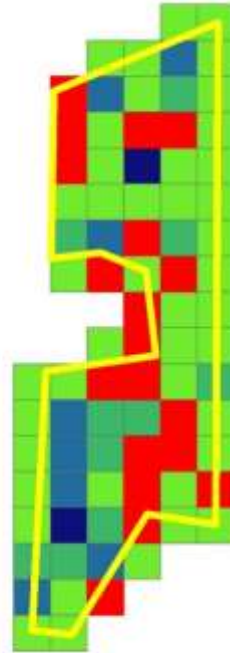
 Доход 15568 - 26420

 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./м<sup>3</sup>

- 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

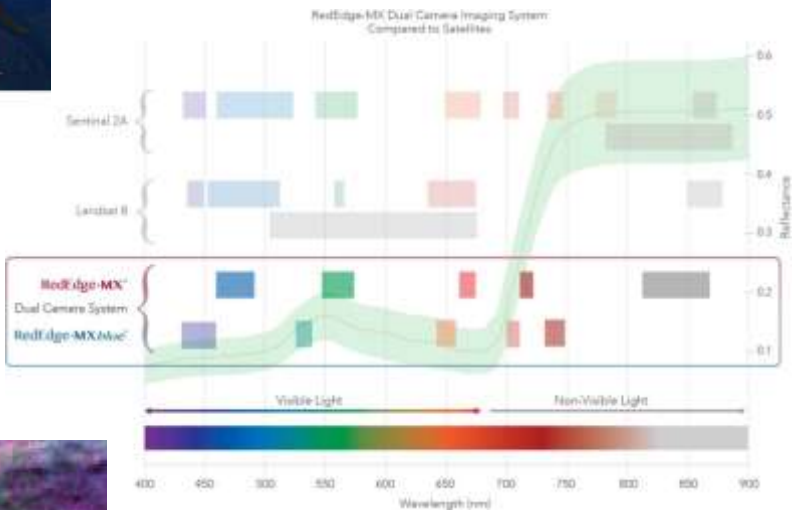
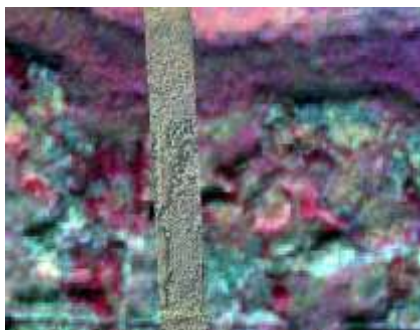
Дата и время съемки, результаты

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



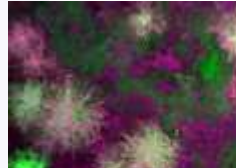
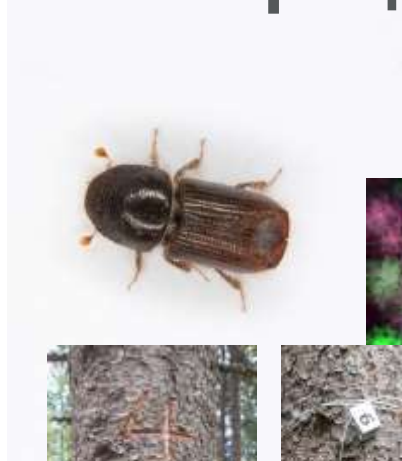
Оценка фактического состояния лесных ресурсов на больших территориях за счет объединения данных с дронов с космической съемкой, планирование делянок



# 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](mailto:eugene.lopatin@luke.fi)

Тел. +358 29 532 3002

Скайп: lopatin\_finland